

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи из КНР

Часть 1

Виктор Безродный (Москва)

В статье представлены радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи для применения в системах электропитания космических аппаратов с постоянным повышенным напряжением 100 В производства одного из предприятий Китайской Народной Республики. Информация будет интересна российским специалистам, так как в настоящее время в России разработка подобных изделий сдерживается отсутствием радиационно-стойких высоковольтных MOSFET и другими техническими проблемами.

1 марта 2014 г. Министерство торговли США приостановило выдачу лицензий американским компаниям на продажу продукции двойного назначения в Россию. На основании Правил экспортного регулирования (Export Administration Regulations, EAR) отдельному лицензированию Министерством торговли США при экспорте и реэкспорте с территории страны подлежат товары, технологии и программное обеспечение, которые потенциально могут быть использованы и в ОПК [1]. Основными структурами, которые пострадали от запрета поставок, являются Роскосмос, Росатом, Минобороны и нефтегазодобывающий комплекс. Приостановлена выдача лицензий и на радиационно-стойкие электронные и радиокомпоненты (ЭРК), а ведь более 60% электронно-компонентной базы (ЭКБ), используемой в бортовой аппаратуре российских космических аппаратов (КА), приобреталась у иностранных поставщиков, в первую очередь, у американских поставщиков, поскольку США в этой области – практически полный монополист: от них полностью зависят даже европейские спутникостроительные компании. Конечно, учитывая, что зависимость национальных космических программ от американских и европейских поставщиков ЭКБ стала проблемой национальной безопасности, работы по импортозамещению ЭКБ космического назначения ведутся не первый год. Санкции являются катализатором, который должен интенсифицировать этот процесс: то, что раньше планировалось сделать к 2020 году, нужно делать к 2017–2018 гг. [2]. Для полно-

го восполнения потребностей производства потребуется время. Некоторые варианты решения проблем ЭКБ подробно рассмотрены в одном из томов книги «Космическая электроника» [3] и одним из вариантов является создание специализированного микроэлектронного кластера для космических и оборонных приложений.

Изменения в правилах экспортного регулирования США, которые начали действовать с середины ноября 2014 г., немного упростили российским компаниям доступ к радиационно-стойким электронным компонентам космического назначения. О сути этих изменений рассказано в публикациях [4] и [5]. Но уже после внедрения новой системы регулирования экспорта США попытались заблокировать реализацию масштабного международного проекта по созданию орбитальной обсерватории «Спектр-УФ» (международное название проекта World Space Observatory – Ultraviolet): Госдепартамент США запретил поставлять в Россию радиационно-стойкие компоненты, используемые в приборах для регистрации излучения. То есть радиационно-стойкая ЭКБ превращается в элемент манипулирования, своеобразного шантажа. Поэтому вопрос о развитии собственного производства ЭКБ космического уровня качества стоит сейчас остро, а в качестве временной меры предлагается рассмотреть вариант импорта аттестованных радиационно-стойких электронных компонентов из Китая. Стратегия развития микроэлектроники в КНР, а также специфика развития космической отрасли КНР, подробно представлены в труде «Космическая элек-

троника» [3]. В частности отмечено, что в Китае удалось создать свою отрасль, не имеющую прямых зарубежных аналогов, но закрывающую по номенклатуре перспективные потребности как космической, так и военной техники. Китайский ОПК и ракетно-техническая промышленность уже используют для комплектования бортовых систем управления КА как изготовленные в Китае модифицированные клоны лучших американских аналогов, так и свои оригинальные ИМС.

Очевидно, в ближайшие два-четыре года избежать зависимости от поставок импортной ЭКБ не удастся (союз с Китаем – одно из решений проблемы).

В статье представлен обзор радиационно-стойких DC/DC-преобразователей для применения в системах электропитания КА с постоянным повышенным напряжением 100 В, которые производятся одним из институтов, входящим в структуру China Electronics Technology Group Corporation (CETC International). Необходимо отметить, что в настоящее время существует проблема обеспечения ракетно-космической промышленности современными отечественными радиационно-стойкими модулями питания для применения в системах электропитания перспективных КА с шиной промежуточного напряжения постоянного тока 100 В. Российские производители в настоящее время только ведут разработки радиационно-стойких модулей питания для работы от сети 100 В постоянного тока, создание которых сдерживается отсутствием высоковольтных эффективных радиационно-стойких MOSFET-транзисторов и другими проблемами.

Использование сетей постоянного тока повышенного напряжения на борту КА и специальных объектах позволяет значительно сократить массу и объем энергетического оборудования. Системы постоянного повышенного напряжения (отличные от 27 В) уже давно применяются на борту спутников США, Японии и Китая. Шина постоянного напряжения 42 В долгое время

Китайская корпорация электронной науки и технологии (CETC) создана в 2002 г. по решению Госсовета КНР на основе научно-исследовательских институтов и научно-технических предприятий, подчиняющихся непосредственно бывшему Министерству информационной промышленности Китая. С тех пор она является государственной корпорацией, специализирующейся на разработке электронного оборудования для ОПК и информационных технологий. В состав корпорации входят более 55 институтов и 6 компаний, акции которых котируются на бирже. Подразделения CETC расположены в 18 субъектах КНР. Штат корпорации составляет более 80 000 сотрудников, в том числе 11 академиков Академии технических наук и 487 технических специалистов государственного уровня. CETC располагает передовыми в Китае производственными линиями, испытательным оборудованием, линиями сборки и центрами разработки, сформирована целостная система научных исследований, разработки, производства и испытания, а также совершенная система гарантии качества. CETC International предлагает: интегральные микросхемы, полупроводниковые компоненты, оптоэлектронные компоненты, вакуумные электронные приборы, специальные электронные компоненты, электромеханические компоненты, корпуса для СВЧ и силовых устройств, оборудование для производства электроники, новых энергетических ресурсов и оборудования для обеспечения безопасности.

