

Радиационно стойкие модули DC/DC-преобразователей напряжения для систем электроснабжения с постоянным напряжением

В статье рассмотрены основные технические и эксплуатационные характеристики радиационно стойких модулей DC/DC-преобразователей, производимых китайской компанией, входящей в Китайскую корпорацию электронных технологий (China Electronics Technology Group Corporation — CETC) и предназначенных для работы в бортовой аппаратуре космической техники с шинами электропитания с номинальными напряжениями 28 и 42 В, а также модули типа POL (Point-of-Load) для размещения в непосредственной близости от нагрузки для систем распределенного электропитания низковольтных нагрузок. При разработке этих модулей особое внимание уделялось обеспечению радиационной стойкости и электромагнитной совместимости.

Виктор БЕЗРОДНЫЙ

Введение

Уменьшить массогабаритные показатели космических аппаратов и обеспечить более высокую эффективность использования электрической энергии позволяет переход на современные транзисторы, выполненные на широкозонных полупроводниках, поскольку они способны работать на очень высоких частотах и скоростях переключения при преобразовании энергии. Наиболее перспективным полупроводниковым материалом с широкой запрещенной зоной для создания таких транзисторов является нитрид галлия (GaN). Устройства на основе нитрида галлия демонстрируют высокую надежность в энергетических системах телекоммуникационных спутников и Международной космической станции (МКС). Компоненты eGaN отлично зарекомендовали себя в качестве эффективной замены устойчивых к космическому излучению МОП-транзисторов. Но широкое распространение eGaN-транзисторов в системах электрооборудования КА сдерживает высокая стоимость и пониженная стойкость к одиночным эффектам, возникающим при воздействии тяжелых ионов [1, 2]. Европейское космическое агентство (European Space Agency, ESA) и NASA (Национальное управление США по аэронавтике и исследованию космического пространства) инвестируют значительные средства в технологию нитрида галлия. Главная цель этих программ — создание

высокопроизводительных силовых переключающих транзисторов, выполненных по технологии eGaN, допускающих работу в космическом пространстве [1].

Но сегодня в системах электрооборудования космических аппаратов, требующих длительных сроков активного существования (САС) при воздействии заряженных частиц, вызывающих одиночные сбои, применяются радиационно стойкие кремниевые МОП-транзисторы (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET), технология которых хорошо отработана за многие годы, и предлагаются модели с высокой устойчивостью к воздействию тяжелых заряженных частиц и высокоэнергетических протонов космического пространства. Мощные МОП-транзисторы используются в качестве ключевых элементов в современных модулях импульсных стабилизаторов напряжения, полевые транзисторы также заменяют прямые и возвратные диоды Шоттки в схемах однотактных прямоходовых преобразователей напряжения с синхронными выпрямителями для повышения КПД.

Российские компании, создающие аппаратуру для изделий специального назначения, в том числе космических аппаратов с длительными сроками активного существования в условиях воздействия полей ионизирующих излучений космического пространства, применяют радиационно стойкие модули DC/DC-преобразователей зарубежного производства,

в основном компаний, расположенных в США и лидирующих на рынке. В 2016 году было импортировано этой продукции на сумму около \$50 млн. Обострение геополитической обстановки в 2014 году и введение США санкций против РФ ограничили поставки импортной электронной компонентной базы и оборудования для выпуска продукции специального назначения. Наиболее чувствительна зависимость российских производителей от импортной ЭКБ в ракетно-космической, авиационной и других отраслях оборонной промышленности. Использование же менее качественной компонентной базы приводит к снижению надежности электронных систем, что отрицательно сказывается на сроках службы и надежности всего спектра российской высокотехнологичной продукции [3].

В качестве временной меры предлагается рассмотреть вариант импорта радиационно стойких электронных компонентов из Китая. В настоящее время в китайской аппаратуре космической техники используется на 90% собственная электронная компонентная база, что подтверждает высокий уровень качества китайских компонентов. Кроме того, хорошо известно об успешных китайских космических проектах.

Предприятия КНР освоили все виды микроэлектронных изделий, в том числе и в радиационно стойком исполнении. В настоящее время китайские компании предлагают одну из самых производительных высоконад-

ежных ПЛИС в мире, радиационно стойкие микропроцессоры, память PROM, память SRAM, память FPGA PROM, память 3-D MRAM, ЦАП, АЦП, интерфейсные микросхемы, ВЧ/СВЧ-компоненты и изделия, модули и микросхемы питания. Производственные возможности китайской микроэлектронной промышленности представлены в [4], обзор китайской радиационно стойкой электронной компонентной базы, которая применяется в собственных космических программах Китая, сделан в статье [5].

Уже в 2015 году ряд предприятий отечественной радиоэлектронной промышленности, специализирующихся на разработке и производстве функциональных устройств в модульном исполнении для построения систем электропитания бортовой аппаратуры космических аппаратов — источников электропитания, помехоподавляющих фильтров, фильтров-ограничителей, — представил свои изделия для применения в авиационно-космической промышленности для замены зарубежных изделий в космической бортовой аппаратуре. Они характеризуются высокой радиационной стойкостью, а некоторые линейки продукции полностью взаимозаменяемы с преобразователями напряжения известных американских фирм. Массовый выпуск этой продукции сдерживается определенными сложностями в изготовлении интегральных схем для производства высоконадежных источников питания. Не предлагаются также радиационно стойкие преобразователи напряжения типа POL с выходными токами 10 А и более для обеспечения питанием современных сигнальных процессоров, ПЛИС и систем памяти, отличающихся динамическим потреблением тока.

В статье рассматриваются основные технические и эксплуатационные характеристики радиационно стойких модулей DC/DC-преобразователей, выполненных по гибридно-пленочной технологии и предназначенных для работы в бортовой аппаратуре космической техники с шинами электропитания с номинальными напряжениями 28 и 42 В, а также модулей типа POL (Point-of-Load) для размещения в непосредственной близости от нагрузки для систем распределенного электропитания низковольтных нагрузок. Обзор радиационно стойких гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей для применения в аппаратуре ракетно-космической техники с постоянным напряжением 100 (120) В этого же предприятия был сделан в статье [6, 7].

Общие характеристики гибридно-пленочных радиационно стойких DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50):

- диапазон рабочей температуры: $-55...+125$ °C;
- диапазон входного напряжения: 20–50 В, номинальные напряжения: 28 и 42 В;
- входные, выходные цепи и корпус изолированы друг от друга;

Таблица 1. Перечень проверок и испытательных процедур, проводимых при производстве гибридно-пленочных преобразователей напряжения серии HDCD/(20-50) категории качества Class K согласно стандарту GJB5488-2005

№ п/п	Выполняемая процедура	Метод	Условия	Требования
1	Стабилизационная печь	1008	+125 °C, по меньшей мере, 168 ч/+150 °C	100%
2	Проверка перед термоциклированием	1030	$T_c = +125$ °C, 240 ч	100%
3	Визуальный внутренний контроль	2017	класс K	100%
4	Термоциклы	1010	Условие C, 10 циклов	100%
5	Центрифуга (постоянное ускорение)	2001	Ось Y ₁ , 19 600 м/с ²	100%
6	Контроль свободно перемещающихся частиц внутри корпуса по уровню шума, PIND-тест (Particle Impact Noise Detection Test)	2020	Условие A	100%
7	Испытание перед электротермотренировкой	—	—	100%
8	Электротермотренировка	1015	$T_c = +125$ °C, 240 ч	100%
9	Проверка после электротермотренировки	—	—	100%
10	Вычисление изменений и интенсивности отказов	—	—	100%
11	Физический разрушающий анализ (PDA)	—	—	8% или 1 модуль (выбирается наибольший результат)
12	Постоянство трех температурных параметров в одной и той же партии	—	Выходное напряжение, КПД, входной ток (без нагрузки)	±3%, предоставляет параметры для справки, а не в качестве критерия
13	Герметичность	1014	Определение малых течей: A1 Определение больших течей: C1	100%
14	Рентгеновский контроль	2012	—	100%
15	Визуальный внешний контроль	2009	—	100%

