

Модульные гибридно-пленочные DC/DC-преобразователи средней мощности для авиакосмической аппаратуры

Виктор ЖДАНКИН,
технический
специалист,
viktor@prochip.ru

Статья продолжает обзор DC/DC-модулей – преобразователей напряжения на основе гибридно-пленочной технологии, предназначенных для аппаратуры авиакосмического и военного назначения, а также других применений с повышенными требованиями к объему и высокой удельной мощности вторичного источника электропитания [1]. В обзоре представлены модули средней мощности (15, 30 и 60 Вт) с повышенными удельными массо-объемными характеристиками и увеличенным КПД. Высокий КПД и удельные массо-объемные показатели достигаются за счет режима синхронного выпрямления, размагничивания трансформатора с помощью активного ограничителя, благодаря современным эффективным магнитным компонентам, а также снижению мощности потерь в ключевом элементе – MOSFET.

Серия НМНА28

Перед разработчиками была поставлена задача создать преобразователь напряжения с выходной мощностью 15 Вт, причем, габаритные размеры были ограничены размерами 5-Вт модуля серии MSA (конструкционный объем: 0,0063 дм³).

Модули серии НМНА28 созданы по схеме обратного преобразователя, так как эта схема является оптимальной структурой для DC/DC-преобразователей мощ-

ностью до 30 Вт. Структурная схема одноканального модуля преобразователя серии НМНА28 представлена на рис. 1.

С целью максимизации КПД при работе в широком диапазоне токов и с низкими уровнями выходного напряжения применяется режим синхронного выпрямления, при котором демпферный диод понижающего стабилизатора заменяется коммутируемым транзистором MOSFET. Активное управление синхронным выпрямителем осуществляется контроллером. Применение синхронно-

го выпрямления позволило повысить КПД на несколько процентов.

Из-за наличия индуктивности рассеяния трансформатора в импульсном преобразователе при заперении силового ключа возникает большое по величине перенапряжение. Для поглощения энергии, накопленной в этой индуктивности, и подавления броска напряжения в схему такого преобразователя вводится ограничитель напряжения. Причем, вместо широко используемых диссипативных схем RC-RCD-ограничителей в схеме модулей применяется активный ограничитель (active clamp flyback) в нижней части первичной стороны схемы параллельно основному MOSFET. Дополнительный MOSFET (Q2) должен быть *p*-канальным из-за направления проводимости его внутреннего диода. Управление *p*-канальным MOSFET осуществляется драйвером дополнительного транзистора.

Размагничивание трансформатора с помощью активного ограничителя дает ряд преимуществ по сравнению с RCD-ограничителем: меньшее перенапряжение на основном MOSFET, возможность переключения при нуле напряжения, пониженный уровень электромагнитных помех, возможность работать с коэффициентом заполнения выше 0,5. Кроме того, исключается третья обмотка силового трансформатора, что позволяет упростить его конструкцию. Подробно методика анализа и расчет преоб-

