

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

Часть 1

Виктор ЖДАНКИН,
технический специалист,
viktor@prochip.ru

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.).

Увеличение мощности, генерируемой на борту современных космических аппаратов, предъявляет требование к уменьшению массы и объема всего бортового энергетического комплекса. Реализовать это требование можно за счет повышения эффективности всех потребителей и преобразователей энергии. Для функциональной части аппаратуры это, в основном, осуществляется методами комплексной миниатюризации. Существенное уменьшение массы и объема систем электрооборудования достигается применением современных принципов действия источников электропитания, электроприводов и интегрально-гибридных конструкций силовых устройств. Использование систем постоянного повышенного напряжения с транзисторными преобразователями становится весьма желательным условием реализации новых устройств. В системах электропитания современных КА применяются шины с номинальными напряжениями 50, 70, 100, 120 В. В зарубежных космических аппаратах и космических станциях шины питания с повышенными напряжениями используются продолжительное время. Например, в КА навигационной спутниковой системы GPS III применяется сеть постоянного напряжения 70 В. Спутники GPS III, созданные компанией Lockheed Martin Space Systems, обеспечивают повышенную точность и в восемь раз повышенную защиту от помех за счет мощности сигнала.

Преобразование выходного напряжения первичных источников в уровни стабилизированного напряжения для питания аналоговой и цифровой аппаратуры осуществляется источниками электропитания, которые могут быть выполнены в виде отдельных блоков (модулей), так и элементов в составе функциональных узлов бортовой аппаратуры. В настоящее время широко распространен принцип проектирования, основанный на системной интеграции функционально завершенных электронных модулей. Модульность делает систему

более гибкой, технологичной и минимально затратной благодаря применению масштабируемой архитектуры, а также производственной, монтажной и ремонтно-эксплуатационной технологичности. Разработка и синтез унифицированных силовых модулей с использованием гибридной технологии является современным направлением развития силовой электроники, в частности – высоконадежных систем вторичного электропитания для авиационно-бортовой и космической аппаратуры [1].

Особым требованием к электронной аппаратуре космического приборостроения является стойкость к дестабилизирующим факторам космической среды. Особое значение имеет стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства.

Российские предприятия выпускают радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи для бортовой аппаратуры КА с электросистемами постоянного напряжения 27 В. Преобразователи выполняются с использованием гибридной толстопленочной технологии; применением технологии поверхностного монтажа на многослойной печатной плате – «кристалл на печатной плате», устанавливаемой в герметичный металлический корпус с заполнением внутреннего объема инертной средой (азотом); технологии поверхностного монтажа на многослойной плате корпусированных электронных компонентов с герметизацией корпуса компаундом. Изготовление радиационно-стойких модулей DC/DC-преобразователей для бортовой аппаратуры КА с электросистемой постоянного напряжения 100 В сдерживается длительным сроком изготовления высоковольтных эффективных радиационно-стойких транзисторов MOSFET.

В бортовой аппаратуре российских КА с системой электропитания с постоянным повышенным напряжением 100 В применялись модули американских компаний Modular Devices, Inc (MDI), International Rectifier, Microsemi, экспорт которых в Россию в настоящее время

Таблица 1. Основные параметры модулей серии HDCD/100W

Тип модулей	Выходное напряжение (ном.), В	Ток нагрузки, А	Выходная мощность, Вт	КПД, %	Емкость нагрузки, мкФ	Пульсации выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ
HDCD/100W-5-100U/SP	5 ±3%	20	100	78,5	1000	50
HDCD/100W-12-120U/SP	12 ±2%	10	120	85,9	1000	80
HDCD/100W-15-120U/SP	15 ±2%	8	120	86	1000	80
HDCD/100W-28-120U/SP	28 ±2%	4,28	120	85	1000	80
HDCD/100W-12-110U/D1	±12 ±2%	±4,58	110	86,5	1000	40
HDCD/100W-5-100U/D1	±5 ±2,5%	±10	100	77	1000	500 (макс.)

существенно ограничен. Для смягчения последствий западных санкций российским предприятиям космического приборостроения предлагается воспользоваться достижением китайских компаний в сфере производства радиационно-стойких электронных компонентов и модулей преобразователей напряжения для космических программ [2].