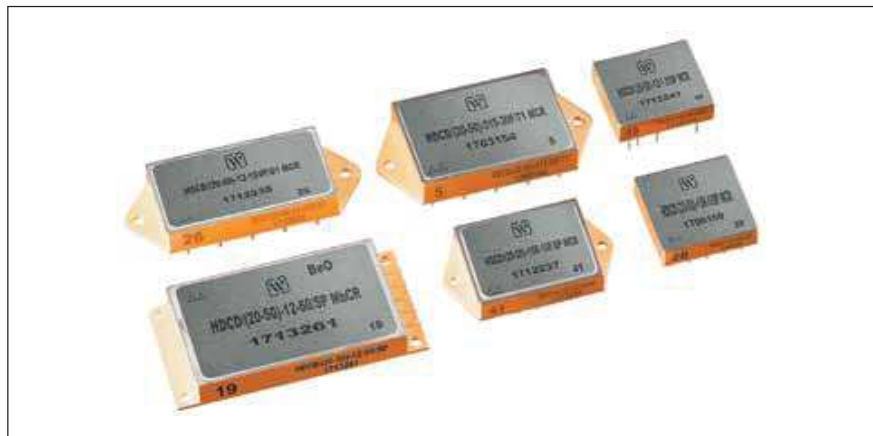


Рис. 1. Внешние виды радиационно стойких модулей DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50)

- электрическая прочность изоляции: 1000 В;
 - фиксированная рабочая частота преобразования: от 350 до 500 кГц, типовое значение: 400 кГц;
 - высокое значение среднего времени наработки до отказа — MTBF (Mean Time Between Failure): от 2×10^5 до $3,3 \times 10^6$ ч (зависит от модели), рассчитанное для условий применения на орбитальном участке полета;
 - набор необходимых сервисных функций для обеспечения работы в аппаратуре;
 - уровень ионизационной дозовой стойкости: 100 крад;
 - уровень чувствительности к одиночным ядерным частицам с ЛПЭ: 75 МэВ·см²/мг.
- Применения — аппаратура спутников для геостационарных орбит, автоматические научно-исследовательские станции дальнего космоса и коммуникационные космические системы.

Отбраковка потенциально ненадежных изделий в процессе производства за счет дополнительных испытаний позволяет значительно повысить надежность изделий. Кристаллы микросхем и пассивные компо-

ненты также проверяются и испытываются для оценки качества. Все чувствительные к воздействию радиации элементы тестируются на воздействие радиации. В таблице 1 приведен состав и последовательность испытаний с целью выявления потенциально ненадежных собранных изделий.

Доступны модули с вертикальным расположением выводов для монтажа на печатную плату с крепежными фланцами для дополнительного крепления либо без фланцев. Модули в исполнении с горизонтальным расположением выводов предназначены для объемного монтажа. На рис. 1 показаны внешние виды гибридно-пленочных модулей преобразователей серии HDCD/(20-50) в различных конструктивных исполнениях с выходными мощностями от 1,5 до 65 Вт.

Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи с выходной мощностью 1,5 Вт

Преобразователи напряжения этого ряда реализованы по обратноходовой топологии с трансформаторной развязкой в контуре об-

Таблица 2. Номенклатура и общие характеристики 1,5-Вт DC/DC-преобразователей напряжения серии HDCD/(20-50)

Модель	Выходная мощность, Вт	Выходное напряжение, В	КПД, % при полной нагрузке	Габаритные размеры, мм
HDCD/(20-50)-5-1.5/SP	1,5	5	28 В: 65 42 В: 62	25,14×20,66×6,86
HDCD/(20-50)-12-1.5/SP	1,5	12	28 В: 65 42 В: 62	25,14×20,66×6,86
HDCD/(20-50)-5-1.5/D1	1,5	±5	28 В: 65 42 В: 62	27,6×27,6×6,86
HDCD/(20-50)-12-1.5/D1	1,5	±12	28 В: 65 42 В: 63	27,6×27,6×6,86

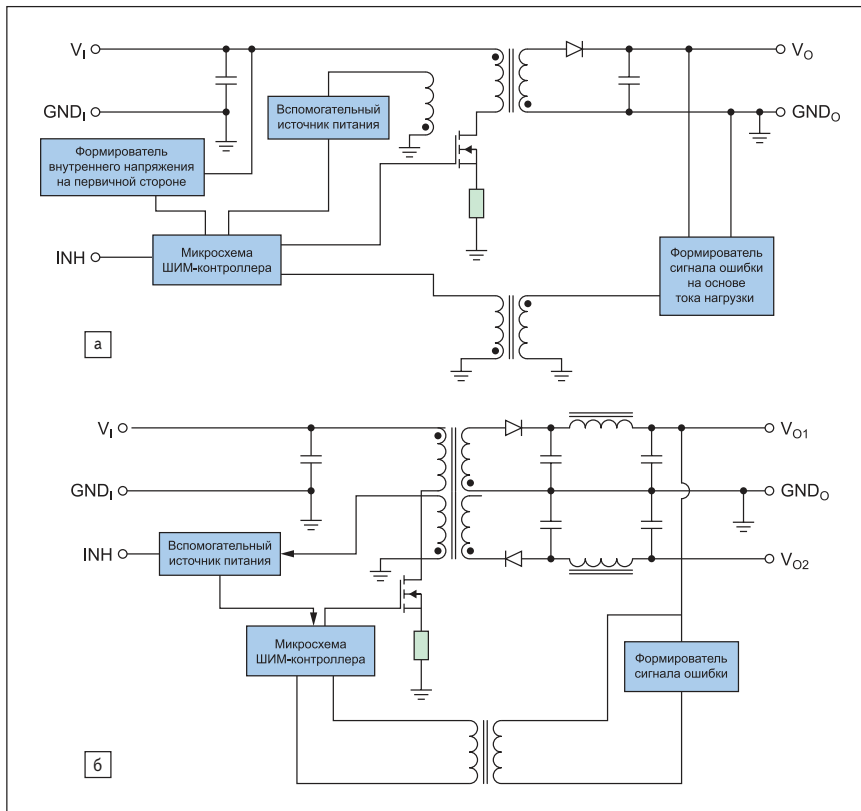


Рис. 2. Структурные схемы 1,5-Вт DC/DC-преобразователей:

а) структурная схема одноканального преобразователя; б) структурная схема двухканального преобразователя

ратной связи. В модулях преобразователей, выполненных по этой топологии, применяется только один индуктивный элемент — силовой трансформатор, минимальное количество силовых полупроводниковых элементов — один транзистор и один диод Шоттки. Модули поставляются в корпусах для монтажа в отверстия печатной платы. Номенклатура и общие характеристики 1,5-Вт DC/DC-преобразователей представлены в таблице 2.

Весьма упрощенные структурные схемы одно- и двухканальных 1,5-Вт преобразователей напряжения показаны на рис. 2.