применялась в системах электроснабжения космических аппаратов КНР, а в настоящее время в системах электроснабжения китайских КА применяется также система постоянного напряжения 100 В. 43-й научно-исследовательский институт микроэлектронной техники, входящий в корпорацию CETC, разрабатывает и производит широкий ряд радиационно-стойких DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров для работы в системах электроснабжения КА с промежуточным напряжением 100 В. DC/DC-преобразователи изготавливаются с применением толстоплёночной гибридной технологии, которая позволяет уменьшить объём конструкции до величины, определяемой только рассеиваемой мощностью и условиями теплоотвода. Причём, практически все необходимые для производства силовых модулей материалы и металлические корпуса производятся непосредственно на предприятии. Освоено производство нитрид-алюминиевых (AlN) керамических подложек, предназначенных для гибридных интегральных схем высокой мощности, СВЧ-схем. Подложки характеризуются высокой теплопроводностью, коэффициент теплового расширения соответствует кремниевой микросхеме, обладают высокой механической прочностью и являются идеальной заменой бериллиевой керамики (BeO). Существенным недостатком оксида бериллия является значительное снижение величины теплопроводности с ростом температуры. В отличие от керамики из BeO, теплопроводность керамики на основе AlN при нагреве уменьшается незначительно. Кроме того, производство керамики из BeO чрезвычайно токсично, что требует разработки особых мер для безопасности работы персонала.

43-й научно-исследовательский институт микроэлектронной техники также является ведущим изготовите-

лем металлических корпусов для герметичной упаковки гибридных интегральных схем, полупроводниковых интегральных схем, волоконно-оптоэлектронных приборов, датчиков давления, твердотельных реле, СВЧ-схем, приёмников инфракрасного излучения, лазерных приборов и других устройств. Выпускаются плоские корпуса с рядным расположением штырьковых выводов, плоскодонные корпуса, корпуса с вертикальным расположением штырьковых выводов (каждый год производится более 500 000 корпусов). Основания корпусов, ободки и крышки выполняются из ковара (4J29), холоднокатаной стали, электролитической меди, медно-вольфрамового сплава, железо-никелевого сплава, AlSiC-сплава и других материалов. Необходимо заметить, что ковар (сплав 53% Fe, 29% Ni, 18% Co; имеет российское обозначение 29НК) специально был разработан для производства металлокерамических корпусов и характеризуется низким коэффициентом теплового расширения, близким к коэффициенту теплового расширения керамики, из которой изготавливаются металлокерамические корпуса.

Кристаллы микросхем поставляются китайскими производителями изделий микроэлектроники, а кристаллы радиационно-стойких силовых транзисторов MOSFET в настоящее время приобретаются за рубежом.

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии HD/100 предназначены для применения в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства и характеризуются устойчивостью к дозовым и одиночным эффектам: уровень дозовой стойкости составляет 100 крад (Si), уровень чувствительности к тяжёлым заряженным частицам (ТЗЧ) с линейными потерями энергии (ЛПЭ) – до 65 МэВ·см²/мг. Преобразователи с этими показателями радиационной стойкости могут эксплуатироваться в космических аппаратах с длительными сроками активного существования на геосинхронных орбитах. В таблице 1 приведены основные технические характеристики радиационно-стойких DC/DC-преобразователей серии HD/100 с выходными мощностями от 5 до 65 Вт, доступных в настоящее время для заказа и поставка которых в Россию возможна без оформления экспортной лицензии.

Для рационального сокращения компонентов, повышения рабочей частоты и уменьшения размеров силового трансформатора и выходного дросселя при создании модулей серии HD/100 применяется однотактная прямоходовая структура с регулированием методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой, резонансным размагничиванием магнитопровода сило-

Таблица 1. Гибридные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии HD/100 для сети постоянного тока 100 В

Серия	Выходная мощность, Вт	Входное напряжение, В	Выходные напряжения, В	Габариты (Д × Ш × В), мм	Масса, г
HD/100-xx-5/x	5	80...120	3,3; 5; 12; 15; ±5; ±12	37,33 × 28,94 × 8,90	32...38
HD/100-xx-15/x	15		3,3; 5; 12; 28; ±12; ±15	37,33 × 28,94 × 8,90, 54 × 29 × 10,66 (двухканальные модели)	32...38, 52...58 (двухканальные модели)
HD/100-xx-20/xx	20		3,3; 5; 12; ±12; ±15	73,33 × 28,50 × 10,16	52...58
HD/100-xx-30/xx	30		5; 12; ±5; ±12; 5/±12	76,7 × 38,60 × 10,66	75...85
HD/100-xx-65/xx	65		28	76,7 × 38,60 × 10,66	80±5