Общее представление 120-Вт модулей серии HDCD/100W

Одним из производителей радиационно-стойких DC/DC-модулей электропитания является Восточно-китайский научно-исследовательский институт микроэлектроники, специализирующийся на производстве обширного перечня электронных изделий и компонентов для аппаратуры специального назначения, авиационной, ракетной и космической техники.

Предприятие, в основном, занимается исследованиями и производством гибридных интегральных схем по толсто пленочной и тонко пленочной технологии, технологиями микросборок, а также связанных с ними материалов, схем и специального оборудования. В настоящее время предприятие располагает четырьмя лучшими в стране производственными линиями по выпуску толсто пленочных и тонко пленочных гибридных интегральных схем, металлических корпусов, многослойных корпусов и плат на основе низкотемпературной керамики (ЛТСС-керамики), а также четырьмя центрами автоматизации проектирования электронных приборов и устройств, контроля качества, технической информации и стандартизации. Области применения продукции предприятия охватывают силовые схемы (DC/DC, AC/DC, DC/AC, фильтры электромагнитных помех, усилители с широтно-импульсной модуляцией), преобразовательные схемы (синусно-косинусные цифровые преобразователи, преобразователи «частота-напряжение»), прецизионные схемы (источники опорного напряжения, прецизионные источники постоянного тока), схемы обработки сигналов, усилительные схемы, специализированные гибридные интегральные схемы и многокристалльные компоненты.

Особый интерес для российских предприятий, производящих ракетно-космическую технику, могут представлять модули DC/DC-преобразователей напряжения с входным напряжением 100 В с предельным уровнем радиационной стойкости, которые применяются в бортовой аппаратуре (БА) российских спутников нового поколения.

В качестве эталона для создания этих модулей использовались модули преобразователей напряжения серии AFL120, разработанные компанией International Rectifier, которые отличаются широким набором защитных и сервисных функций и отлично зарекомендовали себя во множестве низкоорбитальных программ, космических зондах для исследования дальнего космоса и аппаратуре специального назначения. Заметим, что для модулей серии AFL120 в документации не указаны показатели радиационной стойкости, но все изделия компании International Rectifier выполняются по структурам, пригодным для изготовления в варианте с повышенной радиационной стойкостью – достаточно заменить критичные компоненты радиационно-стойкими элементами. Поэтому не удивительно то, что в справочной документации на модули серии HDCD/100W уделено много страниц

для сравнения их параметров с техническими параметрами высоконадежных изделий серии AFL120.

Серия HDCD/100W состоит из одно- и двухканальных преобразователей напряжения с уровнем входных напряжений 70–120 В (номинальное значение: 100 В) и допуском переходным отклонением до 160 В длительностью 50 мс. Гарантируется высокая стабильность рабочих характеристик при эксплуатации в диапазоне температур –55...+125°C (на основании корпуса) без понижения мощности. Состав серии и основные технические характеристики изделий приведены в табл. 1.