Микросхема ШИМ-контроллера является критическим элементом, обуславливающим проявление одиночных переходных процессов в импульсном преобразователе напряжения при воздействии протонов и ионов, ШИМ-устройство также считается одним из наиболее чувствительных узлов импульс-

ных стабилизаторов напряжения к дозовым отказам [8]. Узел широтно-импульсной модуляции выполняет основную роль в преобразователях напряжения — формирует сигнал управления ключевым элементом. Именно с помощью этого узла достигаются все преимущества импульсных стабилизаторов.

Специализированная микросхема ШИМ-контроллера позволяет организовать дополнительную обратную связь по току дросселя (ДОСТД).

Внутренний контур регулирования используется для прямого регулирования амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки, а основной контур служит для стабилизации выходного напряжения. Применение ДОСТД позволяет улучшить различные характеристики преобразователя: упрощается частотная коррекция контура обратной связи и уменьшается время реакции контура как при малых, так и при больших изменениях тока нагрузки.

Применение кристаллов микросхем ШИМ-контроллеров предусматривает сокращение количества компонентов и уменьшение размеров площади преобразователя.

Для повышения общей радиационной стойкости преобразователей напряжения в этой и других моделях рассматриваемой серии HDCD/(20-50) применяются радиационно стойкие микросхемы ШИМ-контроллеров, выполненных по биполярной технологии. В качестве ключевого элемента используется специально отобранный МОП-транзистор, который также является одним из наиболее чувствительных к воздействию ионизирующего излучения космического пространства элементом. Для повышения надежности применяется также дублирование транзистора. Китайские специалисты не раскрывают деталей реализации данного узла преобразователей напряжения.

Слишком упрощенная структурная схема не отражает схемотехнические решения для реализации узла формирования внутреннего напряжения питания для обеспечения работы схемы управления (ШИМ-контроллера) и усилителя сигнала ошибки. Как видно из представленной схемы, сначала схема формирования внутреннего напряжения работает от входного напряжения, затем, после начала работы схемы управления, включается схема подхвата, действующая от пониженного напряжения, снимаемого с дополнительной вторичной обмотки силового трансформатора. Работа схемы управления от более низкого напряжения позволяет повысить КПД. Варианты реализации схемы построения узла формирования внутреннего напряжения для преобразователей напряжения, обладающих радиационной стойкостью, представлены в [9].

Модули снабжены командным входом дистанционного включения/выключения (inhibit function). При низком напряжении (<1,5 В) на этом входе преобразователь выключается, преобразователь нормально работает при высоком напряжении на этом входе (13–25 В) или когда вывод командного входа находится в свободном состоянии. В отключенном режиме входной ток не превышает 5 мА, а напряжение на выходе менее чем 0,5 В. Схема подключения командного входа дистанционного включения/выключения представлена на рис. 3.

Преобразователь напряжения не формирует выходное напряжение, когда командный вход заземлен без промежуточных каскадов или соединен через биполярный *NPN*-транзистор (на базе транзистора установлен высокий уровень), как показано на рис. 3. Когда вход находится в свободном состоянии, напряжение на этом входе составляет 8,5–13 В. Значения резисторов и емкостей могут быть соответственно уточнены. Вывод дистанционного включения/выключения может быть оставлен в свободном состоянии, когда он не используется.

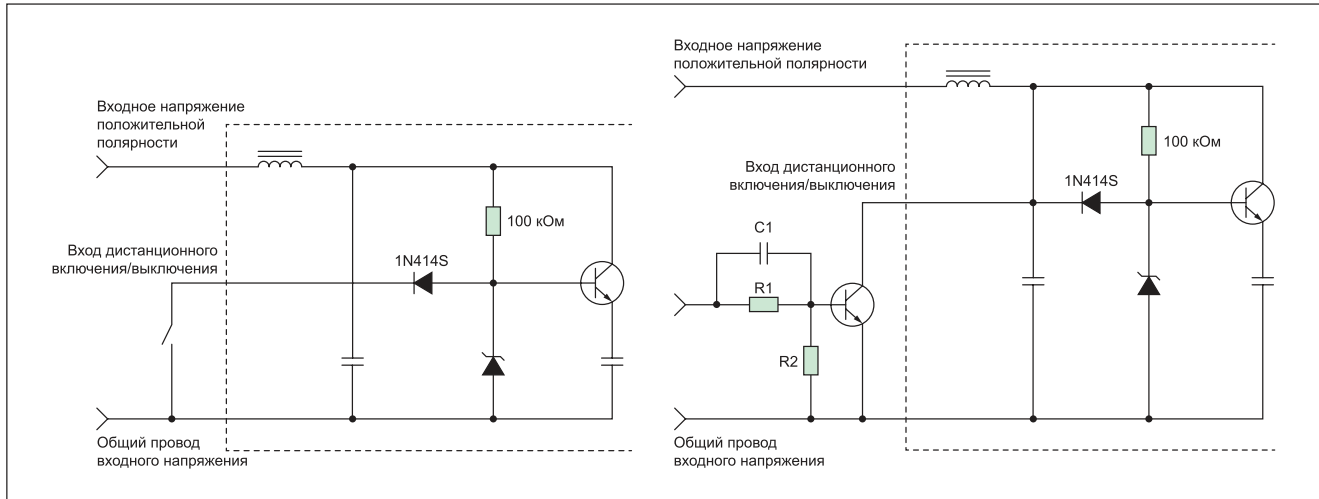


Рис. 3. Схема подключения входа дистанционного включения/выключения

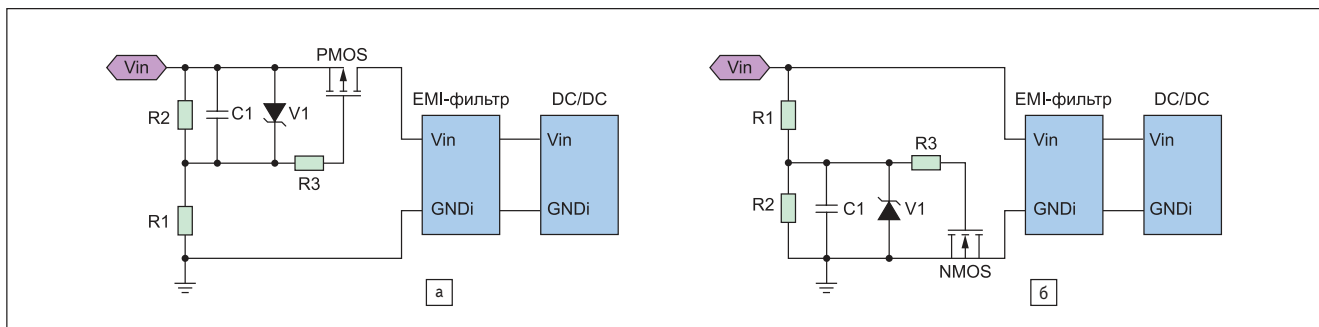


Рис. 4. Схемы ограничения пускового тока с *p*-канальным и *n*-канальным транзистором:
а) схема ограничения тока с *p*-канальным транзистором; б) схема ограничения пускового тока с *n*-канальным транзистором

Защита от короткого замыкания позволяет защитить полупроводниковые и иные элементы схемы преобразователя от чрезмерной токовой нагрузки. При коротком замыкании нагрузки преобразователь переключается в защитный режим (при этом издается резкий звук). Выходное напряжение падает до 0 В, при коротком замыкании внутренняя мощность рассеивания находится в диапазоне 0,8–2 Вт.