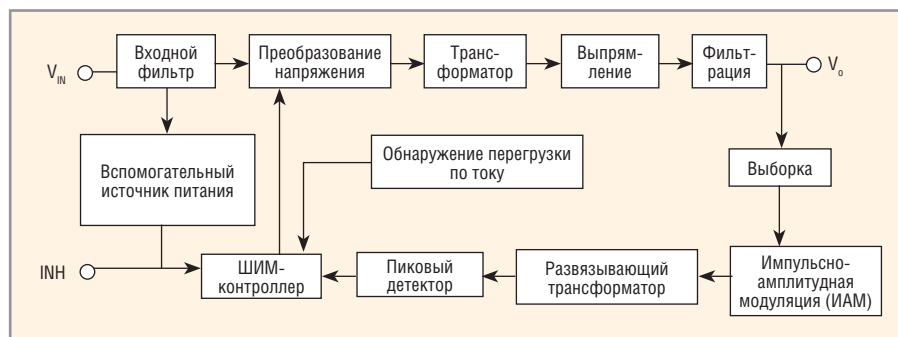


Рис. 1. Структурная схема одноканального DC/DC-преобразователя HD/CD/100-5R-15/SP

вого трансформатора и трансформаторной развязкой в контуре обратной связи. При этом обеспечивается высокая частота преобразования, минимизация компонентов и высокая надёжность. Трансформаторная развязка в петле обратной связи используется для обеспечения замкнутого контура управления и повышения уровня дозовой стойкости импульсного преобразователя. Улучшаются динамические характеристики и коэффициенты неустойчивости по току и напряжению. В однотактной структуре используется только один силовой ключ MOSFET, и эта топология является идеальной для построения радиационно-стойких DC/DC-преобразователей, так как, например, в двухтактных преобразователях напряжения мостового типа силовые транзисторы подключены непосредственно к полюсам источника первичного напряжения, и при открывании силовых транзисторов от радиационного излучения ток через них не ограничивается какими-либо внешними элементами. В однотактных преобразователях индуктивности рассеяния трансформатора, включённого в цепь стока силовых транзисторов, ток, возникающий при открывании транзистора при воздействии радиации, ограничивают. Функциональная структурная схема одноканального 15-ваттного пре-

образователя HD/CD/100-5R-15/SP приведена на рисунке 1.

Все компоненты, такие как интегральные микросхемы, транзисторы MOSFET, диоды Шоттки, резисторы и конденсаторы, соответствуют допустимым отклонениям от номинальных значений параметров согласно GJB/Z35 Derating Guideline for Devices and Components.

Для обеспечения отвода тепла в качестве несущей платы применяется подложка из Al₂O₃, установленная в стальной корпус. Силовой ключ, трансформатор и выходной дроссель соединены с подложкой из оксида алюминия Al₂O₃ с чистотой 96% (теплопроводность $\lambda = 24 \text{ Вт} / (\text{м} \times \text{К})$) с использованием теплопроводящих полимерных клёев для минимизации теплового сопротивления и улучшения способности рассеивания тепла. Таким образом может быть снижено повышение температуры, исключены точки перегрева, что, в конечном счёте, повышает надёжность устройства. Использование высокотеплопроводящих полимерных материалов с малыми значениями модуля упругости позволяет компенсировать разницу в коэффициентах теплового расширения и минимизировать термомеханические напряжения. Опытное моделирование, анализ тепловых снимков и рентгеновский

контроль внутренних компонентов проводятся при включённом устройстве для оптимизации тепловых параметров. Окончательный отчёт по тепловой проверке устройства предоставляется в комплекте сопроводительной документации.

Для обеспечения ЭМС на входе и выходе преобразователей установлены фильтрующие схемы. В электрических параметрах преобразователей чётко определены пульсации отражённого тока помех и напряжения, пульсации тока и пульсации выходного напряжения. На основе анализа соответствия спецификации, применением внешних помехоподавляющих фильтров, можно улучшить возможности системы в части симметричных и несимметричных помех, а также обеспечить защиту от резких скачков напряжения. О применении внешних фильтров более подробно будет рассказано далее.

Для защиты от воздействия водного раствора солей поверхности корпуса, выполненного из холоднокатаной стали, применяется покрытие золотом толщиной не менее 1 мкм. Выводы модулей покрыты золотом толщиной от 1,3 до 5,7 мкм.

На рисунке 2 приведены варианты конструктивного оформления 15-ваттного модуля HD/CD/100-5R-15/SP и 20-ваттного модуля HD/CD/100-5-20/SP с вертикальным расположением выводов для монтажа на печатную плату. 5-ваттные модули серии HD/CD/100-x-5/xx также выполняются в подобном конструктивном исполнении.

30- и 65-ваттные модули доступны в исполнении с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа (см. рис. 3).

Далее более подробно, в качестве примера, представлены характеристики 65-ваттных DC/DC-преобразователей HD/CD/100-xx-65/SP.

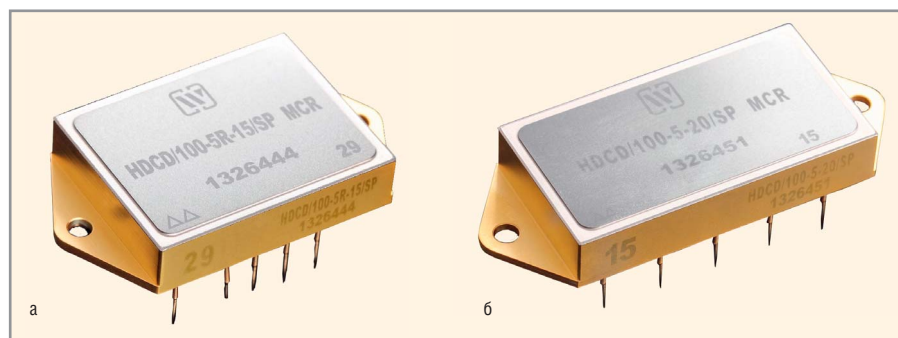


Рис. 2. Варианты конструктивного оформления: а – 15-ваттного преобразователя HD/CD/100-5R-15/SP с вертикальным расположением выводов для монтажа на печатную плату; б – 20-ваттного радиационно-стойкого модуля HD/CD/100-20/SP для монтажа в отверстия печатной платы



