

# Высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи повышенной мощности на основе нитрид-галлиевых транзисторов

Виктор Жданкин (viktor0557@gmail.com)

В статье приведён обзор характеристик и схемотехнических особенностей компактных радиационно-стойких источников электропитания. Приводится сравнение источников с коммутирующими элементами на основе GaN-транзисторов с источниками на основе MOSFET-транзисторов.

## Введение

Повышение эффективности и уменьшение массогабаритных показателей всегда были в фокусе производства радиационно-стойких преобразователей. Ранее единственным возможным вариантом для применения в качестве коммутирующего устройства было применение радиационно-стойких MOSFET-транзисторов, с помощью которых можно наиболее эффективно использовать принцип оптимизации плотности тока для миниатюризации транзисторного ключа. Радиационно-стойкие MOSFET-транзисторы изготавливаются ограниченным числом производителей и часто требуют некоторых усилий для приобретения. Некоторые известные производители преобразователей напряжения для применения в бортовой космической аппаратуре вынуждены были приобретать партии кристаллов коммерческого уровня качества, которые тщательно отбирались для соответствия требованиям стандарта MIL-STD-883 «Test Methods and Procedures for Microelectronics» к элементам уровня качества Space (Class K). Не только наличие дефицита, но стоимость, характеристики и размеры также делают их сложными для выполнения разработки эффективного компактного источника питания. С недавними предложениями на продажу нитрид-галлиевых

(GaN) полевых транзисторов этот фокус стал реальностью.

В статье сделан фокус на 200-вольтовых GaN-транзисторах, которые используются в DC/DC-преобразователях с входным напряжением 100 В. Приведённые технические параметры получены по результатам разработки преобразователей напряжения серии SGRB120 компании VPT.

В настоящее время самый маленький радиационно-стойкий MOSFET транзистор с блокирующим напряжением 200 В предлагается в корпусе SMD-0.5, который имеет размеры 7,52×10,16 мм. Сопротивление в открытом состоянии  $R_{DS(ON)}$  простирается от 0,13 до 0,4 Ом. Нитрид-галлиевый транзистор с блокирующим напряжением 200 В, предлагаемый компанией Efficient Power Conversion (EPC) Space, имеет размер 5,7×3,9 мм с сопротивлением канала в открытом состоянии 0,028 Ом. Радиационно-стойкий MOSFET почти в 3,5 раза больше, чем GaN-транзистор, и к тому же MOSFET имеет более чем в 4,5 раза большее сопротивление канала в открытом состоянии. Одними из компонентов с наибольшими потерями в конструкции источника питания всегда является коммутирующее устройство. Использование этой преобразовательной технологии позволяет сделать резкий скачок вперёд показателям энергоэффективно-

сти преобразователей напряжения, наряду с уменьшением общих массогабаритных показателей. В табл. 1 приводится сравнение некоторых параметров нитрид-галлиевых приборов и MOSFET транзисторов с блокирующим напряжением 200 В.

Нитрид-галлиевый транзистор имеет несколько преимуществ – размеры, сопротивление в открытом состоянии и коммутационные характеристики, которые делают его привлекательным для проектирования высокоэффективных DC/DC-преобразователей, однако он имеет некоторые отличия, которые не делают его прямой заменой для MOSFET. Ограниченное напряжение управления затвором и отсутствие паразитного внутреннего (параллельного) диода являются только двумя конструкционными проблемами, с которыми придётся столкнуться при использовании GaN-технологии. Специалисты по преобразовательной технике компании затратили много лет на совершенствование конструкции и имеют тысячи часов данных по ресурсным испытаниям для подтверждения надёжности и качества законченной конструкции и отдельных GaN-приборов.

В DC/DC-преобразователях серии SGRB120 применены GaN силовые транзисторы для обеспечения 400-ваттным преобразователям с входным напряжением 100 В параметров мирового класса, наряду с этим соответствуя всем жёстким директивам по снижению номинальных рабочих характеристик для космических применений.

Компания работала с силовыми GaN-транзисторами в течение более 7 лет, выпустив несколько изделий для полётных применений. Партнёрство компании с EPC (Efficient Power Conversion) Space было решающим для продвижения радиационно-стойких GaN-полупроводников для приме-

Таблица 1. Габариты и сопротивление в открытом состоянии GaN-транзисторов и MOSFET

	MOSFET 200 В	GaN FET 200 В	Сравнение
Площадь основания	7,52×10,16 мм	5,7×3,9 мм	В 3,5 раза меньше площадь у GaN-прибора
Сопротивление канала в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$	0,13...0,4 Ом	0,028 Ом	В 4,5 раза больше сопротивление у MOSFET