При снижении входного напряжения ниже (14 ± 2) В на выходе преобразователя напряжение не формируется. Функция защиты от пониженного входного напряжения позволяет защитить аккумуляторные батареи от разряда. Преобразователи напряжения способны выдерживать импульсы напряжения с амплитудой 80 В и длительностью 1 мс.

Решение проблемы пускового тока

На входе преобразователя напряжения применяется LC-фильтр (на структурной схеме не показан). При включении преобразователя напряжения неизбежно возникает значительный пусковой ток, обусловленный, главным образом, зарядом входных конденсаторов с небольшими значениями эквивалентного последовательного сопротивления

(ESR), подключенных на входе шины питания. Поэтому на входе рекомендуется добавить активную схему ограничения пускового тока или применять внешний фильтр электромагнитных помех с встроенной схемой плавного запуска. На рис. 4 показаны схемы ограничения пускового тока.

Рекомендуется использовать следующие компоненты: $R1 = 36 \text{ кОм}$, $R2 = 20 \text{ кОм}$, $R3 = 20 \text{ Ом}$, $C1 = 1 \text{ мкФ}$. Время заряда и разряда может регулироваться изменением значения емкости конденсатора $C1$. Пробивное напряжение для *p*- и *n*-канальных МОП-транзисторов должно превышать 100 В. Рабочий ток должен быть выбран с учетом мощности рассеивания. Рекомендуется, чтобы время установления входного напряжения шины было больше 1 мс. Точное значение емкости конденсатора $C1$ должно быть выбрано с учетом реального системного применения. При включении питания транзистор выключен и ток протекает через канал выключенного транзистора. Конденсатор $C1$ медленно заряжается через резистор $R1$. Когда напряжение превышает пороговое на затворе МОП-транзистора, входной ток течет через открытый транзистор. Резистор $R2$ ограничивает напряжение на затворе на безопасном

уровне, образуя резистивный делитель с $R2$, и разряжает конденсатор $C1$ для обеспечения работы схемы ограничения тока при повторном включении. Применение схем ограничения пускового тока осуществляет защиту от включения в обратной полярности.

Для ограничения пускового тока также возможно использовать командный вход дистанционного включения/выключения, особенно когда в системе используется медленно повышающееся напряжение. Преобразователь удерживается в выключенном состоянии до тех пор, пока входное напряжение не повысится и не установится в стабильное состояние. Многочисленные преобразователи напряжения, находящиеся в выключенном состоянии на одной и той же линии, могут также использовать функцию дистанционного включения/выключения благодаря разнесению времени включения отдельных преобразователей, так что пусковой ток распределяется во времени, а не протекает одновременно. Применение функции дистанционного включения/выключения, таким образом, снижает вероятность появления проблемы с входным импедансом, возникающей при подаче входного напряжения [10].

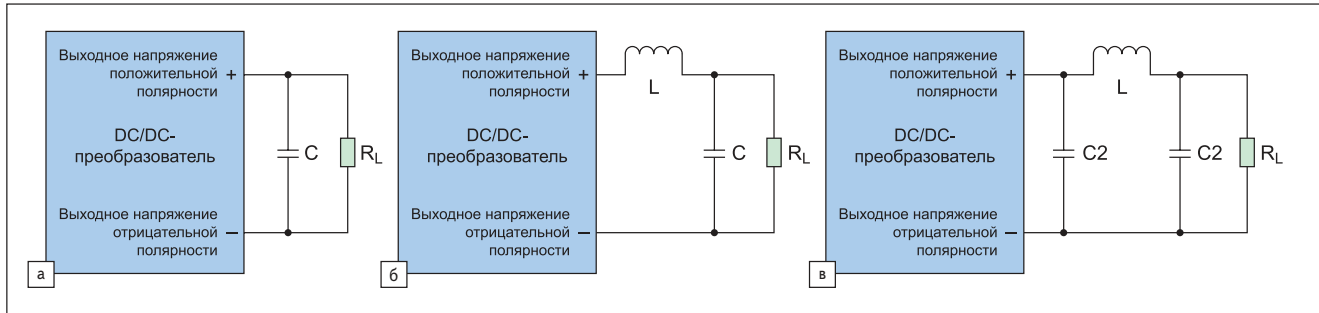


Рис. 5. Схемы фильтров электромагнитных помех для установки на выходе преобразователей напряжения: а) с дополнительным конденсатором; б) дополнительный LC-фильтр; в) LC-фильтр П-образный

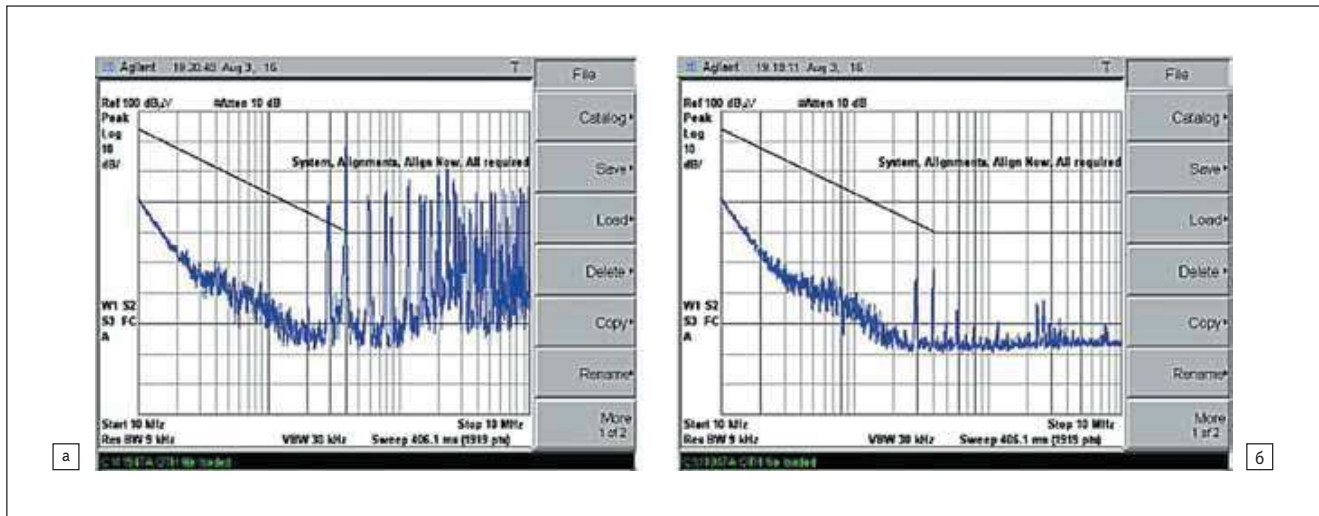


Рис. 6. Эффективность применения модуля фильтра HFSMA/(20-50)-461-40 на входе модуля преобразователя HDCD/(20-50)-12-1.5/SP: а) частотный спектр помех без установленного внешнего фильтра, создаваемый модулем на входе, превышает нормы стандарта MIL-STD-461, категория CE-102; б) уровень помех с применением модуля фильтра HFSMA/(20-50)-461-40

Фильтры электромагнитных помех

Для подавления как основной рабочей частоты, так и ее гармоник на выходе преобразователей применяется LC-фильтр (на структурной схеме не показан). Если уровень пульсации выходного напряжения не соответствует требованиям системы, фильтрующая схема может быть доработана, для того чтобы подавить пульсации. На рис. 5 показано несколько рекомендованных схем фильтров.