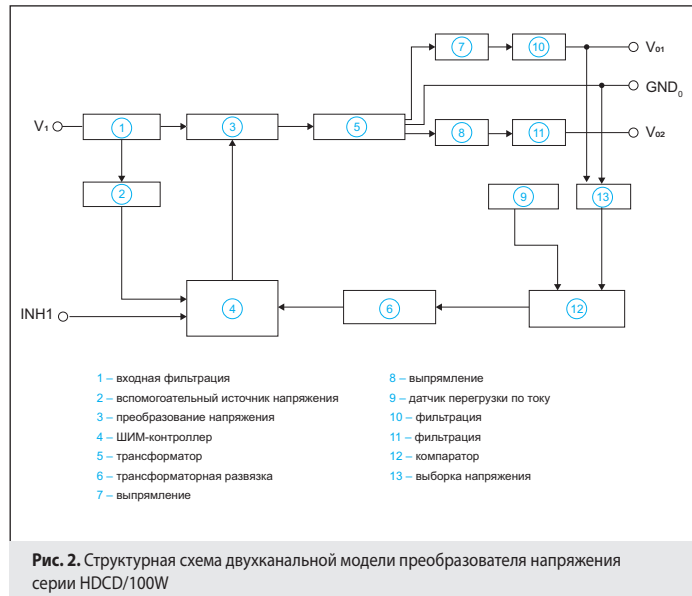
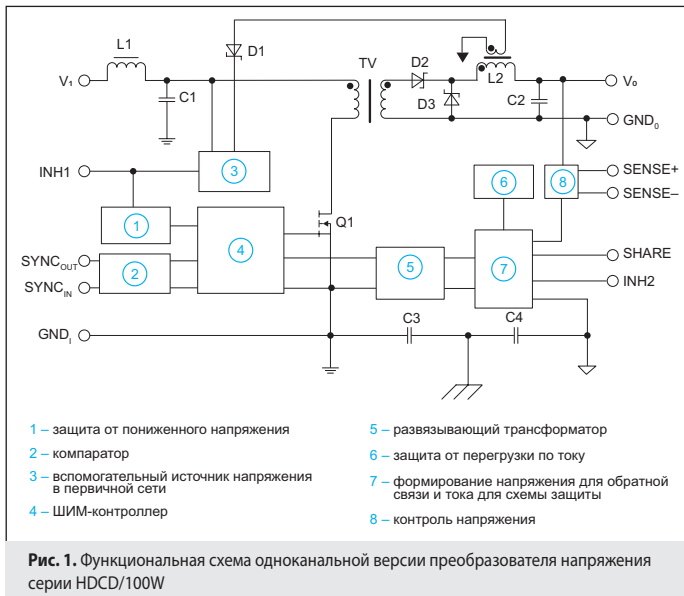
Стойкость к суммарной накопленной дозе радиации обеспечивается при дозах ≥ 100 крад (Si); гарантируется отсутствие одиночных эффектов – обратимых и катастрофических (необратимых) – от воздействия протонов и ионов с предельными линейными потерями энергии (ЛПЭ) в кремнии ≥ 75 МэВ·см²/мг. Далее рассматривается контроль радиационной стойкости на этапе разработки и производства, и представляются результаты испытаний.

Топология и конструкция

Для построения стабилизаторов напряжения серии HDCD/100W применяется однотактная прямоходовая структура, которая является энергетически наиболее эффективной среди других структур DC/DC-преобразователей с низковольтными выходными напряжениями. Для регулирования выходного напряжения применяется метод ШИМ с постоянной высокой рабочей частотой (400–600 кГц) и обратной связи по напряжению. Функциональная схема одноканального преобразователя приведена на рис. 1. Двухканальные модели построены по структурной схеме, показанной на рис. 2.

Входное напряжение подается на последовательно соединенные первичную обмотку трансформатора и силовой ключ на транзисторе MOSFET (Q1). Силовой транзистор периодически открывается управляющими импульсами, формируемыми контроллером ШИМ. ШИМ-контроллер реализует полную логику управления для надлежащей коммутации силового транзистора схемы первичной стороны, которая обеспечивает требуемый уровень стабилизации выходного напряжения при любых изменениях входного напряжения или тока нагрузки. Передача энергии во вторичную часть осуществляется через разделительный трансформатор TV при открытом состоянии силового ключа, напряжение выпрямляется прямым диодом Шоттки (D1), имеющим небольшое дифференциальное сопротивление, а выходной LC-фильтр выделяет среднюю составляющую из импульсного напряжения, формируя выходное напряжение на нагрузке. Коэффициент заполнения последовательности импульсов от ШИМ-контроллера регулируется в зависимости от уровня выходного напряжения. Сигнал ошибки выходного напряжения передается в первичную часть преобразователя через трансформаторную развязку.

В схеме предусмотрен контроль тока в узле преобразования мощности для защиты от перегрузки по току и короткого замыкания на выходе. Питание микросхемы управления осуществляется от дополнительной обмотки выходного дросселя L2. Таким образом, в режиме малых нагрузок напряжение питания микросхемы становится недостаточным, и схема переходит в режим «перезапуска». Величина



выходного напряжения в этом режиме не должна превышать номинальное значение более чем на 5%. При этом нижний порог выходного напряжения, а также характер и величина пульсаций выходного напряжения не оговариваются. Минимальное значение тока нагрузки, при котором гарантируются все выходные параметры, устанавливается на уровне 10% от номинального значения тока нагрузки.