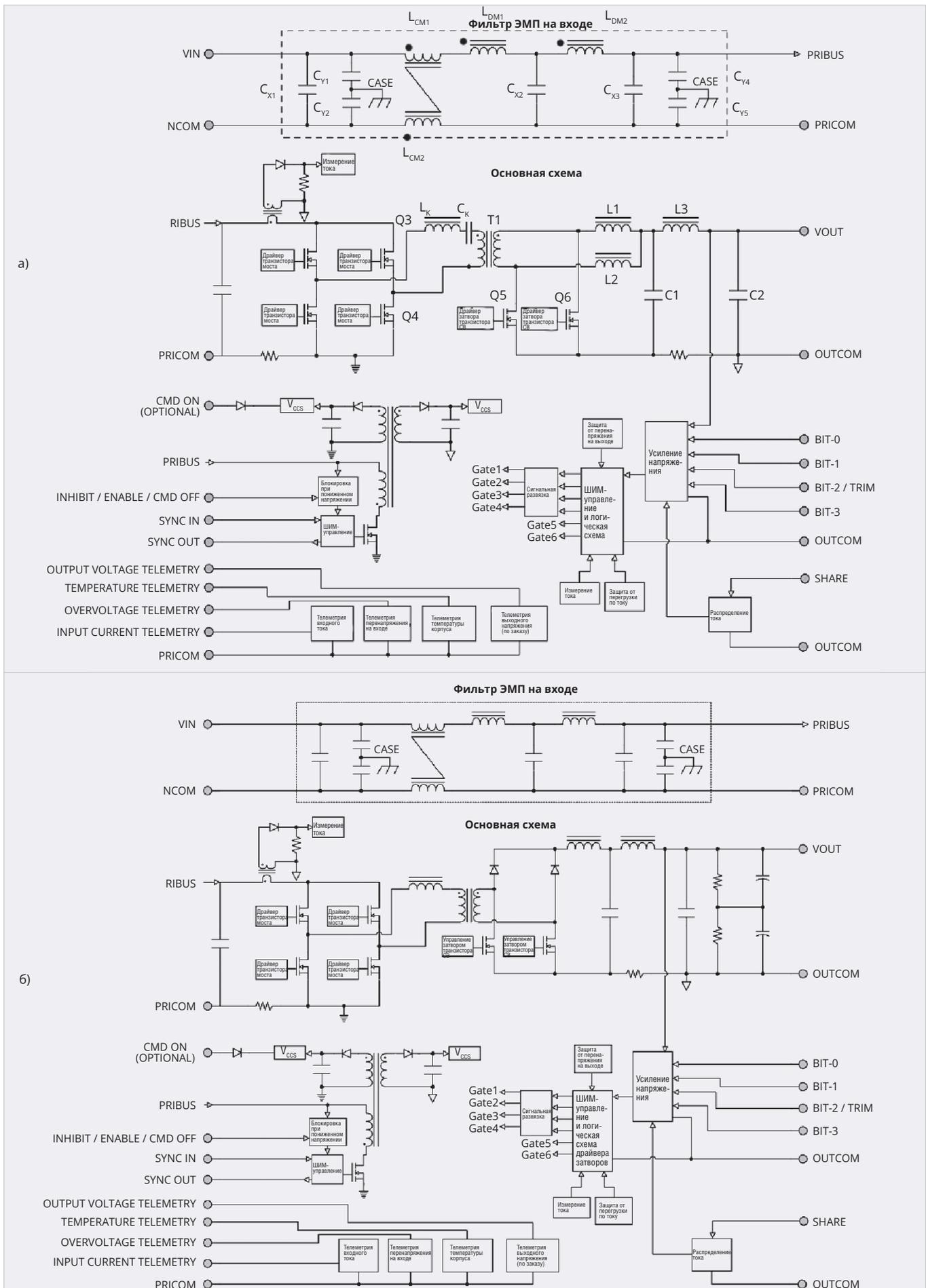


Рис. 1. Структурная схема преобразователей напряжения:  
 а – с выходными напряжениями 15, 18 и 28 В; б – с выходным напряжением 50 В SGRB12050S

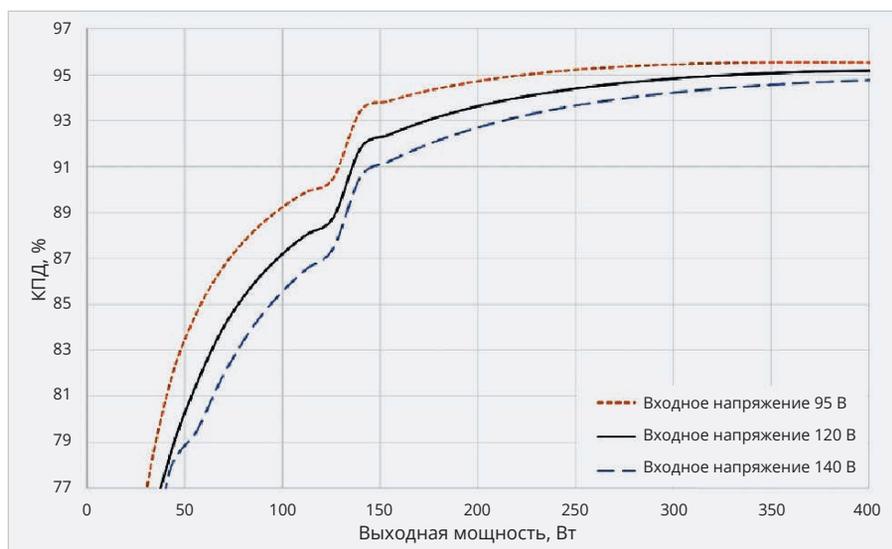


Рис. 2. Зависимость КПД преобразователя от мощности для модуля SGRB12028S при различных входных напряжениях при температуре +25°C

нения в космической промышленности. Далее в статье рассматриваются технические характеристики отмеченных несколькими наградами DC/DC-преобразователей серии SGRB для иллюстрирования улучшений размеров и эффективности, полученных при использовании GaN-транзисторов в сравнении с традиционными транзисторами MOSFET.

Обширный обзор полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия, структура полевого GaN-транзистора, созданного компанией EPC Space, некоторых модульных блоков на основе GaN-транзисторов, конкретных применений электроэнергетических систем в космических проектах сделан в публикациях [1], [2].

## Эффективность

Чрезвычайно высокий КПД и высокую рабочую частоту коммутации возможно обеспечить при использовании GaN-технологии. Приведённые далее данные относятся к модулям серии SGRB12000S, которые выполнены по двухтактной мостовой схеме со сдвигом фазы с рабочей частотой коммутации 500 кГц, имеющими выходной каскад с синхронным выпрямлением. Номинальное входное напряжение модулей 100 В, выходные напряжения 12, 15, 28 и 50 В при выходной мощности 400 Вт. На рис. 1а показана структурная схема моделей преобразователей с выходными напряжениями 15, 18 и 28 В, а на рис. 1б показана схема модели SGRB12050S с выходным напряжением 50 В. В схеме модуля с выходным напряжением 50 В несколь-

ко иначе выполнена схема выходного фильтра (последовательно соединённым конденсаторам параллельно установлены высокоомные резисторы для равномерного распределения напряжения между конденсаторами) и установлены развязывающие диоды в цепях стоков транзисторов синхронного выпрямителя.

Мостовая структура содержит транзисторные GaN-ключи Q1, Q2, Q3 и Q4, управляемые таким образом, что коммутация ключей первичной цепи осуществляется в моменты перехода напряжения через нуль при поддержании постоянной частоты переключения. Включённые последовательно с трансформатором дроссель  $L_k$  и индуктивность рассеяния с разделительным конденсатором  $C_k$  образуют последовательный резонансный контур. Через транзисторные ключи протекают резонансные токи, что позволяет формировать оптимальные траектории переключения транзисторов. Одним из ведущих факторов для высокой эффективности является низкое сопротивление в открытом состоянии нитрид-галлиевых полупроводниковых приборов. Во многих конструкциях специалисты по преобразовательной технике используют быстродействие GaN-компонентов для повышения рабочей частоты. В данном случае была выбрана топология с переключением при нуле напряжения для обеспечения наилучших общих характеристик в отношении размеров.