Рис. 3. Внешний вид 30-ваттного трёхканального радиационно-стойкого модуля HD/CD/100-512-30/T1 с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа

65-ВАТТНЫЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СЕРИИ HDCD/100-xx-65/xx

65-ваттные гибридные DC/DC-преобразователи серии HDCD/100-xx-65/xx выполнены в металлическом корпусе с горизонтальным расположением выводов для объёмного монтажа. Конструкция корпуса аналогична конструкции корпуса 30-ваттного преобразователя, представленного на рисунке 3.

Высокая надёжность гибридно-плёночных модулей достигается на стадии производства обеспечением герметичности корпуса, так как через щели в негерметичном корпусе может проникнуть влага и иные загрязнения, вызывающие коррозию и короткие замыкания. Герметизация осуществляется контактной шовной сваркой. Шов образуется в результате локального плавления соединяемых поверхностей крышки из ковара и ободка корпуса. Более подробно с технологией шовно-роликовой герметизации металлокерамических корпусов силовых интегральных и гибридных схем можно ознакомиться в работах [6] и [7].

Герметизация корпусов проводится в атмосфере сухой азотно-гелиевой смеси (пропорция 90/10%) под давлением 1 атм. Это обстоятельство необходимо учитывать при размещении преобразователей с большой площадью крышки в вакууме, так как при внутреннем давлении около 1 атм крышка преобразователя будет изгибаться. Поэтому необходимо предусмотреть дополнительное пространство для того, чтобы избежать механическое воздействие, оказываемое крышкой на другие компоненты. У преобразователей с большим объёмом корпуса отклонение крышки от нормального состояния может достигать 1 мм.

Основные характеристики DC/DC-преобразователей серии HDCD/100-28-65/SP:

- диапазон рабочих температур составляет $-55...+125^{\circ}\text{C}$;
- входные, выходные цепи и металлический корпус изолированы друг от друга;
- однотактная структура с трансформаторной развязкой в контуре обратной связи;
- фиксированная частота преобразования от 260 до 360 кГц (типичное значение 300 кГц);
- сервисные функции – защита от короткого замыкания, дистанционное включение/выключение, защи-

та от пониженного входного напряжения (60 ± 5 В);

- рассчитанное значение MTBF более 2×10^5 час (для условий орбитального полёта);
- уровень дозовой стойкости 100 крад (Si);
- стойкость к воздействию ТЗЧ с ЛПЭ до $65 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$.

Максимальные допустимые рабочие параметры (устройство не может работать при двух или более максимальных параметрах одновременно):

- диапазон входного напряжения от 0 до 140 В;
- выходная мощность 85 Вт;
- диапазон рабочих температур $-55...+125^{\circ}\text{C}$;
- диапазон температур хранения $-65...+150^{\circ}\text{C}$;
- температура вывода при пайке 300°C (в течение 10 с).

Рекомендованные рабочие условия:

- входное напряжение от 80 до 120 В (время установления напряжения на входе должно быть более 1 мс);
- выходная мощность от 13 до 65 Вт (оптимальное значение 20 Вт, рекомендованное значение выходной мощности от 20 до 100%);
- диапазон рабочих температур $-55...+125^{\circ}\text{C}$ (основание корпуса).

Электрические характеристики модуля преобразователя напряжения HDCD/100-28-65/SP приведены в таблице 2.

ОСНОВНЫЕ СЕРВИСНЫЕ ФУНКЦИИ

Для обеспечения специальных требований при работе модулей в составе комплексов радиоэлектронной аппаратуры и электронных приборов модули преобразователей напряжения серии HDCD/100 снабжены различными сервисными функциями и комплексом защит.

Функция дистанционного включения/выключения

Для формирования программного включения отдельных модулей в соответствии с необходимым алгоритмом применяется функция дистанционного включения/отключения. При низком уровне напряжения ($<0,2$ В) на входе INH модуль не формирует выходное напряжение. Модуль нормально функционирует и формирует выходное напряжение при высоком напряжении ($13...25$ В) на входе INH или при свободном выводе. При активном сигнале на входе INH входной ток модуля составляет менее 2 мА, а выходное напряжение – менее 0,5 В.

Модуль не формирует выходное напряжение, когда вывод INH соединён с землёй напрямую, или подключён к земле через внешний прп-транзистор (на базе высокий уровень) как показано на рисунке 4.

Эта функция может быть использована при формировании последовательности включения отдельных модулей в системе.

Защита от короткого замыкания

При закороченном выходе модуль переключается в защитное состояние (издавая звук). В этом состоянии выходное напряжение близко к 0 В, ток на силовой шине – около 120...250 мА, рассеиваемая в модуле тепловая мощность составляет от 12 до 25 Вт. Указанные параметры измерены в режиме короткого замыкания при нормальной температуре. При устранении причины короткого замыкания модуль переходит в нормальный режим работы, при котором обеспечивается стабилизация выходного напряжения.