Конденсатор должен быть установлен как можно ближе к нагрузке, при этом значение емкости конденсатора должно быть меньше максимально допустимой емкостной нагрузки преобразователя (100 мкФ). Здесь следует заметить следующее обстоятельство: однотактные обратнотокходовые преобразователи напряжения обладают существенным недостатком — требуют наличия больших емкостей сглаживающего выходного фильтра. Правильный выбор выходного конденсатора позволяет снизить массогабаритные параметры конечного изделия. Применение керамических конденсаторов с увеличенными нормами пульсаций дает возможность значительно увеличить нормы заданных пульсаций напряжения, а следовательно, уменьшить массу и габариты фильтров. Только если нагрузка имеет высокочастотную динамику потребления, следует применять электролитические конденсаторы [11].

Для подавления помех на входе преобразователя применяется простейший LC-фильтр с небольшим вносимым затуханием. Если необходимы меньшие пульсации входного тока или обеспечение соответствия регламентам военных стандартов или другим требованиям к уровню электромагнитных помех на шине питания, требуется при-

менение внешних сглаживающих фильтров. Для обеспечения соответствия нормам кондуктивных помех рекомендуется устанавливать модуль фильтра HFSMA/(20-50)-461-40. Применение рекомендованного фильтра на входе импульсного преобразователя напряжения, который является нелинейным двухполюсником с отрицательным дифференциальным сопротивлением, обеспечивает устойчивость системы «входной фильтр – преобразователь». Выходное комплексное сопротивление входного фильтра HFSMA/(20-50)-461-40 значительно меньше входного комплексного сопротивления преобразователя, что является условием, исключающим возникновение автоколебательного режима в системе «входной фильтр – преобразователь».

На рис. 6 показана эффективность применения помехоподавляющего фильтра HFSMA/(20-50)-461-40 с вносимым затуханием 60 дБ на частоте 500 кГц на входе DC/DC-преобразователя HDCD/(20-50)-5-1.5/SP. Применение фильтра снижает уровень пульсаций напряжения на входе DC/DC-преобразователя: напряжение помех значительно ниже уровней напряжения, указанных в категории CE102 (устанавливает ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот от 30 кГц до 10 МГц) стандарта MIL-STD-461E. Искажения напряжения установлены в дБ-мкВ.

Металлический корпус преобразователей изготовлен из холоднокатаной стали, которая имеет высокое значение теплопроводности. В таблице 3 приведены тепловые сопротивления модулей, выраженные в °C/Вт рассеиваемой мощности. Для поддержания температуры корпуса ниже +125 °C должен быть предусмотрен теплоотвод. Значение теплового сопротивления используется для определения

Таблица 3. Тепловые сопротивления 1,5-Вт модулей серии HDCD/(20-50)

Модель	Тепловое сопротивление, °C/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCD/(20-50)-5-1.5/SP	23,6	—	0,64 Вт	Не требуется
HDCD/(20-50)-5-1.5/D1	8,1	30×20×1	0,7	Медь
HDCD/(20-50)-5-1.5/D1	7,5	30×20×1	0,71	Медь

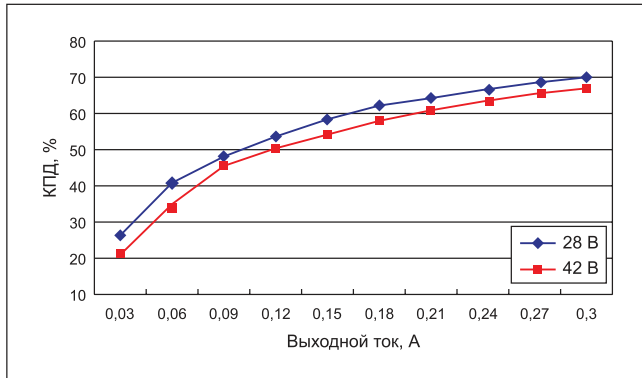


Рис. 7. Зависимость КПД от выходного тока для различных значений входного напряжения для модели HDCD/(20-50)-5-1.5/SP

температуры перегрева модуля относительно окружающей среды и определения температуры окружающей среды, при которой модуль может работать без радиатора.

Типовая зависимость КПД от выходного тока для одноканального преобразователя HDCD/(20-50)-5-1.5/SP с выходным напряжением 5 В для различных значений входного напряжения (28 и 42 В) показана на рис. 7. Этот график позволяет выбрать оптимальный коэффициент загрузки модуля по мощности и обеспечить допустимую рассеиваемую мощность, чтобы повысить надежность.

Обеспечение оптимального теплового режима в конкретных условиях эксплуатации позволяет достичь приемлемого срока службы устройства, так как повышенная температура увеличивает интенсивность его отказов. Интенсивность отказов удваивается с увеличением рабочей температуры на каждые +15 °C. Зависимость среднего времени наработки до отказа — MTBF (Mean Time Between Failure) для преобразователя напряжения HDCD/(20-50)-5-1.5/SP представлена на рис. 8. Значение MTBF рассчитано для условий космического полета.

Для эффективной работы модуля рекомендуется, чтобы фактическая рабочая мощность составляла 30–70% от номинальной выходной мощности, поскольку в этом диапазоне мощностей параметры

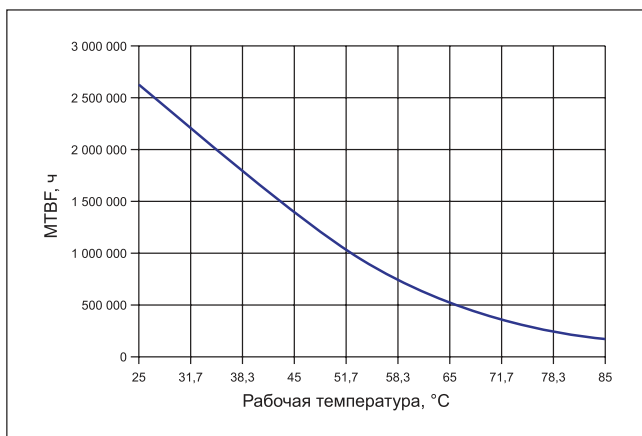


Рис. 8. Зависимость значения MTBF от рабочей температуры для DC/DC-преобразователя HDCD/(20-50)-5-1.5/SP

DC/DC-преобразователя будут использованы оптимально и работа преобразователя будет надежной и устойчивой.

При небольшой нагрузке элемент, накапливающий энергию (индуктивность трансформатора), не сможет следовать за током нагрузки — в этом случае ток будет разрывным, соответственно, выходное напряжение будет нестабильным. Как правило, DC/DC-преобразователь имеет ограничение по минимальной нагрузке, в большинстве случаев 10% от номинальной нагрузки. В том случае, когда преобразователь используется с небольшой нагрузкой или в режиме холостого хода, применение определенной искусственной нагрузки, обычно 10% от номинальной нагрузки, является эффективным решением. В качестве догрузки на выходе DC/DC-преобразователя можно использовать внешний резистор. Дополнительная нагрузка преобразователя позволяет сохранить режим неразрывных токов при малых токах нагрузки.