Для существенного снижения потерь мощности в выходном выпря-

мителе применяется схема синхронного выпрямления на транзисторах Q5 и Q6, которые управляются ШИМ-контроллером и драйверами затворов, расположенными на стороне синхронного выпрямителя, что позволяет уменьшить длительность фронтов управляющих напряжений на затворах транзисторов выпрямителя, что увеличивает КПД. Драйверы затворов, управляющие транзисторами синхронного выпрямителя и мостового стабилизатора, без затруднений способны управлять даже несколькими запараллеленными транзисторами. Управление синхронным выпрямителем посредством контроллера исключает перекрытие зон открытого состояния двух ключей – вводится задержка между сигналами управления синхронных ключей – и устраняет режим короткого замыкания вторичной обмотки, что позволяет повысить КПД из-за исключения токов короткого замыкания. Как отмечалось ранее, у GaN-транзистора нет паразитного диода, и при выключении у него образуется канал с обратной проводимостью. Поэтому для реализации преимущества GaN-транзисторов над кремниевыми MOSFET в синхронном выпрямителе необходимо обеспечить точное управление «мёртвым» временем каскада – интервал между закрытием нижнего ключа и открытием верхнего ключа или интервал времени между закрытием верхнего и открытием нижнего ключа. Потери на проводимость в GaN-транзисторах снижают, уменьшая величину мёртвого времени.

Низкое пороговое напряжение включения и небольшая ёмкость затвора GaN-транзисторов также создаёт некоторые проблемы при управлении ключами мостового преобразователя схемами драйверов.

ШИМ-контроллер, расположенный на вторичной стороне, реализует полный набор видов защит, которые обычно обеспечиваются контроллерами, устанавливаемыми на первичной стороне источника питания. Биполярные интегральные микросхемы изготовлены по технологическому процессу, позволяющему изготавливать быстродействующие приборы, обеспечивающие малые времена переключения силовых ключей, высокую рабочую частоту и малое время реакции источника питания.

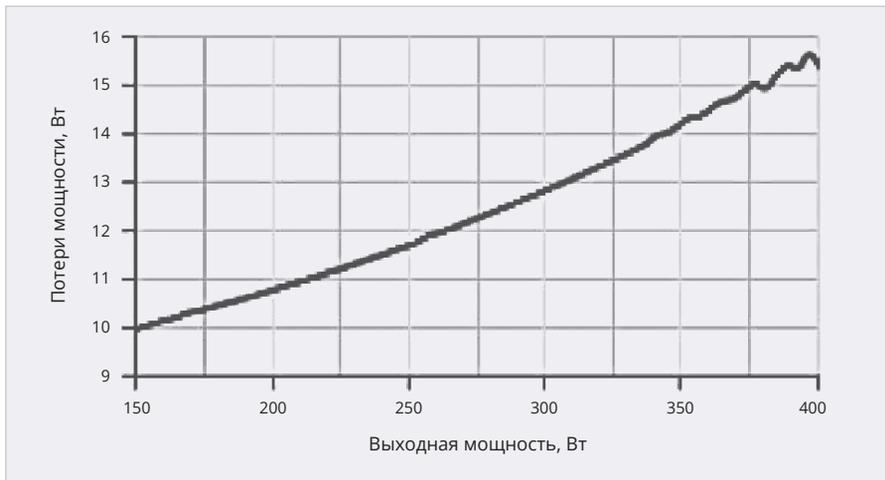


Рис. 3. Зависимость потерь мощности от выходной мощности для преобразователя SGRB12028S при температуре +25°C

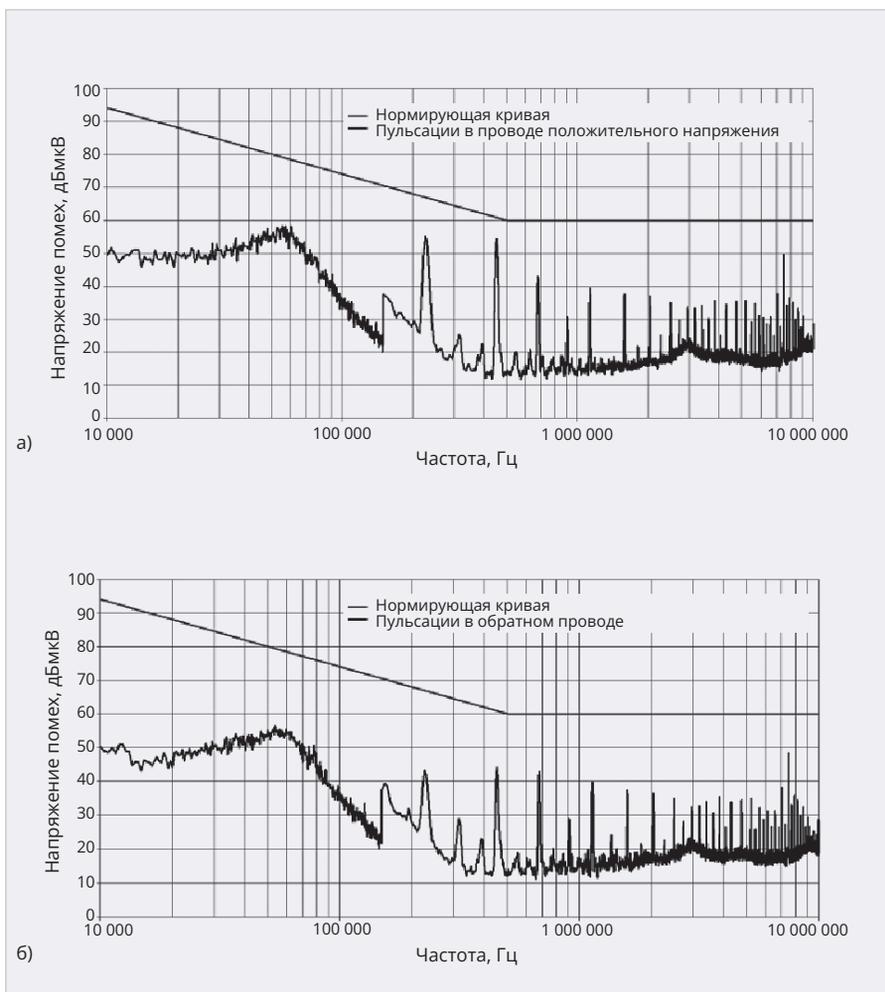


Рис. 4. Уровень кондуктивных помех на входных шинах преобразователя SGRB12028S:

- а) уровень помех в проводе положительного напряжения (Input Bus Positive);  
 б) уровень помех в обратном проводе (Input Bus Return)

В приведённой упрощённой структурной схеме не указан способ осуществления симметрирования процесса перемагничивания сердечника силового трансформатора и исключения эффекта инте-

грирования тока в переходных и аварийных режимах.