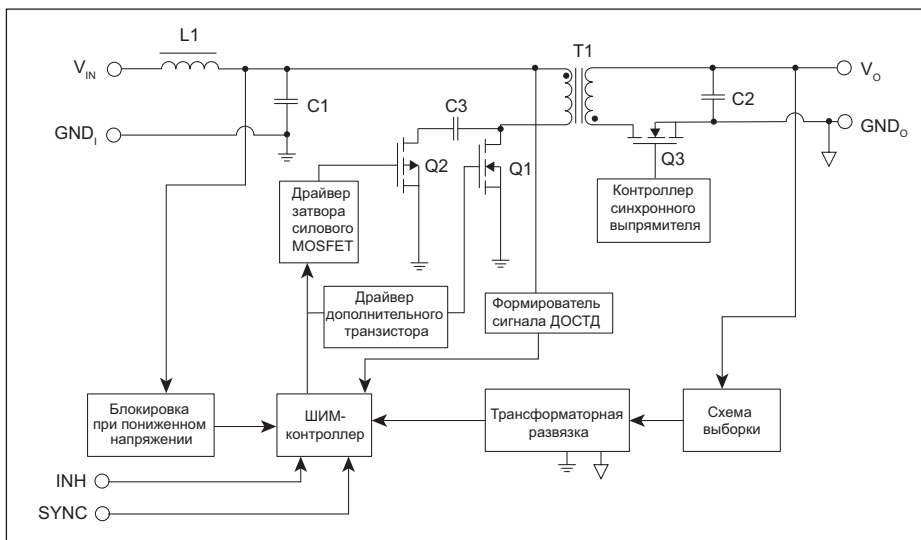


Рис. 1. Структурная схема одноканального преобразователя напряжения серии НМНА28

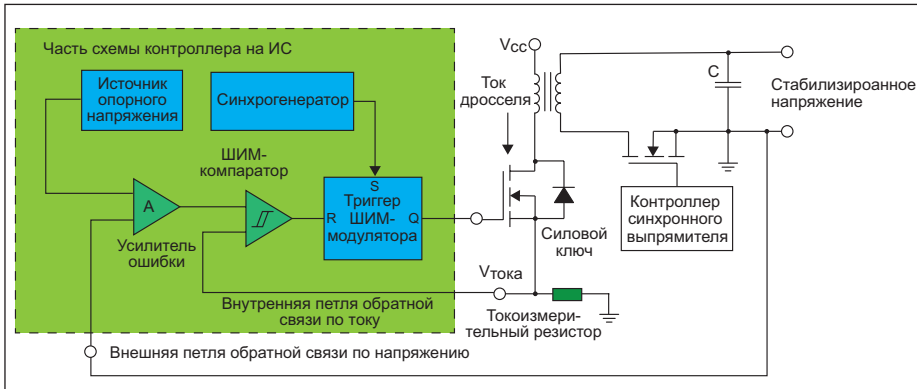


Рис. 2. При регулировании с использованием метода ШИМ с постоянной рабочей частотой и обратной связью по току дросселя силовой ключ запирается при достижении током дросселя (первичная обмотка трансформатора) некоторого порогового значения (порог задается выходным сигналом усилителя ошибки и величиной напряжения на датчике тока)

разователя с активным ограничением представлена, например, в [2].

Значительно повысить КПД преобразователей постоянного напряжения за счет снижения потерь на переключение позволило применение MOSFET нового поколения (Q1) с небольшим сопротивлением в открытом состоянии и небольшим зарядом затвора, а также низким сопротивлением затвора.

В схеме обратноходового преобразователя электромагнитный компонент совмещает функции накопления энергии и трансформатора. Электромагнитные компоненты в преобразователях напряжения определяют массогабаритные показатели и технические параметры всего преобразователя. Они создают самое серьезное препятствие на пути к миниатюризации электронных устройств. Однако методы исполнения сердечников и материалы для них значительно усовершенствовались, что обеспечило небольшие габаритные размеры трансформатора с целью экономии места в объеме корпуса источника питания. Силовые ферриты новых марок обладают низкими объемными удельными магнитными потерями при рабочих частотах до 500 кГц и индукции насыщения 0,3–0,5 Тл. Гибридная технология выполнения преобразователей не позволяет применить планарные трансформаторы с плоскими печатными обмотками или интегрировать обмотки в основную плату. Применение ферритов эффективных марок позволило создать низкопрофильный магнитопровод для силового трансформатора с бескаркасной намоткой проводников. Высота его конструкции составляет примерно половину высоты при использовании обычных магнитных материалов. Выбор оптимальной последовательности и способа намотки обмоток позволили уменьшить интенсивность скин-эффекта, межвитковую емкость, индуктивность рассеяния и гистерезисные потери. Благодаря низкому профилю конструкции силового трансформатора высота корпуса 15-Вт преобразователя равна 8,7 мм (макс.). Высота корпуса 5-Вт преобразователя серии MSA составляет 6,86 мм. Для обеспечения надежного крепления трансфор-

матора к подложке из алюминиевой керамики в условиях вибромеханических нагрузок применяется электропроводящая клеювая композиция, обеспечивающая высокопрочное склеивание с высоким коэффициентом теплопроводности. Необходимо отметить, что применение склеивания вместо других способов соединения позволяет снизить массогабаритные характеристики изделий микросборочного производства. В результате большая часть всех пассивных и активных компонентов преобразователей напряжения смонтирована на керамической плате при помощи клеювой композиции.