Радиационная стойкость

Важным требованием к источникам электропитания, предназначенным для функционирования в составе систем электроснабжения космических аппаратов и спутников, является высокая надежность при работе в условиях воздействия специальных факторов космического пространства, так как от этого показателя зависит срок активного существования спутника или космического аппарата. Для обеспечения высоких показателей радиационной стойкости к воздействию тяжелых заряженных частиц с высокими значениями линейной передачи энергии и дозовым ионизационным эффектам при изготовлении преобразователей напряжения применяются полупроводниковые компоненты с высокой стойкостью к влиянию ионизирующих воздействий: специальная микросхема ШИМ-контроллера и подобранный n -канальный МОП-транзистор. Применяются микросхемы операционных усилителей и компараторов, выполненных по биполярной технологии, которые отличаются высокими уровнями дозовой стойкости. Используются особые подходы и методы проектирования.

Проведенные испытания подтвердили высокую радиационную стойкость модулей DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50). Уровень ионизационной дозовой стойкости составляет 100 крад, а уровень чувствительности к одиночным ядерным частицам с ЛПЭ — 75 МэВ·см²/мг.

Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи с выходной мощностью 5 Вт

Пятиваттные DC/DC-преобразователи серии HDCD/(20-50) обеспечивают один и два канала выходного напряжения с номинальными значениями напряжений 5, 12, 15, ±5, ±12 В. Преобразование напряжения происходит с КПД до 64%. Удельная объемная мощность составляет до 956 Вт/дм³ (для одноканальных моделей). Габаритные размеры модуля без крепежных фланцев 27,6×27,6×6,86 мм, двухканальные модули выполняются в корпусе с крепежными фланцами с размерами 51×28,94×8,38 мм. Для работы модулей питания в составе комплексов электронной аппаратуры в штатных и нештатных режимах работы предусмотрены следующие сервисные функции: дистанционное включение/выключение, защита от пониженного входного напряжения (модуль отключается при напряжении на входе <15,5 В), защита от короткого замыкания, синхронизация от внешнего генератора для обеспечения работы на любой частоте в диапазоне 350–500 кГц (только для двухканальных моделей), регулировка выходного напряжения внешним потенциометром. Полная номенклатура модулей и основные характеристики представлены в таблице 4.

Модули с выходной мощностью 5 Вт выполнены по обратноходовой топологии. Весьма упрощенные структурные схемы одно- и двухканальных моделей представлены на рис. 9.

Для регулирования выходного напряжения применяется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой и обратной связью по напряжению, а также с дополнительной обрат-

Таблица 4. Номенклатура и общие характеристики 5-Вт радиационно стойких модулей серии HDCC/(20-50)

Модель	Выходная мощность, Вт	Выходное напряжение, В	КПД, % при полной нагрузке	Габаритные размеры, мм
HDCC/(20-50)-5R-5/SP	5	5	28 В: 64 42 В: 64	27,6×27,6×6,86 (51×28,94×8,38 с крепежным фланцем)
HDCC/(20-50)-12R-5/SP	5	12	28 В: 68 42 В: 66	27,6×27,6×6,86 (51×28,94×8,38 с крепежным фланцем)
HDCC/(20-50)-15R-5/SP	5	15	28 В: 69 42 В: 67	27,6×27,6×6,86 (51×28,94×8,38 с крепежным фланцем)
HDCC/(20-50)-5-5F/D1	5	±5	28 В: 65 42 В: 63	27,6×27,6×6,86 (51×28,94×8,38 с крепежным фланцем)
HDCC/(20-50)-12-5F/D1	5	±12	28 В: 67 42 В: 65	27,6×27,6×6,86 (51×28,94×8,38 с крепежным фланцем)

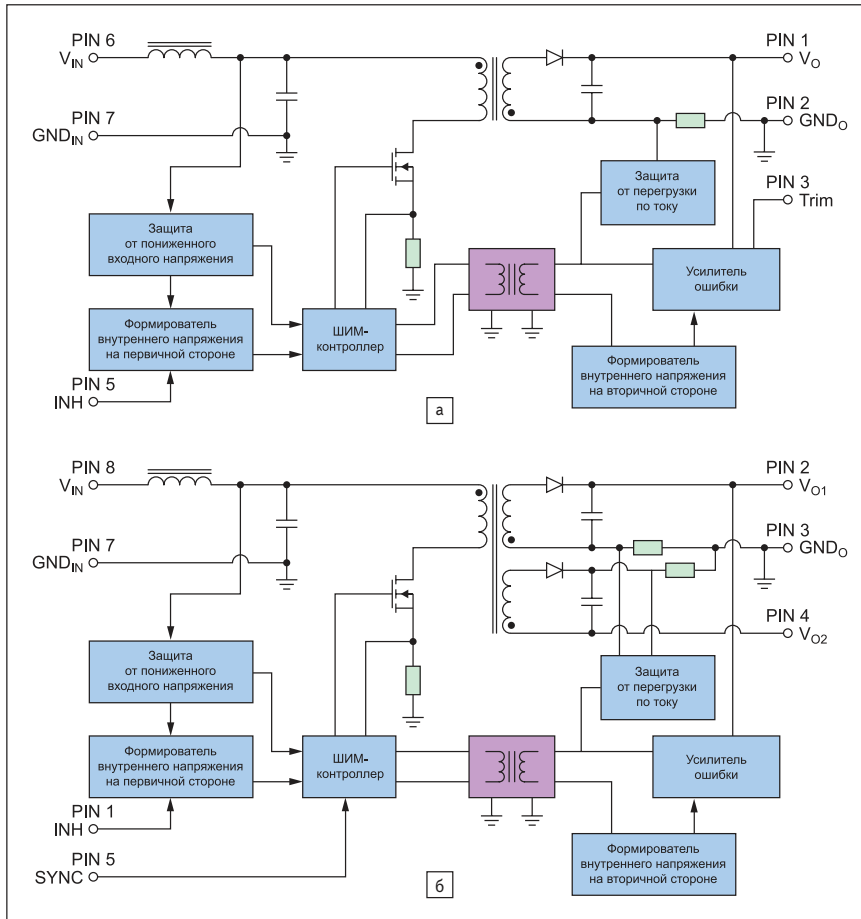


Рис. 9. Структурные схемы радиационно стойких 5-Вт модулей DC/DC-преобразователей: а) одноканальное исполнение; б) двухканальное исполнение

Таблица 5. Тепловые сопротивления некоторых моделей 5-Вт модулей серии HDCC/(20-50)

Модель	Тепловое сопротивление, °С/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCC/(20-50)-5R-5/SP	8,1	30×20×1	2,1	Медь
HDCC/(20-50)-12R-5/SP	9	30×20×1	1,9	Медь
HDCC/(20-50)-15R-5/SP	10,2	30×20×1	1,7	Медь

ной связью по току дросселя (ДОСТД). При регулировании с ДОСТД для прямого регулирования амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки используется внутренний контур регулирования, в то время как основной контур служит для стабилизации выходного напряжения. Как отмечалось ра-

нее, микросхема ШИМ-контроллера является основным узлом импульсных стабилизаторов напряжения, наиболее чувствительным к одиночным и дозовым ионизационным эффектам. В преобразователях серии HDCC/(20-50) применяется радиационно стойкий кристалл ШИМ-контроллера, обеспечивающий посто-

янную частоту переключения и постоянный уровень ограничения тока стока силового транзистора. В других узлах схемы установлены универсальные микросхемы средней степени интеграции (биполярные), обладающие высокой радиационной стойкостью. В качестве гальванической развязки для формирования сигнала цепи обратной связи используется трансформатор, что позволяет значительно повысить уровень стойкости узла обратной связи и импульсного стабилизатора напряжения в целом.