Защита от пониженного напряжения на входе

При понижении входного напряжения ниже 60 ± 5 В модуль не формирует выходное напряжение. Блокировка работы модуля с гистерезисом при пониженном напряжении не допускает работу модуля, что позволяет сохранить ток системы плавным при первичном включении или в режимах перезапуска.

Стойкость к импульсному входному напряжению

Модули способны выдерживать импульсное напряжение 160 В длительностью 1 мс. Это рекомендуется учитывать при выборе источника высокого напряжения.

Схема защиты от пускового тока

На входе модулей установлен LC-фильтр. В момент включения на входе неизбежно возникает импульс тока, так как эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора мало (уровень мОм), поэтому рекомендуется добавить схему защиты от пускового тока или выбрать помехоподавляющий фильтр со схемой защиты от пускового тока. Схемы защиты от пускового тока показаны на рисунке 5.

Рекомендуется применять следующие компоненты: $R1 = 95 \text{ кОм}$, $R2 = 10 \text{ кОм}$, $R3 = 20 \text{ Ом}$, $C1 = 1 \text{ мкФ}$. Время заряда и разряда может управляться

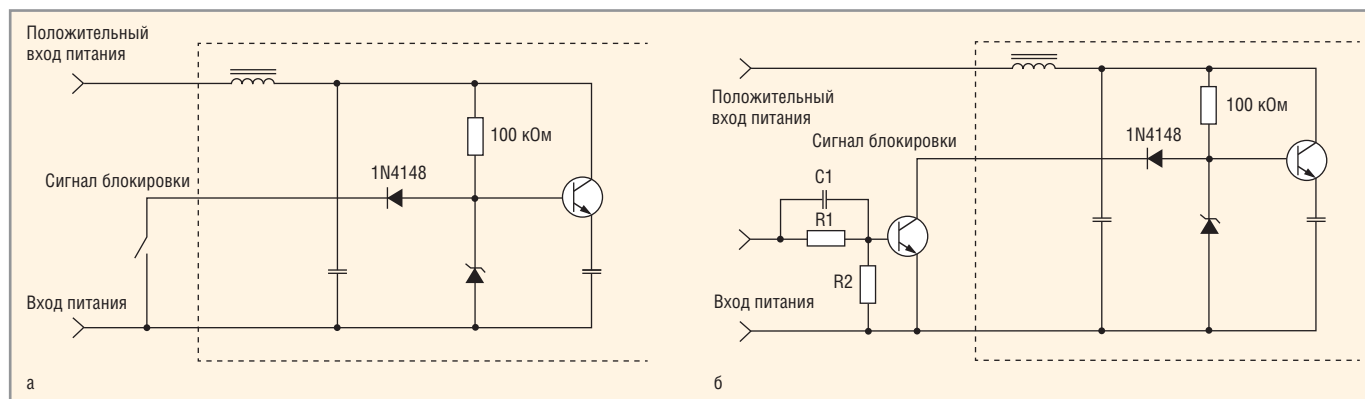


Рис. 4. Соединение вывода INH (блокировка) с землёй: а – напрямую; б – через внешний pnp-транзистор

Таблица 2. Электрические характеристики DC/DC-преобразователя HDCD/100-28-65/SP

Параметр	Условия (-55...+125°C, 100 В ±0,5 В, CL = 0)	Значение
Выходное напряжение	$I_o = 2,321 \text{ A}$	27,5...28,50 В
Выходной ток	$V_i = 80...120 \text{ В}$	2321 мА
Пulsация выходного напряжения (от пика до пика)	$BW = 20 \text{ МГц}$, $I_o = 2,321 \text{ A}$, $V_i = 80, 100, 120 \text{ В}$	150...200 мВ
Нестабильность по напряжению	$V_i = 80...120 \text{ В}$, $I_o = 2,321 \text{ A}$	1%
Нестабильность по току	$I_o = 0...2,321 \text{ A}$	1%
Входной ток	$I_{out} = 100\%$, вход управления подключён к земле $I_{out} = 0\%$, вход управления открыт	5 мА 50 мА
Пulsация входного отражённого тока помех (от пика до пика)	$BW = 20 \text{ МГц}$, $I_o = 2,321 \text{ A}$, соединён с внешним фильтром	80 мА
Пulsация входного отражённого напряжения (от пика до пика)	$BW = 20 \text{ МГц}$, $I_o = 2,321 \text{ A}$, соединён с внешним фильтром	500 мВ
Ёмкостная нагрузка (C_L) ^{1,2}	Не влияет на параметры	100 мкФ
Частота преобразования ²	$I_o = 2,321 \text{ A}$	260...360 кГц
КПД	$I_o = 2,321 \text{ A}$	80...83%
Рассеиваемая мощность при коротком замыкании нагрузки	Короткое замыкание нагрузки	25 Вт
Изоляция	Между входными и выходными или другими выводами и корпусом, за исключением вывода 3 (корпус); испытательное напряжение 500 В	100 МОм
Изменение выходного напряжения при изменении нагрузки (пиковое) ^{2,3}	От 50 до 100% нагрузки, от 100 до 50% нагрузки; от 10 до 50% номинальной нагрузки; от 50 до 10% номинальной нагрузки	-2240...2240 мВ
Время восстановления выходного напряжения при изменении нагрузки ^{2,3,4}	От 50 до 100% номинального значения, от 100 до 50% номинального значения; от 10 до 50% номинального значения; от 50 до 10% номинального значения	5 мс
Изменение выходного напряжения при изменении входного напряжения (пиковое) ^{2,5}	Входное напряжение: от 80 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 100 до 80 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 100 до 120 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 120 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$	-2800 мВ (мин.), 2800 мВ (макс.)
Время восстановления выходного напряжения при изменении входного напряжения ^{2,4,5}	Входное напряжение: от 80 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 100 до 80 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 100 до 120 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$ Входное напряжение: от 120 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$	5 мс
Выброс напряжения при включении (пиковое значение) ²	Входное напряжение: от 0 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$	1680 мВ
Задержка появления выходного напряжения при включении ⁶	Входное напряжение: от 0 до 100 В, $I_o = 2,321 \text{ A}$	100 мс
Восстановление выхода при коротком замыкании ^{2,4}	Ток нагрузки от короткого замыкания до 2,321 А	10 мс
Напряжение на входе дистанционного управления	-	15 В
Мощность, при которой включается защита	-	85 Вт