Для регулирования выходного напряжения применяется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) управления силовым ключом с постоянной рабочей частотой (350–550 кГц) и двумя контурами регулирования. Основной контур служит для стабилизации выходного напряжения (voltage mode), в то время как внутренний контур регулирования с обратной связью по току дросселя (current mode) используется для прямого регулирования амплитуды тока дросселя (первичной обмотки силового трансформатора) посредством сигнала ошибки. На рис. 2 представлена электрическая схема, поясняющая принцип работы преобразователя с обратной связью по току дросселя. Опорное напряжение подается на усилитель сигнала ошибки, на второй вход которого поступает выпрямленный сигнал с вторичной обмотки импульсного трансформатора. Усиленная разница сигналов поступает на ШИМ-компаратор и сравнивается с напряжением, которое снимается с датчика тока, установленного в первичной обмотке трансформатора. На выходе ШИМ-компаратора формируется прямоугольный сигнал в случае, если напряжение с датчика тока превышает напряжение сигнала ошибки. Таким образом, чем выше это напряжение, тем меньше длительность импульса на выходе ШИМ-компаратора. Силовой ключ запирается, когда ток первичной обмотки трансформатора достигает некоторого порогового значения, заданного выходным сигналом усилителя ошибки. Такая структура

обеспечивает малую нестабильность выходного напряжения при изменениях входного напряжения питающей сети и тока нагрузки. Кроме того, применение обратной связи по току дросселя позволяет во многом улучшить разные характеристики.

ШИМ-регулирование осуществляет микросхема контроллера, изготовленная по BiCMOS-технологии, благодаря чему обеспечивается малая занимаемая площадь и все необходимые функции с минимальным количеством внешних элементов. Применение малогабаритных керамических конденсаторов большой емкости со слабой зависимостью емкости от приложенного напряжения и температуры также способствуют уменьшению габаритов модуля без потери в качестве.

На рис. 3 показан внешний вид модуля серии НМНА28 без крепежных фланцев с вертикальным расположением выводов для монтажа на печатную плату. Удельная мощность по объему равна 2367 Вт/дм³. Рассеиваемая мощность – 3,3 Вт при КПД 82%, что составляет примерно 22% выходной мощности. Максимальная рассеиваемая мощность 5-Вт модуля серии MSA (Crane Aerospace & Electronics, США) – 2,2 Вт.

Габаритные размеры модуля без крепежных фланцев: 27,23×27,23×8,7 мм; габаритные размеры модуля с крепежными фланцами: 27,23×38,5×8,7 мм. Для обеспечения оптимального теплового режима гибридно-плеченных модулей серии НМНА28 (выбором эффективного способа отвода тепла от модуля, минимизирования перегрева) предлагаются рекомендации из [3].

Диапазон входного напряжения модулей составляет 14–40 В (кратность около четырех); при этом допускается переходное отклонение входного напряжения до 50 В длительностью 1 с. Выпускаются одноканальные модели с наиболее часто востребованными номинальными значениями выходного напряжения 5, 8, 12, 15, 24 В. Планируется выпускать также двухканальные модели с напряжениями ±5, ±6, ±10, ±12, ±15 В.

Модули оснащены набором сервисных функций для обеспечения работы в составе комплексов электронной аппаратуры: дистанционным выключением, защитой от пониженного уровня входного напряжения при включении и выключении, защитой от короткого замыкания, синхронизацией рабочей частоты внешним сигналом.

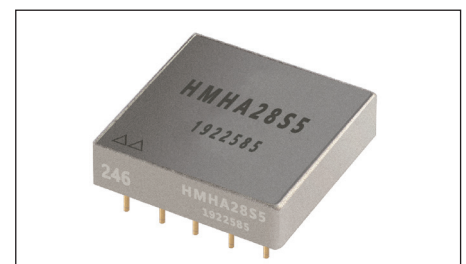


Рис. 3. Внешний вид DC/DC-преобразователя НМНА2855 без крепежных фланцев

Дистанционное выключение (блокировка) может применяться для: удержания модуля в выключенном состоянии для сохранения энергии в течение времени, когда не требуется выходное напряжение; формирования программного включения отдельных модулей в соответствии с необходимым алгоритмом; уменьшения пускового тока; содействия предотвращению проблем с входным импедансом и задержки включения преобразователя, пока его входное напряжение не станет стабильным.

Для подачи сигнала синхронизации микросхема ШИМ-контроллера имеет специальный вход синхронизации. Синхронизация частоты преобразования позволяет решить множество проблем в системах электропитания с большим количеством модулей: исключить частоты биений и упростить схему фильтрации, а также обеспечить быстрый переход преобразователей в рабочий режим без длительных переходных процессов на выходе.

Схема блокировки удерживает преобразователь в выключенном состоянии до тех пор, пока входное напряжение не повысится примерно до 12–13,8 В; при этих значениях начинается преобразование напряжения. Как только входное напряжение снизится приблизительно до 11–13,5 В, преобразователь выключится.