На рис. 2 показана зависимость КПД от выходной мощности при комнатной температуре для 400-ваттного модуля DC/DC-преобразователя

SGDRB12028S. График показывает от 75% до полной нагрузки впечатляющее значение КПД – выше 96%. От 50% до полной нагрузки – более чем 95%. Этот показатель является исключительным для DC/DC-преобразователя с нормируемой стойкостью к дозовым эффектам при суммарной накопленной дозе 100 крад и стойкостью к одиночным эффектам при воздействии заряженных частиц с линейными потерями энергии (ЛПЭ) 85 МэВ·мг/см<sup>2</sup>. Это общий КПД, который включает входной фильтр электромагнитных помех, схему управления и измерительные схемы. Высокое значение КПД значительно сокращает рассеяние мощности и, следовательно, тепло, которое генерируется и должно быть удалено системой отвода тепла. На рис. 3 показана зависимость потерь мощности от выходной мощности, измеренная при температуре +25°C.

В фильтре, установленном на входе преобразователя, предусмотрена фильтрация дифференциальных и синфазных помех. Противофазные обмотки  $L_{CM1}$  и  $L_{CM2}$  синфазного дросселя эффективно гасят синфазные составляющие входного тока. Конденсаторы Y типа ( $C_{Y1}$ ,  $C_{Y2}$ ,  $C_{Y3}$ ,  $C_{Y4}$ ) принадлежат к фильтру синфазных помех, а конденсаторы X типа ( $C_{X1}$ ,  $C_{X2}$ ,  $C_{X3}$ ,  $C_{X4}$ ) относятся к фильтру дифференциальных помех. Дискретные дроссели  $L_{DM}$  предназначены для подавления дифференциальной составляющей помехи. Уровни кондуктивных помех при входном напряжении 120 В во входном (Input Bus Positive) и обратном проводе (Input Bus Return) модуля SGRB12028S приведены на рис. 4. Уровни напряжения помех в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц ниже нормирующей кривой категории CE102 стандарта MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, Revision G. Defense Acquisition System. Пределы, указанные в категории CE102, соответствуют именно уровням напряжения и установлены в дБмкВ.

Установленный на выходе двухзвенный LC-фильтр подавляет пульсации выходного напряжения. Пульсации выходного напряжения модуля SGRB12028S составляют 100 мВ (двойная амплитуда). Для дополнительно-

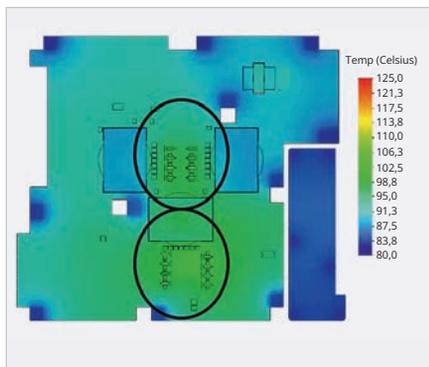


Рис. 5. Температурное моделирование нитрид-галлиевых полупроводниковых приборов в вакууме

го уменьшения пульсаций на выходе можно установить керамический конденсатор небольшой ёмкости от 1 до 10 мкФ. Для большинства применений этого вполне достаточно. Максимальная ёмкостная нагрузка модуля SGRB12028S составляет 100 мкФ. Более высокая выходная ёмкость может привести к проблеме запуска преобразователя, а также уменьшить скорость нарастания выходного напряжения при быстрых изменениях в нагрузке.

У двухтактных стабилизаторов, выполненных по мостовой схеме, частота импульсов на входе сглаживающего выходного фильтра в два раза выше частоты коммутации транзисторов, а переключение силового ключа при нулевом напряжении уменьшает уровень электромагнитных помех. Это обстоятельство позволяет уменьшить номиналы индуктивности дросселей и ёмкостей конденсаторов выходного сглаживающего фильтра при заданной частоте коммутации транзисторов.

### Тепловые параметры

На рис. 5 демонстрируется температурное моделирование печатной платы с температурой основания +85°C на стороне нитрид-галлиевых приборов. GaN-элементы на первичной и вторичной стороне на рисунке обведены кругами. Элементы GaN на первичной стороне (в схеме синхронного выпрямителя) достигают температуры наихудшего случая +103°C, а элементы на вторичной стороне достигают максимальной температуры +100°C. Максимальный перегрев +18°C является приемлемым для 400-ваттного импульсного преобразователя и находится в пределах максимальной рабочей температуры нитрид-галлиевых приборов.

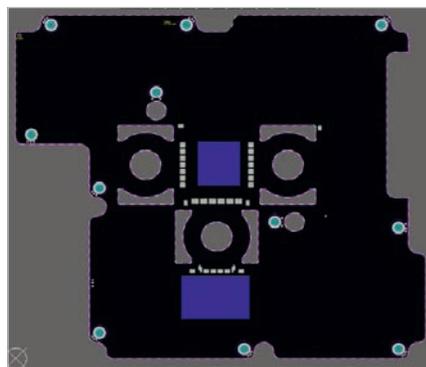


Рис. 6. Печатная плата модуля серии SGRB с установленными GaN-транзисторами

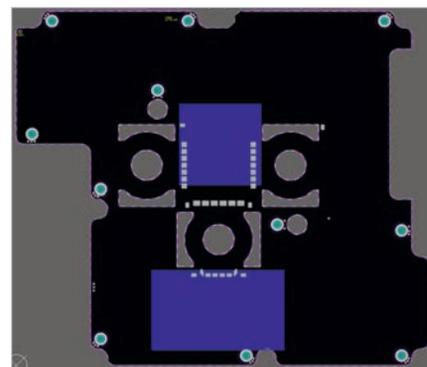


Рис. 7. Печатная плата модуля серии SGRB с установленными транзисторами MOSFET

GaN-транзисторы имеют отличные тепловые характеристики при установке на печатную плату, оптимизированную для получения лучших электрических характеристик. Это достигается с помощью простых, технологичных и экономически эффективных решений.