¹ Ёмкостная нагрузка может быть любой – от 0 до максимального предела, без влияния на параметры.

² Параметр гарантируется конструкцией и проверяется только при контроле или изменении в конструкции.

³ Время изменения нагрузки должно быть от 10 до 15 мкс.

⁴ Время восстановления от начала изменения до момента, когда выходное напряжение установится в постоянное значение в пределах 1%.

⁵ Время изменения входного напряжения должно быть более 50 мкс.

⁶ Задержка установления выходного напряжения после включения может быть вычислена от начала включения преобразователя или отключения входа дистанционного управления от земли.

изменением значения ёмкости конденсатора C1. Блокирующее напряжение транзистора MOSFET с каналом p- или n-типа должно быть более 200 В. Рекомендуется обеспечить время нарастания входного напряжения более 1 мс. Конкретное значение ёмкости C1 должно быть установлено в соответствии с фактическим применением системы.

Конструкция дополнительного выходного фильтра

Внутри модуля на выходе используется LC-фильтр. В том случае, когда пульсации выходного напряжения не соответствуют требованиям системы, фильтр на выходе DC/DC-преобразователя, для того чтобы уменьшить пульсации, может быть дорабо-

тан. Рекомендуемые схемы фильтров показаны на рисунках 6 и 7.

Рекомендуемая методика расчёта LC-фильтра, удовлетворяющего заданным статическим и динамическим характеристикам, приведена в работе [8]. Одним из способов расчёта фильтра на выходе преобразователя является проектирование и симуляция фильтра с помощью кривой, получен-

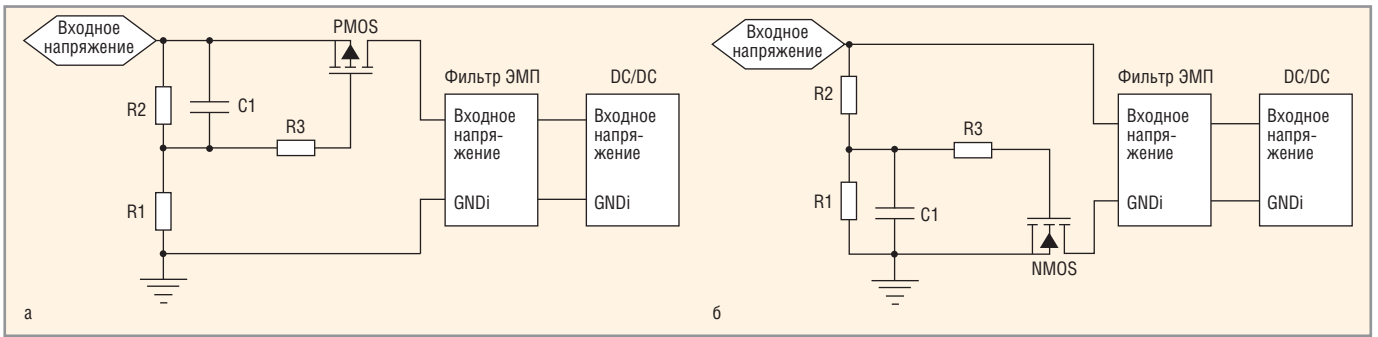


Рис. 5. Схемы защиты от пускового тока: а – вариант с ограничивающим MOSFET с каналом р-типа; б – вариант схемы с транзистором MOSFET с каналом п-типа

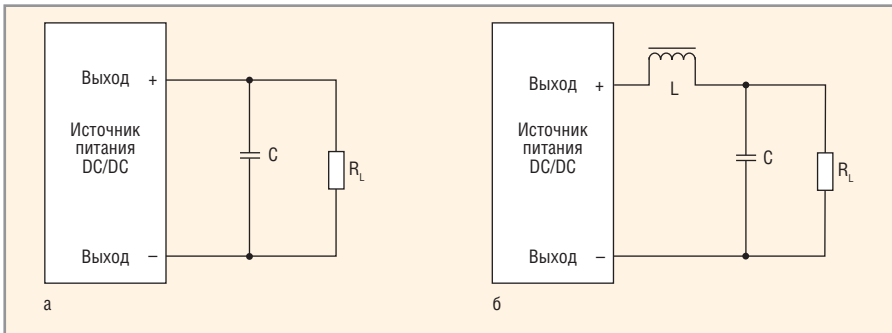


Рис. 6. Рекомендуемые схемы внешних фильтров для уменьшения пульсаций выходного напряжения: а – подключение внешнего конденсатора; б – подключение дополнительного LC-фильтра