Для подавления пульсаций входного тока на входе преобразователей применяется внутренний сглаживающий LC-фильтр. Для дополнительного снижения пульсирующего входного тока (80 мА) рекомендуется устанавливать внешний сглаживающий фильтр НМФА-461. Как было замечено ранее в первой части этого обзора, применение рекомендуемых производителем сглаживающих фильтров обеспечивает устойчивую работу системы «входной фильтр – преобразователь» во всем диапазоне входного напряжения и допустимых нагрузок.

Конструкция модулей и производственный процесс соответствуют требованиям общих технических условий GJB2438A-2002 к гибридным интегральным микросхемам (соответствует американскому стандарту MIL-PRF-38534 Hybrid Microcircuits, General Specification For). Выходной контроль проводится в соответствии с методами военного стандарта GJB548C-2021 «Методы и процедуры испытаний микроэлектроники» (соответствует американскому стандарту MIL-STD-883 Test Methods and Procedures for Microelectronics).

Известно, что отбраковка потенциально ненадежных изделий за счет дополнительных испытаний позволяет повысить надежность изделий на 1–1,5 порядка и выше по сравнению с уровнем качества изделий массовой продукции. Для изделий уровня качества Military проводятся следующие проверки: визуальный внутренний контроль, стабилизационная печь, термоудары и термоциклы, механические удары, центрифуга

(постоянное ускорение), критические электрические параметры при крайних температурах, электротермотренировка, окончательный контроль по электрическим параметрам.

Серия НМТФ28

Одно- и двухканальные 30-Вт модули DC/DC-преобразователей серии НМТФ28 выполнены с габаритными размерами подобными размерам 15-Вт модулей серии НМФ+ компании Crane Aerospace & Electronics (США).

Структура модулей серии НМТФ28 аналогична структуре модулей серии НМНА28. Однако у двухканальных модулей вместо синхронного выпрямителя применяются диоды Шоттки.

Модули предназначены для работы в сетях постоянного напряжения с предельными значениями отклонения 14–40 В; при этом допускается переходное отклонение входного напряжения до 50 В длительностью 1 с.

Предлагаются одноканальные модели с выходами 3,3 В/6 А, 5 В/6 А, 12 В/2,5 А, 15 В/2 А, 24 В/1,25 А; двухканальные модели с выходными каналами: ± 12 В/ $\pm 1,25$ А и ± 15 В/ ± 1 А.

Диапазон рабочей частоты преобразования: 300–500 кГц (ном. частота: 400 кГц). Удельная мощность: до 3100 Вт/дм³.

Габаритные размеры корпуса модели без крепежного фланца: 37,23×28,84×9 мм; габариты модуля с крепежным фланцем: 51,3×28,84×9 мм. На рис. 4 показан внешний вид модуля с крепежными фланцами с вертикальным расположением выводов для монтажа на печатную плату. Для выбора оптимального режима работы модуля весьма полезным подспорьем является зависимость КПД от выходной мощности при разных входных напряжениях (рис. 5).

Сервисные функции: командный вход удаленного управления логическим сигналом; вход синхронизации рабочей частоты (420–460 кГц); регулировка выходного напряжения внешним резистором; защита от пониженного входного напряжения, защита от короткого замыкания. Максимальная пульсация выходного напряжения – 80 мВ (двойная амплитуда) на выходе модели с выходным напряжением 5 В. Для дополнитель-

ного подавления пульсирующего входного тока (200 мА) рекомендуется установить внешний сглаживающий фильтр НМФН-461.

Серия НМФР28

Преобразователи серии НМФР28 предназначены для замены преобразователей DVHE283R3S и DVHE2805S компании VPT (США). Преобразователи напряжения НМФР28S3RS и НМФР285S по электрическим характеристикам, массо-объемным характеристикам, присоединительным размерам, координатам выводов и их функциональному назначению идентичны преобразователям компании VPT. Однако максимальная мощность модели НМФР285S (60 Вт) на 10 В больше, чем у модели DVHE2805S.