Детально принцип работы однотактной прямоходовой структуры рассмотрен в многочисленных работах. Мы же рассмотрим некоторые принципиальные моменты.

При идеальных режимах работы магнитопровод силового трансформатора в однотактном прямоходовом преобразователе напряжения перемагничивается по симметричной петле гистерезиса, используя максимально возможный диапазон индукции. Однако в реальном преобразователе индуктивности рассеяния трансформатора паразитные емкости силового ключа приводят к образованию постоянной составляющей тока намагничивания, что может повлиять на магнитный режим трансформатора – вызвать насыщение его сердечника и проблемы с обратным восстановлением диода. В настоящее время для размагничивания трансформатора в прямоходовых преобразователях применяется активное размагничивание. Активный ограничитель включает дополнительный транзистор MOSFET и резонансный конденсатор. Активная цепь восстановления дает возможность оптимального использования магнитопровода трансформатора, обеспечивая работу с симметричным перемагничиванием в двух квадрантах B - H плоскости [3]. Дополнительный транзистор MOSFET должен иметь низкий заряд затвора, что сложно обеспечить для радиацион-

но-стойкого ключа. Введение дополнительного ключа и резонансного конденсатора увеличивает сложность и стоимость силового каскада. Кроме того, структуры преобразователей, у которых при одновременном отпирании двух транзисторов от излучения образуется практически короткозамкнутая цепь от низкоимпедансного источника к земле, всегда чувствительны к одиночным эффектам. Схемотехника активного ограничения относится к таким потенциально опасным схемам [4].

В схеме рассматриваемых преобразователей применяется структура прямоходового преобразователя с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием магнитопровода. Высокое значение частоты переключения (400–600 кГц) обеспечивает размагничивание сердечника резонансным способом. При использовании этой структуры коэффициент заполнения импульсов может превышать 0,5. Индуктивность намагничивания трансформатора и паразитные емкости силового ключа образуют на трансформаторе параллельный резонансный контур, через который трансформатор размагничивается (без потерь) во время запертого состояния силового ключа. Трансформатор перемагничивается симметрично в двух квадрантах характеристики $B = f(H)$ с удвоенным размахом индукции. Подобные структуры подробно рассмотрены во многих публикациях, например в [5–6].

В качестве силового ключа в преобразователях серии HDCC/100W применяется высоковольтный радиационно-стойкий MOSFET с высоким допустимым напряжением. Транзистор, выполненный с использованием вертикального производственного процесса, обладает