Модули серии SGRB12000S рассчитаны для работы с полной нагрузкой при температуре +85°C. Функционирование свыше +85°C допускается при сниженной мощности. Более точно, выходная мощность должна снижаться линейно от полной мощности при +85 °C до половинной мощности при температуре +90°C и до нулевой мощности при температуре +95°C. Рабочая температура преобразователя определяется на основании корпуса модуля. Преобразователи спроектированы для отвода тепла за счёт теплопроводности (кондуктивный теплоотвод) при соединении теплоотводящего основания корпуса модуля с радиатором, металлическим шасси или другой теплоотводящей поверхностью.

Величина среднего времени работки до отказа (Mean Time Between Failure, MTBF), модуля SGRB12028S, рассчитанное по стандарту надёжности MIL-HDBK-217F «Reliability Prediction of Electronic Equipment» для условий орбитального космического полёта при температуре окружающей среды +55°C составляет 1 950 000 ч.

### Конструкция и состав серии

Габариты и вес являются важными факторами в любой энергетической системе спутника, так как оба параметра непосредственно связаны со стоимостью запуска. Конструкция полного моста со сдвигом фазы требует суммар-

но 6 коммутирующих ключей. Для того чтобы достичь высокого КПД, применяются составные силовые ключи, соединённые параллельно, не только для распределения тепла, но также для понижения потерь проводимости. Было обнаружено, что оптимальная эффективность проявляется за счёт уменьшения потерь проводимости, когда на первичной стороне размещено параллельно два GaN-транзистора, а вторичная сторона имеет четыре GaN-транзистора, включённых параллельно. Таким образом, общее число GaN-транзисторов – 16. Применение такого количества MOSFET транзисторов в корпусах SMD-0.5 потребовало общей площади 1222 мм<sup>2</sup> по сравнению с 355 мм<sup>2</sup> для нитрид-галлиевых устройств. При использовании MOSFET площадь в 3,4 раза больше, с более высоким  $R_{DS(ON)}$  и более высокими потерями проводимости.

На рис. 6 выделена компоновка печатной платы, голубые квадраты представляют площадь, которую занимают нитрид-галлиевые устройства. Так как площадь должна быть оставлена для трассировки сигналов управления затворами и рассеивания тепла, устройства не могут размещаться, касаясь друг друга.

На рис. 7 показана такая же компоновка печатной платы с синими квадратами, представляющими повышенную площадь при использовании MOSFET-транзисторов в корпусах SMD-0.5. Из сравнения схем ясно, что повышенный размер будет форсировать увеличение общего размера конструкции, которая также увеличит вес и стоимость.

Конструктивно преобразователь выполнен на многослойной печатной плате, на которой размещены силовые транзисторы, микросхемы

в корпусах для поверхностного монтажа; силовой трансформатор, развязывающий трансформатор, дроссель выполнены на низкопрофильном сердечнике с плоскими печатными обмотками. Печатная плата размещается в алюминиевый корпус с никелевым покрытием. Разъёмы для подключения модуля к системе управления расположены на боковых стенках корпуса. Предлагается два вида конструкций корпуса – для вертикального и горизонтального монтажа (рис. 8). Габаритные размеры корпуса для вертикального монтажа – 173,39×151,9×19,05 мм, вес 850 г, исполнение для горизонтальной установки имеет размеры 161,29×139,7×19,4 мм (вес 765 г).

Алюминиевый корпус обеспечивает дополнительную защиту полупроводниковых компонентов от воздействия ионизирующих излучений космического пространства естественных радиационных поясов Земли – от воздействия дозы электронов и протонов.

В табл. 2 представлены основные технические характеристики модулей серии SGRB120. Но возможно изготовление преобразователей напряжения в соответствии с техническими условиями заказчика.

## Сервисные функции

Для безопасной эксплуатации и расширения возможностей практического использования модули серии SGRB120 снабжены обширным набором сервисных и защитных функций.

## Управление включением/выключением

### Функция запрета (INHIBIT)

Сигнал внешнего управления на вход INHIBIT со стороны первичной цепи подаётся относительно входной «силовой земли» PRICOM. Сигнал низкого уровня на этом входе блокирует выход преобразователя, снимает напряжение смещение с внутренних схем управления и устанавливает



Рис. 8. Внешний вид конструкции преобразователей напряжения серии SGRB120 (крышка снята), созданных с применением нитрид-галлиевой технологии

преобразователь в состояние минимального потребления тока от внешнего источника. Размыкание сигнала управления на выводе INHIBIT (обеспечивается на входе логическая 1) разблокирует выход, позволяя преобразователю функционировать в нормальном режиме. К выводу должно быть приложено напряжение ниже 1,5 В для блокировки выходного канала. Если вывод не используется, он должен быть оставлен в разомкнутом состоянии.

### Сигнал включения (ENABLE)

В качестве альтернативы сигналу INHIBIT вывод управления ENABLE, расположенный на первичной стороне, подаётся относительно входной «силовой земли» PRICOM. Когда вход находится в разомкнутом состоянии, блокируется выход преобразователя, снимается напряжение смещения со всех внутренних схем управления, и преобразователь устанавливается в состояние минимального потребления тока. Если же вывод переводится на уровень логического «0», выход преобразователя разблокируется, позволяя преобразователю работать в нормальном режиме. К выводу должно быть приложено напряжение ниже 0,75 В для активирования

выхода. В том случае, когда вывод не используется, он должен быть закорочен на шину силовой земли PRICOM.

### Команда включения/выключения (Command On & Off)

В качестве альтернативы INHIBIT преобразователь взамен может быть сконфигурирован использованием схем Command On и Command Off. Для включения выходного канала в качестве сигнала Command On применяется номинальное напряжение 28 В. Для включения внутренних схем преобразователя SGRB12000S требуется источник с выходным током 400 мА. Сигнал должен быть приложен минимум в течение 40 мс и входное напряжение для включения преобразователя должно быть в номинальном диапазоне от 95 до 140 В.

Для выключения преобразователя используется сигнал Command Off с номинальным напряжением 28 В. Для гарантированного выключения сигнал должен иметь минимальную длительность 40 мс. Если было выполнено выключение сигналом Off, для обратного включения преобразователя должен быть повторён сигнал Command On.