Модули выполнены по схеме однотактного прямоходового преобразователя с синхронным выпрямителем. Вместо прямого и обратного диода Шоттки в них используются полевые транзисторы MOSFET с очень низким сопротивлением в проводящем состоянии, которые управляются контроллером. Это позволяет существенно снизить потери на проводимость и повысить КПД преобразователей с низким выходным напряжением и большими выходными токами. При разработке прямоходового преобразователя необходимо обеспечить размагничивание сердечника трансформатора. Представленная в справочной документации упрощенная структурная схема (рис. 6) не показывает, как уменьшается перегрузка по напряжению силового MOSFET и осуществляется перемагничивание трансформатора. В схеме отсутствуют элементы активного ограничения, элементы диссипативных схем RC-RCD-ограничителей, третья размагничивающая обмотка силового трансформатора и восстановительный диод.

Можно предположить, что размагничивание сердечника трансформатора осуществляется резонансным переключением. Используется резонансная цепь, состоящая из выходной емкости MOSFET (Q1), индуктивности рассеяния, а также всех основных паразитных компонентов схемы. Использование синхронного выпрямления позволяет уменьшить перенапряжения

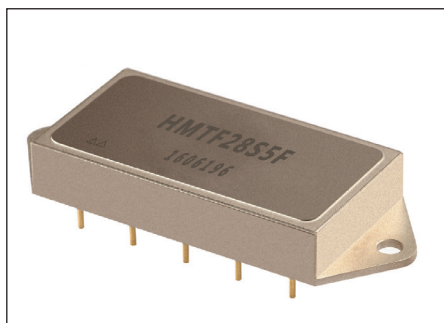


Рис. 4. Внешний вид конструкции модуля DC/DC-преобразователя серии НМТФ28 с крепежными фланцами

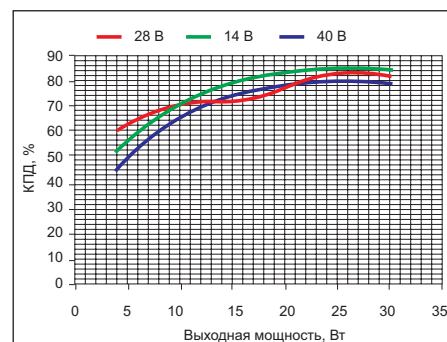


Рис. 5. Зависимость КПД от выходной мощности при разных входных напряжениях модуля НМТФ285S

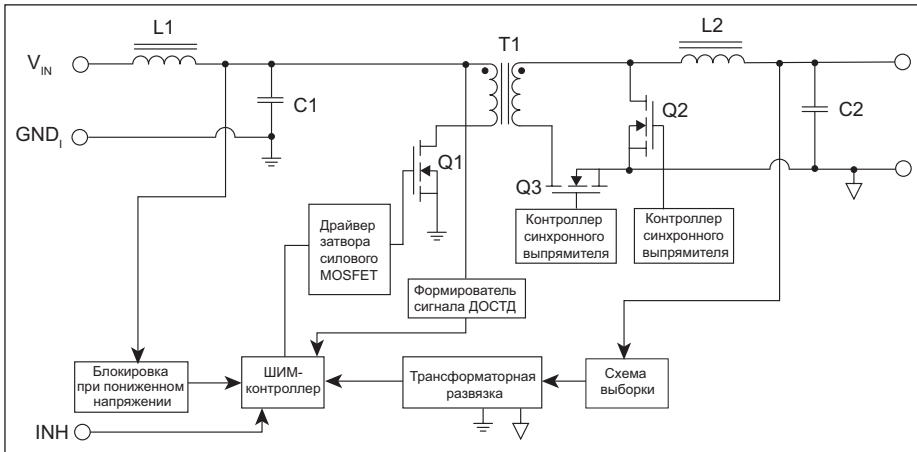


Рис. 6. Структурная схема преобразователя напряжения серии HMFR28

на полупроводниковых компонентах схемы в переходных режимах. Выбор соответствующей микросхемы контроллера управления обеспечивает оптимальные рабочие характеристики преобразователя [4].

В преобразователях применяется ШИМ-управление с постоянной рабочей частотой (300–500 кГц) и обратной связью по напряжению (voltage mode), а также дополнительной обратной связью по току дросселя (current mode). Применяемая интегральная микросхема ШИМ-контроллера изготовлена по BiCMOS-технологии и занимает небольшую площадь. Микросхема обладает всеми необходимыми функциями для безопасной и эффективной работы преобразователя и не нуждается в дополнительных внешних элементах. Для зарядки входной емкости силового MOSFET за короткое время (менее 100 нс) применяется микросхема драйвера с мощным квазикомплементарным выходным каскадом.