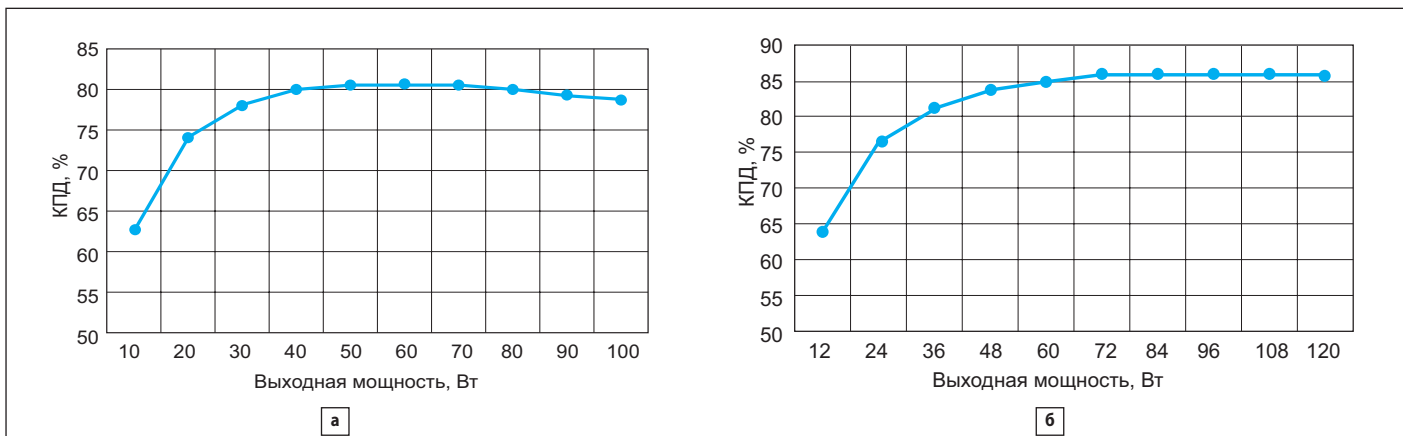


Рис. 3. Зависимость КПД от выходной мощности при $T_A = 25^\circ\text{C}$ и входном напряжении 100 В модуля: а) HDCC/100W-5-100U/SP; б) HDCC/100W-28-120U/SP

Таблица 2. Технические характеристики DC/DC-преобразователя HDCD/100W-5-100U/SP

Параметр	Обозначение параметра	Условия измерения, если не указано иное: -55°C ≤ T _c ≤ 125°C, V _i = 100 ± 0,5 В, вход INH1 не используется, C _L = 0	Минимальное значение	Номинальное значение	Максимальное значение	Единица измерения
Выходное напряжение	V _o	I _o = 20 А	4,85	5	5,15	В
Ток нагрузки	I _o	V _i = 70–120 В	0	20	20	А
Пульсация выходного напряжения	V _{RIP}	BW = 20 МГц, I _o = 20 А	–	50	500	мВ
Нестабильность по напряжению	S _v	V _i = 70 → 120 В, I _o = 20 А	–	1	50	мВ
Нестабильность по току	S _i	I _o = 0 → 20 А	–	1	50	мВ
Входной ток	I _i	INH1 и INH2 разомкнуты, режим холостого хода	–	60	110	мА
Емкость в нагрузке	C _L	T _A = 25°C, I _o = 20 А	–	1000	1000	мкФ
Ток пульсаций на входе	I _{RIP}	BW = 20 МГц, I _o = 20 А, подключен фильтр ЭМП	–	30	130	мА
Частота преобразования	f _s	I _o = 20 А	400	500	600	кГц
КПД	η	V _i = 100 В, I _o = 20 А, T _A = 25°C	76	78,5	–	%
Рассеиваемая мощность при коротком замыкании	P _D	V _i = 100 В, короткое замыкание	–	40	50	Вт
Электрическое сопротивление изоляции	R _{ISO}	T _A = 25°C, выключенное состояние, напряжение 500 В постоянного тока прикладывается между входом и выходом или между любым выводом и корпусом	100	>100	–	МОм
Изменение выходного напряжения при скачкообразном изменении нагрузки	V _{ROR}	T _A = 25°C, I _o = 10 А → 20 А или 20 → 10 А, время изменения нагрузки должно превышать 10 мкс	–600	250	600	мВ
Время восстановления выходного напряжения при скачке нагрузки	t _{ROR}	T _A = 25°C, I _o = 10 А → 20 А или 20 → 10 А, время изменения нагрузки должно превышать 10 мкс	–	270	600	мкс
Перерегулирование при включении	V _{TO}	V _i = 0 → 100 В, I _o = 20 А	–	0	50	мВ
Задержка запуска	t _{TR}	V _i = 0 → 100 В, I _o = 20 А	–	5	20	мс
Время восстановления после сбоя нагрузки	t _{LF}	T _A = 25°C, от короткого замыкания до 20 А	–	6	20	мс
Напряжение холостого хода входа управления	V _{INH}	I _o = 20 А, напряжение холостого хода вывода INH1 I _o = 20 А, напряжение холостого хода INH2	– –	13 8	16 12	В

балансом между относительно высокими потерями на переключение и низкими потерями на проводимость. На графике зависимостей КПД от выходной мощности видно, что КПД преобразователей практически не уменьшается в области максимальных мощностей (рис. 3). Значение КПД также мало зависит от изменения входного напряжения (рис. 4).