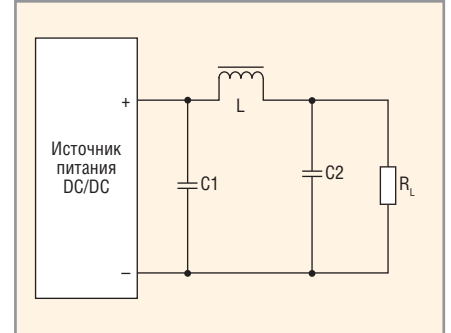


Рис. 7. Применение П-образного внешнего фильтра для уменьшения пульсаций напряжения

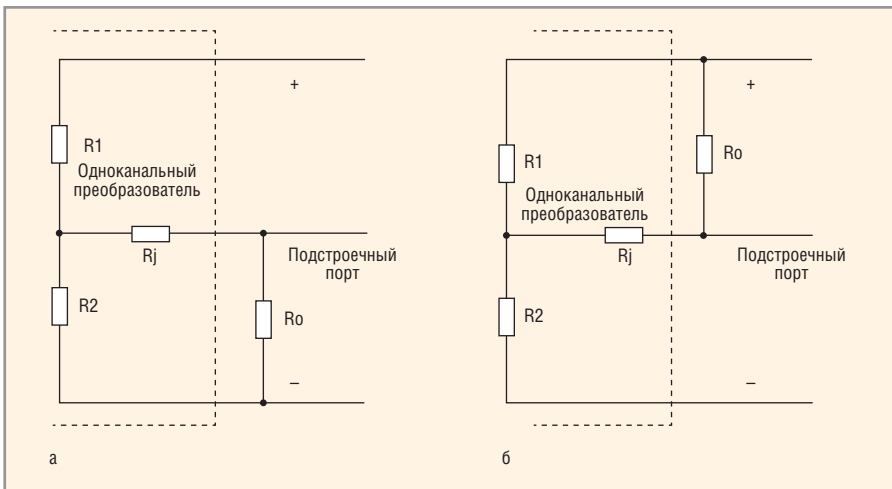


Рис. 8. Регулировка выходного напряжения одноканального преобразователя: а – повышение выходного напряжения; б – понижение выходного напряжения

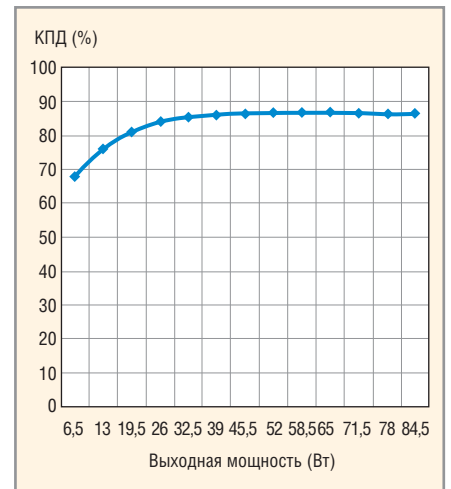


Рис. 9. Зависимость КПД от выходной мощности для преобразователя HDCCD/100-28-65/SP

ной в результате измерения характеристик элементов фильтра. Применение симулятора позволяет оптимизировать решение, сократить время разработки и стоимость конечного изделия. Кроме того, моделирование позволяет лучше понять, как работает помехоподавляющий фильтр [9].

Конденсатор должен быть установлен как можно ближе, на стороне нагрузки. Ёмкость внешнего конденсатора должна быть меньше, чем максимальное значение ёмкостной нагрузки преобразователя. Индуктивность дросселя должна быть выбрана соответствующим образом.

Регулировка выходного напряжения

Показанные на рисунке 8 резисторы R1, R2, Rj являются внутренними элементами одноканального преобразователя. Ro – внешний резистор, точно устанавливающий выходное напряжение DC/DC-преобразователя. Для регулировки выходного напряжения во время настройки используется потенциометр, который впоследствии заменяется прецизионным резистором мощностью не менее 0,1 Вт.

Рекомендуемые номинальные значения резисторов для повышения и пони-

жения выходного напряжения приведены в справочных листках.

Зависимость КПД от выходной мощности представлена на рисунке 9. Значение КПД практически не изменяется при максимальной нагрузке, то есть потери мощности в компонентах модуля при максимальной мощности минимальны. При пониженной рабочей мощности модуля потери переключения MOSFET становятся более значительными – при минимальных мощностях доминируют потери на переключение. В качестве ключей используются вертикальные полевые

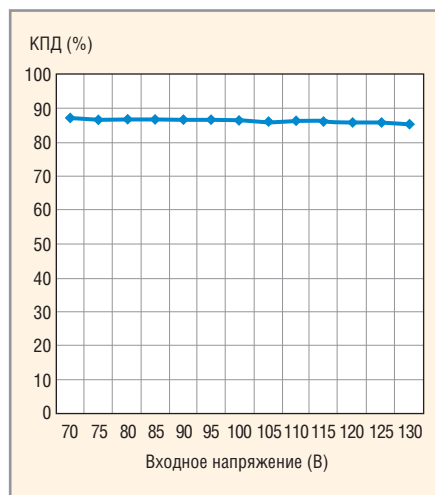


Рис. 10. Зависимость КПД от значения входного напряжения

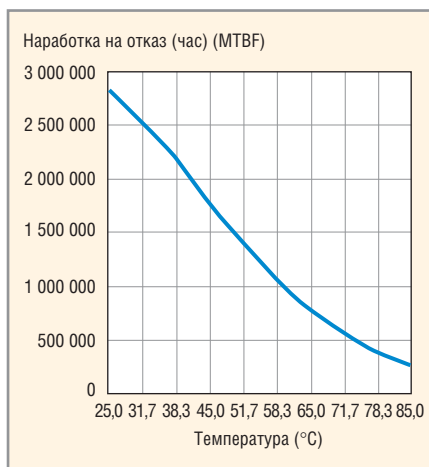


Рис. 11. Зависимость наработки на отказ от температуры корпуса преобразователя HDCD/100-28-65/SP