В структурной схеме не показаны пассивные ограничители напряжения на элементах схемы. Цепи ограничения выбросов напряжения обязательно применяются в одноканальных преобразователях на мощностях до 50 Вт.

Для ограничения электромагнитных помех на входе одноканальных преобразователей, когда этого требуют условия применения, рекомендуется устанавливать фильтр электромагнитных помех HFMSA/(2050)-46140, а на входе двухканальных моделей преобразователей — фильтры HFMH/(2050)-461-75, которые подавляют помехи до уровней ниже нормирующей кривой CE102 стандарта MIL-STD-461 и гарантируют устойчивость системы «входной фильтр — преобразователь». Однако следует заметить, что на входе и выходе DC/DC-преобразователей имеются встроенные фильтры радиопомех, которые подавляют помехи до уровней, допустимых для многих применений.

В качестве сглаживающих выходных фильтров рекомендуется использовать схемы фильтров, представленных ранее.

В таблице 5 приведены тепловые сопротивления некоторых 5-Вт модулей преобразователей напряжения. Этот параметр, характеризующий теплопередающие свойства конструкции, позволяет рассчитать параметры теплоотвода для поддержания оптимальной температуры корпуса модуля для конкретных условий эксплуатации. В аппаратуре космических аппаратов и спутников можно реализовать кондуктивный теплоотвод при соединении теплоотводящей поверхности корпуса модуля с массивными металлическими (алюминий, медь) элементами конструкции.

Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи серии HDCC/(20-50) с выходной мощностью 15 Вт

Преобразователи этого ряда обеспечивают выходные мощности 8, 12, 15 Вт, преобразование напряжения осуществляется с КПД до 72% (зависит от конкретной модели) с рабочей частотой 350–500 кГц. Предлагаются одно-, двух- и трехканальные модели. Основные параметры и номенклатура этого ряда преобразователей приведены в таблице 6. Модули соответствуют

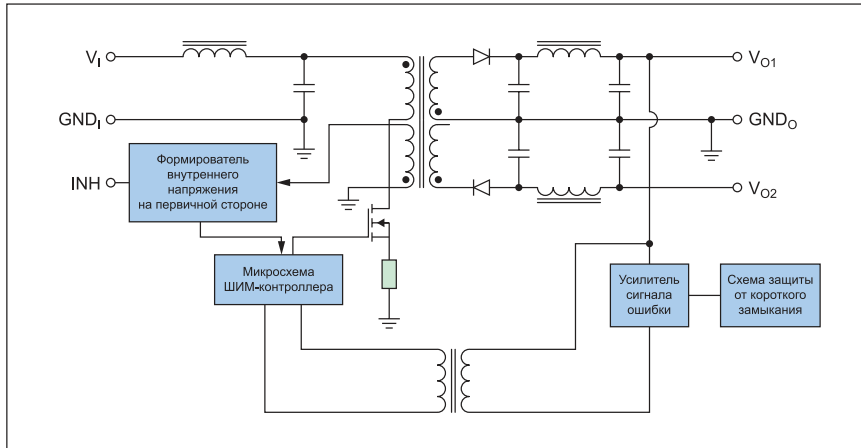


Рис. 10. Структурная схема 15-Вт двухканальной модели преобразователя напряжения серии HDCD/(20-50)

Таблица 6. Номенклатура и общие характеристики 15-Вт DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50)

Модель	Выходная мощность, Вт	Выходное напряжение, В	КПД, % при полной нагрузке	Габаритные размеры, мм
HDCD/(20-50)-3R3-8F/SP	8	3,3 (регулируемое)	28 В: 70 42 В: 69	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-5R-12F/SP	12	5 (регулируемое)	28 В: 75 42 В: 75	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-12R-15F/SP	15	12 (регулируемое)	28 В: 81 42 В: 81	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-15R-15F/SP	15	15 (регулируемое)	28 В: 82 42 В: 81	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-5-12F/D1	12	±5	28 В: 77 42 В: 76	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-12-15F/D1	15	±12	28 В: 81 42 В: 81	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-15-15F/D1	15	±15	28 В: 83 42 В: 82	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-512-15F/T1	15	5/±12	28 В: 73 42 В: 73	68,59×34,29×10,29
HDCD/(20-50)-515-15F/T1	15	5/±15	28 В: 73 42 В: 73	68,59×34,29×10,29
HDCD/(20-50)-5-15VF/SP	15	5 (регулируемое)	28 В: 77 42 В: 76	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-12-15VF/D1	15	±12	28 В: 81 42 В: 80	51×28,94×8,38
HDCD/(20-50)-15-15VF/D1	15	±15	28 В: 81 42 В: 80	51×28,94×8,38

требованиям стандарта GJB2438A-2002 (аналог MIL-PRF-38534) к изделиям категории качества Class H. В качестве структуры для одно- и двухканальных моделей применяется однотактная обратноточковая топология, для которой характерны хорошая эффективность фильтрации пульсаций первичного напряжения и ограниченное число реактивных элементов. Упрощенная структурная схема двухканальной модели показана на рис. 10.

Трехканальные модели созданы по схеме однотактного прямоходового преобразователя. В справочных материалах компании не представлена структурная схема трехканального преобразователя.

Применение радиационно стойкой микросхемы ШИМ-контроллера позволяет упростить конструкцию импульсного преобразователя, уменьшить размеры и повысить надежность. ШИМ-контроллер обеспечивает регулирование электрической энергии с постоянной рабочей частотой, обратной связью по напряжению, а также дополнительной обратной связью по току дросселя. Мощный квазикомплементарный выходной каскад

микросхемы ШИМ-контроллера с ДОСТД поддерживает быструю зарядку входной емкости мощного МОП-транзистора, что необходимо для быстрого переключения МОП-транзистора и исключает применение дополнительного драйвера затвора силового транзистора.

Подавление высокочастотных помех на входе и выходе модулей осуществляется встроенными фильтрами, которые подавляют помехи до уровней, допустимых для многих применений. Модули следует подключать к источнику, имеющему низкий выходной импеданс по переменному току. Как было отмечено ранее, высокий импеданс индуктивного типа может повлиять на устойчивость работы модуля. Для дополнительного уменьшения высокочастотных помех на входе преобразователей рекомендуется устанавливать модули фильтров НФМН/(20-50)-461-75 (для одноканальных и двухканальных модулей), модуль НФМН/(20-50)-461-135 (для трехканальных модулей). Предлагаемые модули фильтров оптимизированы для совместной работы

с преобразователями напряжения по частотам преобразования и входным напряжениям, что исключает возникновение автоколебательного режима в системе «входной фильтр — преобразователь». Модуль фильтра размещается в непосредственной близости к входу DC/DC-преобразователя. Для подавления помех на выходных шинах рекомендуются помехоподавляющие фильтры, примеры которых были приведены ранее.

Для обеспечения работы модулей преобразователей в составе аппаратуры в различных режимах они снабжены следующими сервисными функциями: защита от короткого замыкания, защита от пониженного входного напряжения, дистанционное включение/выключение, регулировка выходного напряжения (для одноканальных моделей), синхронизация частоты преобразования внешним синхросигналом. Диапазон частоты сигнала синхронизации 400–500 кГц, логический уровень совместим с ТТЛ-схемами, коэффициент заполнения 40–60%. Рекомендуется использовать переменное напряжение прямоугольной формы (меандр) с коэффициентом заполнения 50%. Защита от перегрузки по току срабатывает при перегрузке 140–180% от номинального значения тока. При жестком коротком замыкании нагрузки преобразователь переходит в защитный режим: выходное напряжение падает до 0 В, ток шины около 70–110 мА, рассеиваемая мощность примерно 3–5 Вт (для одно- и двухканальных моделей) и 7–9 Вт для трехканальных моделей.