Невозможно сконфигурировать преобразователь для применения нескольких вариантов сигналов включения/выключения; только один вариант должен быть выбран при заказе.

### Регулировка выходного напряжения

### Двоичный код (биты)

Необходимое значение выходного напряжения преобразователя может

Таблица 2. Основные характеристики модулей серии SGRB120

Модель	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Мощность, Вт	КПД (тип.), %	Пульсация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ
SGRB12015S	14,74...15,28	24	396	93,5	85
SGRB12018S	17,69...18,32	22,2	400	93,5	100
SGRB12028S	27,51...28,49	14,3	400	95	100
SGRB12050S	49,12...50,88	9	400	95	200

быть установлено одним из двух способов. В том случае, когда преобразователь сконфигурирован, чтобы использовать двоичный код, четыре высокоимпедансных входа (Bit-0, Bit-1, Bit-2, Bit-3) должны быть установлены в низкое состояние для изменения выходного напряжения в соответствии с заданными кодами (приведены в справочном листке). Значение выводов BIT отсчитывается относительно выходной силовой земли OUTCOM. Каждый вывод, оставленный разомкнутым, будет подтянут внутренней схемой к уровню 10 В через резистор 40 кОм, что переводит этот разряд в высокий уровень. Состояния на выводах BIT могут изменяться, когда выходной канал модуля SGRB активирован.

### Регулировка внешним резистором TRIM

Если преобразователь сконфигурирован для использования регулируемого резистора, в таком случае резистор соответствующего номинала может быть подключён между выводами TRIM и OUTCOM для регулирования выходного напряжения в соответствии с данными в таблице (приведена в справочном листке). Для соответствия точностным параметрам следует применять резисторы с точностью 0,1%.

Невозможно сконфигурировать преобразователь для применения обоих вариантов: может быть выбран только один вариант.

### Синхронизация частоты преобразования (SYNC IN, SYNC OUT)

Для обеспечения оптимальных параметров преобразователей серии SGRB1200S они работают с частотой переключения примерно 450 кГц (от 400 до 500 кГц). Преобразователи серии SGRB12000S снабжены входом синхронизации (SYNC IN) и выходом синхросигнала (SYNC OUT), оба сигнала отсчитываются относительно «силовой земли» PRICOM. Вход может управляться внешним генератором синхросигнала или выходным сигналом с вывода SYNC OUT другого преобразователя серии SGRB. Внутренний генератор и внутренний силовой каскад будут работать на частоте синхросигнала, поданного на вход SYNC IN. Коэффициент заполнения прямоугольных синхросигнала дол-

Таблица 3. Испытания на радиационную стойкость и уровни факторов

Радиационная среда		Приёмочные радиационные испытания (RLAT) партии полупроводниковых элементов	Определение параметров стойкости на уровне модуля
Суммарная поглощённая доза	Высокая мощность дозы	100 крад	100 крад
Суммарная поглощённая доза	Низкоинтенсивное облучение	100 крад	100 крад
Одиночные эффекты (SEE)	Катастрофические отказы (SEB, SEGR, SEL)	Не применяется	≥ 85 МэВ·см <sup>2</sup> /мг
	Обратимые отказы (SET, SEU, SEF)	Не применяется	≥ 85 МэВ·см <sup>2</sup> /м
Эффекты смещения атомов в полупроводниковом материале из устойчивых положений в кристаллической решётке		Флюенс 5×10 <sup>11</sup> нейтронов/см <sup>2</sup>	Флюенс 5×10 <sup>11</sup> нейтронов/см <sup>2</sup>

жен быть в диапазоне от 40 до 60%. Для исключения попадания шумов через этот вход необходимо использовать правильную компоновку элементов и разводку печатной платы. Для обеспечения устойчивой работы преобразователя частота внешнего синхросигнала должна быть больше рабочей частоты ШИМ-контроллера – от 500 до 550 кГц. Синхронизация частоты применяется при параллельно включённых преобразователях для исключения выброса в пульсации выходного напряжения, когда выходные пульсации отдельных модулей оказываются в одной фазе [3].

Синхронизированные преобразователи следует размещать физически как можно ближе друг к другу и совместно использовать низкоимпедансное соединение с общим проводом PRICOM. В том случае, когда вывод SYNC IN не используется, он может быть оставлен разомкнутым или соединён с общим проводом PRICOM.

На отсутствие в большинстве отечественных радиационно-стойких источников питания (за редким исключением) входа синхронизации указывают российские разработчики бортовой аппаратуры космических аппаратов [4]. Применение таких источников питания в космической технике требует разработки дополнительных схем синхронизации и дополнительных обвязывающих элементов, что также сказывается на массогабаритных характеристиках бортовой аппаратуры. Разработчики унифицированных модулей питания не одобряют режима синхронизации частоты внешним синхросигналом во избежание проблем и отказов, так как пользователь может подать некорректный сигнал – не заданной

амплитуды, формы и допустимого диапазона частот [5].

Режим синхронизации частоты внешним синхросигналом не является необходимым, если это не оговорено системными ограничениями.

### Параллельное соединение (SHARE)

Модули серии SGRB12000S имеют вход SHARE для активного равномерного распределения тока между параллельно соединёнными модулями. Для активирования распределения нагрузки выводы SHARE всех параллельно соединённых модулей подключаются одним проводом. Параллельно соединённые модули следует размещать как можно ближе друг к другу и использовать совместно низкоимпедансное соединение с общим проводом OUTCOM. Симметричная топология выходных дорожек улучшит точность распределения тока. Если вывод не используется, его оставляют разомкнутым.

### Защитные функции

Наличие интегрированных схем защиты у преобразователей, предназначенных для эксплуатации в жёстких условиях космического пространства, позволяет повысить безопасность работы.