Таблица 3. Тепловой импеданс модуля HDCD/100-28-65/SP

Модель	Тепловой импеданс, °C/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCD/100-28-65/SP	2,4	300 × 200 × 2	11,47	Медь

транзисторы с двойной диффузией (Vertical Double Diffused MOSFET) или VDMOSFET. Выводы затвора и истока располагаются на поверхности кристалла, а вывод стока – на его нижней стороне. При этом ток нагрузки проходит вертикально по кристаллу.

На рисунке 10 представлена зависимость КПД от значения входного напряжения. КПД практически не зависит от входного напряжения.

На рисунке 11 показана зависимость значения среднего времени наработки на отказ (MTBF), рассчитанного для условий орбитального полёта, от температуры. Надёжность большинства электронных компонентов в значительной степени зависит от температуры. Среднее время наработки на отказ уменьшается вдвое при увеличении рабочей температуры на каждые 10°C. Повышение средней температуры на +25°C снижает надёжность электронного компонента примерно в 5 раз. Поэтому важно обеспечить эффективный отвод тепла от поверхности модуля питания и минимизировать перегрев. Основные концепции надёжности источников питания рассмотрены в работе [10], в которой приводятся примеры корректного использования информации о надёжности источников питания.

Металлический корпус изготовлен из холоднокатаной стали, которая имеет высокое значение теплопроводности. В таблице 3 приведён тепловой импеданс модуля.

Для поддержания температуры корпуса ниже +125°C должен использоваться теплоотвод. При разработке конструкции источника питания обеспечению теплового режима модулей питания в конкретных условиях эксплуатации необходимо уделять особое внимание. Подробно тепловые расчёты источников электропитания рассмотрены в различных публикациях, например, [11, 12]. В статье [11] подробно описаны методы обеспечения тепловых режимов гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей. Выбрать наиболее эффективный способ отвода тепла от модуля питания в конкретных условиях эксплуатации, минимизировать перегрев и габариты устройств охлаждения – задачи теплового конструирования.

Необходимо отметить, что в качестве теплостока для обеспечения кондуктивного теплоотвода может быть использован специальный радиатор, а также массивные металлические элементы конструкции (шасси или корпус). Из материалов, применяемых для изготовления радиаторов, наиболее высокими значениями теплоёмкости на единицу объёма обладают сталь, медь, латунь и никель. Однако на практике алюминиевые радиаторы предпочтительней с точки зрения соотношения эффективности теплоотдачи на единицу объёма. Для наилучшей передачи тепла от основания к радиатору необходимо использовать специальные теплопроводящие пасты

и прокладки, сглаживающие естественные неровности поверхности. В аппаратуре авиационно-космического оборудования нельзя применять кремнийсодержащие материалы. Поэтому рекомендуется применять теплопроводящие прокладки на основе стекловолокна или диэлектрической плёнки. Можно рекомендовать применять керамико-полимерные теплопроводящие диэлектрические листовые материалы российского производства Номакон™, которые не выделяют вредные вещества при вакуумно-тепловом воздействии и не содержат летучих конденсирующих веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочемасов В., Строганова Е. Электронные компоненты иностранного производства. Ограничение экспорта в Россию. Электроника: НТБ. 2013. №1.
2. Борисов Ю.И. Ёмкий Государственный оборонный заказ – это шанс для промышленности России. Электроника: НТБ. 2015. №1.
3. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. Книга 2. М. Техносфера. 2015.
4. Кэмпбелл М. Экспорт DC/DC-преобразователей из США обеспечит рост космической отрасли России. Электронные компоненты. 2014. №10.
5. Жданкин В.К. Радиационно-стойкие безлицензионные DC/DC-преобразователи International Rectifier. Компоненты и технологии. 2015. №4.
6. Турцевич А., Ланин В., Керенцев А. Особенности корпусирования герметичных интегральных схем. Силовая электроника. 2015. №4.
7. Иванов А., Кононыхин Д. Знакомство с технологией шовно-роликковой герметизации. Силовая электроника. 2011. №2.
8. Царенко В.А. Расчёт выходного фильтра импульсного источника питания. Практическая силовая электроника. 2002. №8.
9. Хофер Т. Практическая разработка и оптимизация фильтров ЭМС. Электронные компоненты. 2014. №6.
10. Лукин А.В. Надёжность источников вторичного электропитания. Практическая силовая электроника. 2001. №3.
11. Жданкин В.К. Обеспечение тепловых режимов гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей. Компоненты и технологии. 2016. №7.
12. Борисов В.Ф., Лавренков О.П., Назаров А.С., Чекмарёв А.Н. под ред. Назарова А.С. Конструирование радиоэлектронных средств. М. Изд-во МАИ. 1996.

POWER ELECTRONICS



ufi
Approved
Event

13-я Международная выставка компонентов
и систем силовой электроники

25–27 октября 2016
Москва, Крокус Экспо



Реклама

Организаторы:



primexpo



ITE

+7 (812) 380 6003 / 07 / 00
power@primexpo.ru

Получите электронный билет:
powerelectronics.ru