Динамические характеристики, уровни пульсаций напряжения и тока, нестабильности по току и напряжению модуля HDCD/100W-5-100U/SP приведены в табл. 2. В указанном диапазоне скачкообразных изменений выходного тока модуль характеризуется малыми переходными отклонениями.

В табл. 3 приведены абсолютные максимальные эксплуатационные параметры для модулей серии HDCD/100W, а в табл. 4 – рекомендуемые рабочие условия.

Модули характеризуются высокой энергетической эффективностью – до 86,5%, что является весьма неплохим показателем для радиационно-стойких приборов, учитывая, что при подсчете КПД учтены потери во входном и выходном фильтрах.

Однако при реализации моделей с выходными напряжениями менее 5 В (3,3 В и ниже) из-за возрастающих потерь в выходных диодах КПД преобразователей катастрофически снижается. Обеспечивается высокий КПД мощных преобразователей применением синхронных выпрямителей – вместо прямого (D1) и возвратного диода (D1) используются полевые транзисторы. Это требует изменения топологии, выбора контроллера схемы управления, использования в качестве синхронных ключей радиационно-стойких MOSFET с низким сопротивлением канала в открытом состоянии и зарядом затвора, а также малым сопротивлением затвора, что значительно повышает стои-

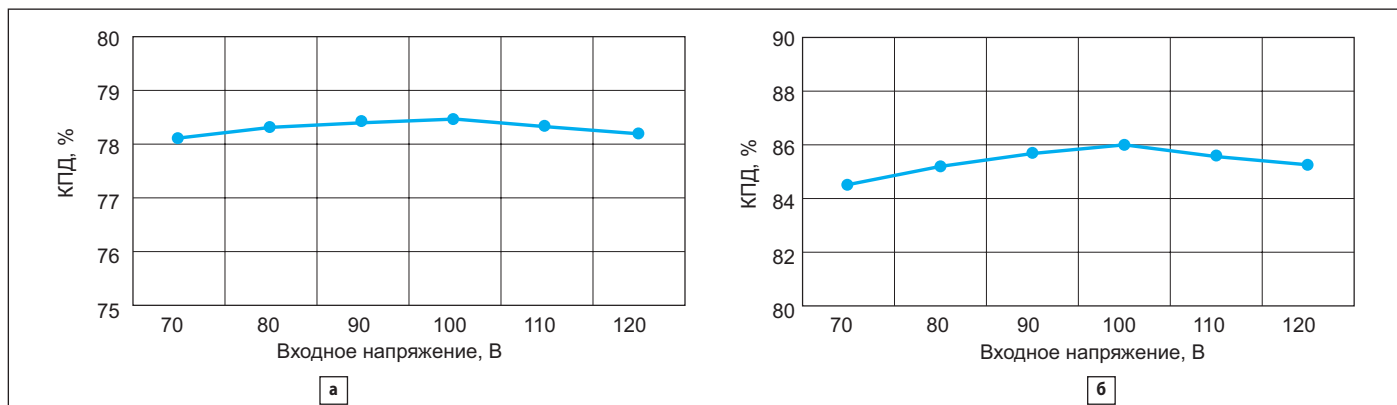
Рис. 4. Зависимость КПД от входного напряжения при T_A = 25°C и полной нагрузке модуля: а) HDCD/100W-5-100U/SP; б) HDCD/100W-28-120U/SP

Таблица 3. Абсолютные максимальные значения эксплуатационных параметров модулей серии HDCD/100W

Абсолютное максимальное значение	HDCD/100W-5-100 U/SP	HDCD/100W-12-120U/SP	HDCD/100W-15-120U/SP	HDCD/100W-28-120U/SP	HDCD/100W-12-110U/D1	HDCD/100W-5-100U/D1
Выходная мощность P_0	110	132	132	132	121	110
Входное напряжение V_i	0~130 В					
Диапазон рабочих температур T_c	-55~125°C					
Диапазон температур хранения T_{stg}	-65~150°C					
Температура пайки выводов T_h	300°C (10 с)					