### Блокировка при пониженном напряжении на входе

При входном напряжении ниже напряжения включения, преобразователь остаётся в выключенном состоянии, потребляя минимальный ток от первичного источника. Когда входное напряжение превысит напряжения включения, преобразователь включится. Схема блокировки разработана чтобы выдерживать медленное нараста-

Таблица 4. Краткое изложение программы обеспечения радиационной стойкости (RHA)

Процедура испытания	Программа RHA для изолированных DC/DC-преобразователей серии SGRB
Суммарная поглощённая доза	Чувствительные полупроводниковые компоненты подвергаются испытаниям на стойкость к эффекту полной накопленной дозы до 100 крад согласно разделу Method 1019.6 Ionizing Radiation (Total Dose) Test Procedure стандарта MIL-STD-883F. Преобразователи квалифицированы до 100 крад (Si)
Длительное воздействие низкой мощности дозы (ELDRS)	Все биполярные ИМС испытывались. Преобразователи испытывались при длительном воздействии низкой мощности дозы (ELDRS) в соответствии с MIL-STD-883F Метод 1019.6 раздел 3.13 (воздействующая мощность дозы $\leq 50$ рад/с)
Одиночные эффекты (SEE)	Преобразователи квалифицированы до ЛПЭ $\geq 85$ МэВ·см <sup>2</sup> /мг для катастрофических одиночных эффектов (SEL, SEB, SEGR) и для SEFI (одиночный эффект функционального прерывания) при воздействии тяжёлых ионов. Преобразователи также анализировались по сечениям одиночных переходных эффектов SET (переходная ионизационная реакция в виде импульсов напряжения в выходных цепях) при различных значениях ЛПЭ в наихудших случаях
Испытание на стойкость к радиации партии компонентов (RLAT)	Все партии чувствительных полупроводниковых элементов подвергаются выборочным испытаниям по стойкости к суммарной поглощённой дозе при большой мощности дозы и/или низкой мощности дозы, как это предусмотрено для типа компонента

ние входного напряжения. Схема немедленно выключит выходное напряжение, как только входное напряжение опустится ниже порогового напряжения 87 В. Когда входное напряжение находится в диапазоне ниже 94 В и выше порогового напряжения выключения, модуль будет работать, но технические параметры могут не соответствовать нормированным электрическим характеристикам.

### Плавное нарастание выходного напряжения

Функция плавного запуска (soft start) используется в модулях для обеспечения нарастания выходного напряжения в контролируемом режиме, устраняющем перерегулирование выходного напряжения и ограничивающим пусковой ток при включении. Плавный запуск в режиме регулирования по напряжению обеспечивает постоянство формы выходного напряжения безотносительно изменению тока нагрузки. Время установления выходного напряжения приблизительно 30 мс. При нормальных условиях ток, втекающий из первичного источника энергии при включении, не превышает входного тока при полной нагрузке. Время задержки включения отсчитывается от момента приложения входного напряжения (передний фронт сигнала INHIBIT, задний фронт сигнала ENABLE или

передний фронт сигнала Command On) до достижения выходным напряжением 90% от установившегося значения.

### Защита от перегрузки

Модули серии SGRB1200S содержат интегрированную схему защиты от перегрузки и короткого замыкания. Если сопротивление нагрузки оказывается небольшим в результате неисправности, схема управления постоянным выходным током уменьшает коэффициент заполнения частоты для ограничения выходного тока до приблизительно 125% его номинального значения. Преобразователь продолжит выдавать ток в режиме перегрузки или короткого замыкания. Эта функция позволяет преобразователю запускаться при любой ёмкостной нагрузке. Восстановление нормального режима осуществляется автоматически и немедленно после устранения аварийного режима. Длительная работа при коротком замыкании или перегрузке может вызвать рассеяние чрезмерной тепловой мощности. Следует уделять внимание контролю рабочей температуры преобразователя в этих условиях.

### Функции дистанционного измерения параметров (телеметрия)

Измерительные схемы обеспечивают измерение температуры, выход-

ного напряжения (по заказу), перенапряжения на выходе, входного тока и формирования аналоговых сигналов для передачи в систему управления.

### Гарантирование радиационной стойкости

Применяется традиционный подход к радиационным испытаниям компонентов на радиационную стойкость для гарантирования технических характеристик при воздействии радиационных факторов космического пространства. Программа по гарантированию радиационной стойкости (Radiation Hardness Assurance, RHA) компании, утверждённая Департаментом материально-технического снабжения МО США, подтверждает документами методы и процедуры для гарантирования технических параметров при воздействии различных радиационных факторов космического пространства, включая суммарную накопленную дозу, одиночные эффекты. Кроме того, принимаются во внимание эффекты восприимчивости к длительному воздействию низкой мощности дозы (Enhanced Low Dose-Rate Sensitivity, ELDRS) всех биполярных ИС, используемых в преобразователях серии SGRB. Стойкость гарантируется сочетанием исследований на уровне преобразователя и радиационных испытаний партий всех чувствительных полупроводниковых компонентов (Radiation Lot Acceptance Testing, RLAT), применяющихся в преобразователе. В табл. 3 и 4 представлены результаты испытаний компонентов и преобразователей и краткий обзор программы гарантирования радиационной стойкости (RHA).

### Отбраковочные испытания

С целью выявления потенциально ненадёжных изделий проводятся отбраковочные испытания изделий.

Термоциклирование – температура окружающей среды меняется в диапазоне от  $-35^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Изменение температуры осуществляется со скоростью  $5^{\circ}\text{C}$  в минуту, выдержка в течение 30 минут. Термоциклы (количество циклов 10) позволяют ускорить скрытые дефекты в конструкции.

Случайная вибрация – испытания по трём осям XYZ в течение 60 с, сред-

неквадратическое значение ускорения 7,4g.

Окончательный контроль по электрическим параметрам проводится при температурах  $-35^{\circ}\text{C}$ ,  $+25^{\circ}\text{C}$  и  $+85^{\circ}\text{C}$ .

## Заключение

Повышение эффективности и уменьшение веса определяли тенденцию к возрастанию в отрасли производства радиационно-стойких преобразователей напряжения на протяжении более десятилетия. Традиционные радиационно-стойкие MOSFET-транзисторы не позволяли получить эти улучшения и требуют все больше усилий для приобретения. Недавнее внедрение GaN-транзисторов на рынок предложило многообещающие результаты в повышении эффективности, уменьшении веса и размеров. В статье были выделены преимущества использования GaN-транзисторов над традиционными MOSFET-структурами для источников питания используемых в высоконадёжном космическом оборудовании.

В общем, нитрид-галлиевые устройства могут быть отличным выбором для повышения рабочих характеристик и уменьшения габаритов импульсных источников питания. Тем не менее они создают специфические проблемы при конструировании и поэтому не являются решением на все случаи жизни. Компания VPT была одним из первых приверженцев этой технологии и в большой степени инвестировала в исследование и развитие энергетических систем, основанных на нитрид-галлиевых приборах. В результате работы было создано несколько заказных изделий, которые были реализованы для применения в космических полётах. Первыми стандартными DC/DC-преобразователями, который полностью основаны на GaN-технологии, являются модули серии SGRB. Она включает многие усовершенствования конструкции и улучшений для повышения надёжности, которые были приобретены по результатам опытно-конструкторских работ с нитрид-галлиевой технологией.