Стабилизация выходного напряжения осуществляется только для канала положительного напряжения, регулировка выходного отрицательного напряжения осуществляется только за счет магнитной связи обмотки трансформатора с витками обмотки положительного напряжения. Перекрестное регулирование при изменении нагрузки от 30% до 70% и от 70% до 30% составляет до 6% при начальной загрузке каналов 50%/50%. Поэтому требуется обеспечивать симметричную сбалансированную нагрузку на выходах двухканальных преобразователей.

График зависимости КПД от выходного тока для одноканальной модели HDCD/(20-50)-15R-15F/SP показан на рис. 11. Типовое значение КПД для этого модуля при входном напряжении 28 В и токе нагрузки 1 А составляет 78%, при входном напряжении 42 В это значение составляет 76%.

Для надежной работы модуля преобразователя важно выбрать эффективный способ отвода тепла от модуля в конкретных условиях эксплуатации, снизить перегрев и размеры теплоотвода. В таблице 7 приведены значения теплового сопротивления модулей питания этого ряда и размеры радиатора для некоторых значений рассеиваемой мощности.

Для оптимального применения модулей в аппаратуре для каждой модели в документации приводятся разнообразные графики:

Таблица 7. Тепловые сопротивления некоторых моделей 15-ваттных модулей серии HDCD/(20-50)

Модель	Тепловое сопротивление, °С/Вт	Размеры радиатора, мм	Мощность, Вт	Материал радиатора
HDCD/(20-50)-3R3-8F/SP	5,8	75×54×1	3,39	Медь
HDCD/(20-50)-5R-12F/SP	7,1	75×54×1	3,85	Медь
HDCD/(20-50)-15R-15F/D1	9,6	75×54×1	2,96	Медь
HDCD/(20-50)-512-15F/T1	2,89	370×300×1	5,37	Медь
HDCD/(20-50)-515-15F/T1	2,89	370×300×1	5,26	Медь

график, отражающий процесс включения при подаче напряжения, зависимость выходного напряжения от изменения нагрузки (50–100%), зависимость КПД от тока нагрузки, переходный процесс при скачках нагрузки, изменение выходного напряжения при изменении входного напряжения при полной нагрузке, зависимость КПД от входного напряжения, зависимость КПД от температуры при различных входных напряжениях, перекрестное регулирование при изменениях нагрузки (для двухканальных преобразователей).

Окончание следует.

Литература

- Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 1. Питание КА, общие принципы // Силовая электроника. 2019. № 6.
- Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 2. Питание КА, практические решения // Силовая электроника. 2020. № 1.
- Бендикова М. А., Ганичев Н. А. Электронная импортозависимость и пути ее преодоления (на примере космической промышленности) // Экономический анализ: теория и практика. 2015. № 3.
- Белюс А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В. Космическая электроника. В 2-х кн. М.: Техносфера, 2015.
- Лысенко П. Китайская радиационно стойкая ЭКБ на российском рынке // Современная электроника. 2021. № 6.
- Безродный В. Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи из КНР. Часть 1 // Современная электроника. 2016. № 7.
- Безродный В. Радиационно стойкие DC/DC-преобразователи из КНР. Часть 2 // Современная электроника. 2016. № 8.
- Кессаринский Л. Н., Бойченко Д. В., Никифоров А. Ю. Анализ радиационного поведения импульсных стабилизаторов напряжения // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 4.
- Горячев В., Чуприн А. Источник вторичного электропитания для специальной бортовой аппаратуры. Формирование внутреннего напряжения питания // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 10.
- Жданкин В. Управление пусковым током в DC/DC-преобразователях // Компоненты и технологии. 2016. № 8.
- Сергеев Б. С. Сглаживающие фильтры однофазного преобразователя с обратным включением диода // Электропитание. 2013. № 4.
- Жданкин В. Дистанционное управление и внешняя синхронизация преобразователей напряжения // Компоненты и технологии. 2017. № 5.
- Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. 2011. № 41.
- Лукин А. В. Новые направления развития преобразователей постоянного напряжения (по материалам зарубежной печати) // Электропитание. 2011. № 2.

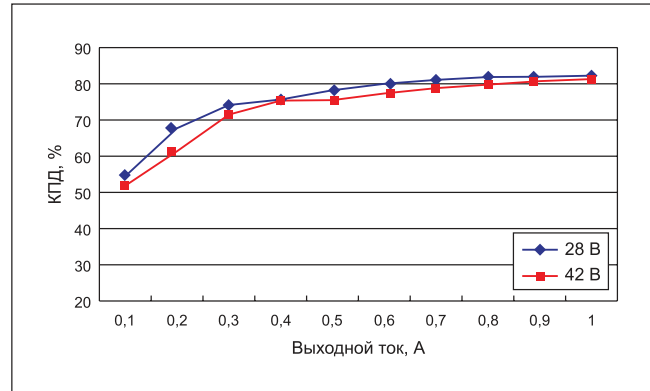
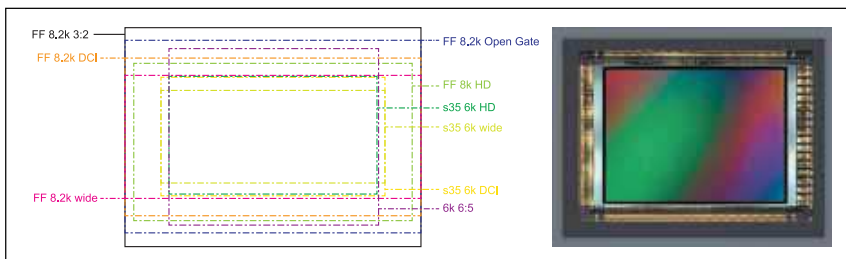


Рис. 11. Зависимость КПД от выходного тока для одноканальной модели HDCD/(20-50)-15R-15F/SP

НОВОСТИ датчики

Первый сенсор новой серии GCENE от Gpixel для кино- и фотосъемки, аэрофототехники



Компания Gpixel представляет новинку — сенсор GCENE4349, первый в новой серии GCENE для кино- и фотосъемки, аэрофототехники, других профессиональных применений, где найдут место непревзойденные характеристики нового представителя семейства. Обладая огромным опытом разработки

и производства узкоспециализированных сенсоров для научных, промышленных применений, в сотрудничестве с именитыми партнерами в профессиональной сфере, компания Gpixel принесла в индустрию кино, фото и телевидения действительно интересный и востребованный прибор.

GCENE4349 — уникальная полнокадровая (Full Frame 35 мм) многослойная (stacking) матрица с обратной засветкой (BSI) и динамическим диапазоном 110 дБ, или более 18 стопов. Разрешение матрицы 49 Мп с пикселем 4,3 мкм, кадровая частота видео при разрешении 8k — 120 Гц, при 4k — 240 Гц.

Верхний слой матрицы — BSI фоточувствительная область, нижний слой представляет собой массив ячеек, содержащий 16-бит АЦП и SRAM-память, что позволяет накапливать и хранить до 4 субкадров для получения бесшовной результирующей экспозиции. Величина накапливаемого сигнала пикселя достигает 160 000 e⁻, шум считывания в режиме Digital Still Camera (DSC) опускается до 1,7 e⁻.

www.gpixel.com