Таблица 4. Рекомендуемые рабочие условия для модулей серии HDCD/100W

Рекомендуемые рабочие условия	HDCD/100W-5-100U/SP	HDCD/100W-12-120U/SP	HDCD/100W-15-120U/SP	HDCD/100W-28-120U/SP	HDCD/100W-12-110U/D1	HDCD/100W-5-100U/D1
Выходной ток	2~20А	1~10А	0,8~8А	0,428~4,28 А	0,46~4,58 А (сбалансированная нагрузка по каждому каналу)	1~10 А (сбалансированная нагрузка по каждому каналу)
Входное напряжение V_i	70~120 В					
Диапазон рабочих температур T_c	-55~125°C					

мость изделия, а применение дополнительных активных элементов снижает надежность.

В случаях использования в источнике питания БА модулей серии HDCD/100W для обеспечения питанием функциональных узлов аппаратуры, требующих малого напряжения питания 3,3 В и ниже, рекомендуется применять радиационно-стойкие модули регуляторов напряжения с повышенными КПД без гальванической развязки – так называемые POL-преобразователи (Point of Load). Размещают эти модули максимально близко к нагрузке, что снижает влияние распределенной сети. Модули отличаются высокой скоростью нарастания тока нагрузки и небольшими размерами. Радиационно-стойкие локальные преобразователи напряжения с выходными токами до 20 А выпускаются китайскими предприятиями. Модули серии HDCD/100W с выходными напряжениями 5, 12 В можно применять для формирования промежуточной шины для подключения POL-преобразователей и формирования распределенной системы питания.

Конструкция

Корпус преобразователей выполнен из холоднокатаной стали марки 10# с никелевым покрытием; толщина покрытия составляет 4–15 мкм. Выводы изготовлены из композиционного медного сердечника; покрытие выводов – никелированное и золотое. Толщина золотого покрытия составляет 1,3–5,7 мкм. Для надежной герметизации корпуса применяется технологический процесс под названием «шовно-роликовая сварка». В качестве материала для крышки и ободка используется ковар – сплав никеля (29%), кобальта (17%) и железа (53%). Использование ковара обусловлено близким значением его температурного коэффициента линейного расширения

(ТКЛР) к значению этого параметра для керамики и стали марки 10# ($13,9 \cdot 10^{-6}/K$) и материала подложки из оксидированного алюминия Al_2O_3 ($6,7 \cdot 10^{-6}/K$), что обеспечивает небольшие механические напряжения в области их соединения при нагреве и, следовательно, высокую прочность. Изоляторы выводов изготавливаются из стеклотрубок, имеющих близкие по значению ТКЛР с материалом корпуса. Компактность систем шовно-роликовой сварки позволяет интегрировать их в атмосферные камеры с поддержанием необходимого уровня вакуума, контролем параметров влажности и определенного состава атмосферы. Герметизация корпусов модулей проводится в атмосфере сухого азота под давлением 1 атм. Это обстоятельство необходимо учитывать при размещении преобразователей в вакууме, так как при внутреннем давлении около 1 атм крышка преобразователя имеет склонность к изгибу. Необходимо предусмотреть дополнительное пространство во избежание механического воздействия, оказываемого крышкой на другие компоненты. У преобразователей с большими размерами корпуса отклонение крышки от нормального состояния может достигать 1 мм.

Герметизация методом шовно-роликовой сварки обеспечивает показатель герметичности корпусов по скорости утечки гелия не более $5 \cdot 10^{-5}$ (Па·м³)/с. Герметичность изделия при контроле влажности среды актуальна, так как продлевает срок службы микросхем и уменьшает вероятность выхода из строя в результате замыкания внутренних контактов.

В качестве материала подложки используется оксидированный алюминий Al_2O_3 .