Для снижения пульсирующего входного тока применяется внутренний LC-фильтр на входе преобразователя. Для дополнительного подавления пульсирующего тока (с двойной амплитудой 150 мА) рекомендуется внешний фильтр НМФН-461.

Типовые зависимости КПД от выходного тока при разных входных напряжениях для преобразователя HMFR28S5 показаны на рис. 7. Небольшое уменьшение КПД при выходном токе близком к максимальному объясняется дополнительным ростом потерь в компонентах модуля при подходе к их предельным энергетическим возможностям. Максимальное значение КПД модуля HMFR28S5 при полной нагрузке и температуре окружающей среды 25°C: 87%. Рис. 7 позволяет выбрать оптимальный коэффициент загрузки модуля по мощности и обеспечить допустимую рассеиваемую мощность в модуле, чтобы повысить надежность.

Удельная мощность по объему модуля HMFR28S5: 3470 Вт/дм³; рассеиваемая мощность: 8,96 Вт (при максимальном КПД 87%). Модули способны функционировать в широ-

ком диапазоне температур –55...125°C, но для обеспечения надежной работы необходимо обеспечить нормальный тепловой режим.

Диапазон входного напряжения модулей: 16–40 В; при этом допускается переходное отклонение входного напряжения до 50 В длительностью 1 с. Серия HMFR28 включает две модели – HMFR28S3R3 с выходным напряжением 3,3 В (макс. выходной ток: 12 А) и HMFR28S5 с выходным напряжением 5 В (макс. выходной ток: 12 А). Внешний вид преобразователя напряжения серии HMFR28 приведен на рис. 8. Конструктивно модули выполнены в герметичных корпусах с вертикальным расположением выводов для монтажа в отверстия печатной платы; предлагаются варианты с крепежными фланцами и без фланцев. Габаритные размеры корпуса без фланцев: 54,4×29×10,96 мм; корпус с фланцами имеет размеры 54,4×29×10,96 мм.

Модули обладают следующими сервисными функциями: плавный запуск; дистанционное управление логическими сигналами; защита от короткого замыкания; защита от пониженного входного напряжения; возможность организации внешней обратной связи для компенсации негативного влияния сопротивления питающей линии; регулировка выходного напряжения замыканием регулировочного резистора на положительный или отрицательный выход модуля.

В распределенных системах электропитания модули могут применяться в качестве

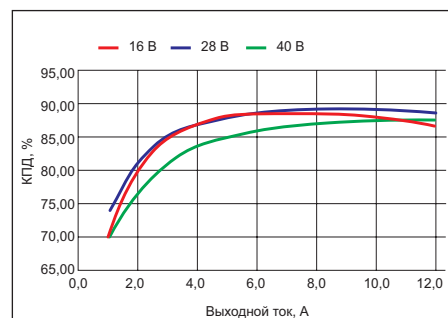


Рис. 7. Зависимость КПД от выходного тока преобразователя HMFR28S5

формирователя промежуточной шины для модулей преобразователей напряжения типа POL (Point of Load), которые устанавливаются в непосредственной близости от питаемого функционального узла.

Выводы

Рассмотренные новые DC/DC-преобразователи напряжения, которые производятся Восточно-китайским научно-исследовательским институтом микроэлектроники, по стойкости и устойчивости к внешним воздействующим факторам (механическим, климатическим и специальным средам) соответствуют требованиям национальных военных стандартов. Модули оснащены функционалом, необходимым для многих применений. Электрические параметры, массо-объемные характеристики, расположение выводов и их назначение идентичны изделиям известных американских компаний, но и превосходят их по показателям удельной мощности по объему. Модули предназначены для применения в аппаратуре авиакосмического и военного назначения, но также можно рекомендовать для других применений с повышенными требованиями к объему и высокой удельной мощности вторичного источника питания.

Литература

1. Жданкин В. Гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи напряжения для применения в аппаратуре специального назначения // Электронные компоненты. № 2. 2023.
2. Дейнеко Д. С., Кастров М. Ю. Способы размагничивания трансформатора прямоходового преобразователя постоянного напряжения с помощью активного ограничителя // Практическая силовая электроника. № 37. 2010.
3. Жданкин В. Обеспечение оптимальных тепловых режимов гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей // Компоненты и технологии. № 7. 2016.
4. Герасимов А. А., Кастров М. Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. № 47. 2011.



Рис. 8. Внешний вид конструкции преобразователя напряжения HMFR28S5 без крепежных фланцев