Керамические конденсаторы, резисторы и бескорпусные микросхемы (кристаллы) устанавливаются на подложку из Al_2O_3 с использованием процессов склеивания или сварки. Кристаллы силовых MOSFET



Рис. 5. Внешний вид конструкции преобразователей напряжения серии HDCD/100W с явно выраженной плоской формой

Таблица 5. Тепловые характеристики преобразователей и значения теплового сопротивления

Название модели	Тепловое сопротивление на участке переход – корпус, °C/Вт рассеиваемой мощности	Максимальная разница температур кристалла, °C	Максимальная потребляемая мощность, Вт	Размеры радиатора, мм ³	Материал радиатора
HDCD/100W-5-100U/SP	0,78	21,5	27,4	100×150×1	алюминий
HDCD/100W-12-120U/SP	1,20	23,7	19,7		
HDCD/100W-15-120U/SP	1,20	23,5	19,5		
HDCD/100W-28-120U/SP	1,11	23,5	21,1		
HDCD/100W-12-110U/D1	1,36	23,4	21,1		
HDCD/100W-5-100U/D1	0,78	21,5	27,4		

и выпрямительных диодов устанавливаются на подложку с помощью пайки оплавлением. Силовой трансформатор крепится непосредственно к металлическому корпусу теплопроводящим клеем; выводы этого трансформатора фиксируются клеем. Для обеспечения надежной работы применяемые клеящие материалы имеют максимально достижимые эксплуатационные характеристики в части теплопроводности, электропроводности, прочности, стабильности в условиях воздействия спецфакторов космического пространства. Подложка и металлический корпус скреплены методом пайки оплавлением, что способствует отводу тепла от устройства. Способы установки бескорпусных элементов обеспечивают низкие тепловые сопротивления конструкции и не требуют значительных объемов занимаемого пространства. Равномерность выделения теплоты по поверхности гибридной сборки достигается рассредоточением теплонагруженных элементов. Корпус имеет явно выраженную плоскую форму (рис. 5), дающую лучшее соотношение между поверхностью охлаждения и объемом. Габаритные размеры корпуса: 76,7×38,6×10,7 мм. Выводы расположены горизонтально относительно плоскости основания для объемного монтажа. Вес: 80 ±3 г.

Развитие техники, работающей в безвоздушной среде, стимулировало разработку методов теплоотвода посредством передачи теплоты через конструктивные элементы, обладающие достаточной теплопроводностью [7].

В условиях полной нагрузки при входном напряжении 100 В и температуре корпуса 125°C наиболее высокая температура приходится на силовой транзистор и диоды Шоттки. Параметры теплового сопротивления преобразователей на участке «переход кристалла транзистора – корпус» представлены в табл. 5. Эти данные можно использовать для расчета теплового режима модулей преобразователей.

При использовании модулей размер радиатора должен соответствовать требованиям к теплоотводу, чтобы обеспечить достаточный отвод тепла и повысить надежность устройства. Для минимального

теплового сопротивления контактная поверхность между нижней частью корпуса модуля и радиатором должна быть выполнена из теплопроводящих материалов, таких как термопаста и теплопроводящие пленочные прокладки. Пленочные прокладки на силиконовой основе с высокой теплопроводностью заполняют неровности микрорельефа поверхностей, повышая теплопередачу.

Окончание статьи см. в следующем номере журнала.

Литература

1. Харченко И. А. Общие критерии-рекомендации к проектированию конверторных модулей авиационно-бортовых вторичных источников электропитания. Электрическое питание. 2016. №2.
2. Сашин А. Импортозамещение по-русски: китайские ИС на российских КА. Компоненты и технологии. 2021. №6.
3. Дейнеко Д. С., Кастров М. Ю. Способы размагничивания трансформатора прямоходового преобразователя постоянного напряжения с помощью активного ограничителя. Практическая силовая электроника. 2010. №1 (37).
4. Case Study: Radiation Design and Testing of Hybrid DC-DC Converters. April. 2002. COTS Journal.
5. Карзов Б. Н., Соловьев И. Н., Ходырев Е. И. Обеспечение процесса резонансного размагничивания сердечника трансформатора в прямоходовом преобразователе напряжения, функционирующем в режиме ШИМ. Электрическое питание. 2023. №2.
6. Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием. Практическая силовая электроника. 2011. №1 (41).
7. Букреев С. С., Головацкий В. А., Гулякович Г. Н. и др. Источники вторичного электропитания. Под ред. Конева Ю. И. М. Радио и связь. 1983. (Проектирование РЭА на интегральных микросхемах).