## Литература

1. Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 1. Питание КА, общие принципы // Силовая электроника. 2019. № 6.
2. Рентюк В. Системы питания и перспективы использования GaN в космических аппаратах. Часть 2: питание КА, практические решения // Силовая электроника. 2020. № 1.
3. Миронов А.А. Эволюция технических требований к унифицированным модулям питания // Современная электроника. 2019. № 6.
4. Краснов М., Лукьянов Е., Авсюкевич Д. и др. Специализированные источники вторичного электропитания для космической промышленности // Силовая электроника. 2023. № 2.
5. Миронов А.А. Синхронизация частоты преобразования унифицированных модулей питания с ШИМ-контроллером внешним синхросигналом // Практическая силовая электроника. 2018. № 3 (71).



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### Миниатюрные гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи для применения в аппаратуре специального назначения

Компактные гибридно-плёночные DC/DC преобразователи серий LDWI, LPT/12, LPT/15, LPT/30 и LFX, предлагаемые ХМТИ (Xi'an Microelectronics Technology Institute – Сианьский технологический институт микроэлектроники), созданы с применением одноканальной обратно- и прямоходовой топологий.

В устройствах реализуется активное ограничение напряжения на силовых компонентах схемы, а для повышения КПД на выходе применяется синхронное выпрямление.

Применение оптоэлектронной гальванической развязки в цепи обратной связи позволяет исключить трансформатор, что содействует миниатюризации. КПД преобразования напряжения до 90% (в отдельных моделях), а удельная мощность 3060 Вт/дм<sup>3</sup> без учёта теплоотвода для моделей серии LFX.

Интегрированы схемы защиты от пониженного входного напряжения, перегрузки по току. Функция дистанционного выключения при помощи специального вывода повышает гибкость применения преобразователей в системе электропитания, позволяя ре-

ализовать определённый алгоритм подачи питания к отдельным узлам системы. Функция точной настройки выходного напряжения обеспечивается подключением подстроечного резистора. Синхронизация частоты работы преобразователей в системе внешним сигналом (для модулей серии LPT/30) позволяет уменьшить пульсации потребляемого устройствами тока. Для снижения уровня помех на входных проводниках рекомендуется использовать фильтрующие модули, которые обеспечивают соответствие нормам напряжения помех CE102 согласно национальному стандарту GJB151A 97 (в некоторой степени соответствует стандарту MIL-STD-461).

Модули предназначены для применения в системах электропитания военной, авиационной и ракетной техники, а также в иных специализированных областях, где критична компактность оборудования.

#### Основные параметры:

- толстоплёночная гибридная технология, обеспечивающая высокую плотность упаковки компонентов в бескорпусном исполнении и высокую степень герметичности изделия;
- диапазон рабочих температур от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  (на основании корпуса);
- входное напряжение: 16–36 В, 16–40 В, 16–50 В; номинальное значение – 28 В;



- выходные мощности: 3, 12, 15, 30 и 50 Вт;
- высокая удельная мощность и КПД (до 90%);
- сервисные функции:
  - дистанционное выключение внешним сигналом со стороны входа;
  - блокировка при пониженном входном напряжении;
  - защита от короткого замыкания;
  - синхронизация частоты преобразования внешним сигналом (для серии LPT/30);
  - регулировка выходного напряжения (для одноканальных моделей серии LFX);
  - высокоэффективное синхронное выпрямление.

Для получения дополнительной информации по продукции ХМТИ вы можете обращаться по электронной почте [info@prochip.ru](mailto:info@prochip.ru).



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### Высокотемпературные гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи

Для таких применений, где возникает необходимость работы при температурах до +175°C, XMTI (Xi'an Microelectronics Technology Institute) предлагает специальную серию устройств.

Для минимизации сопротивления теплопередачи от элементов конструкции к поверхности теплоотвода и обеспечения герметичности модули серий LCH, LSA и LHF с выходными мощностями 5–20 Вт выполнены по толстоплёночной гибридной технологии.

В одноконтурных обратных модулях для повышения КПД (86% у 20-ваттных моделей) и уменьшения габаритов корпуса применяются методы: активное ограничение напряжения на элементах схемы,

синхронные выпрямители на основе МДП-транзисторов, схемы возврата энергии в первичный источник. Имеется оптронная гальваническая развязка, что также позволяет уменьшить размеры изделия.

Напряжение питания модулей 15–50 В с допустимыми выбросами до 80 В длительностью 1 с (серии LHF+ и LHF). Удельная мощность преобразователей на уровне зарубежных изделий – 2430 Вт/дм<sup>3</sup> для 20-ваттных моделей.

#### Основные параметры высокотемпературных модулей:

- гибридно-плёночная технология, обеспечивающая высокую плотность упаковки компонентов и герметичность конструкции;
- эксплуатация при температурах от –55°C до +175°C;
- диапазон входного напряжения 15–50 В;
- выходные мощности 5–20 Вт;



- сервисные и защитные функции: дистанционное управление включением и выключением со стороны входа; блокировка при пониженном входном напряжении; защита от короткого замыкания.

Для получения дополнительной информации по продукции XMTI обращайтесь по электронной почте [info@prochip.ru](mailto:info@prochip.ru).



#### Основные характеристики высокотемпературных DC/DC-преобразователей

Модель	Выходная мощность, Вт	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	КПД (тип.) %	Масса, г	Габариты корпуса, мм
LCH2805S-H	5	15–50	5	1	76	13,5	25,24×20,76×6,73
LCH2812S-H	5	15–50	12	0,417	77	13,5	25,24×20,76×6,73
LCH2815S-H	5	15–50	15	0,333	78	13,5	25,24×20,76×6,73
LCH2805D-H	5	15–50	±5	±0,5	78	13,5	25,24×20,76×6,73
LCH2815D-H	5	15–50	±15	±0,166	75	13,5	25,24×20,76×6,73
LSA2805S-H	8	15–50	5	1,6	78	20	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2805SF-H	8	15–50	5	1,6	78	23	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LSA2812S-H	8	15–50	12	0,66	80	25	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2812SF-H	8	15–50	12	0,66	80	25	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LSA2815S-H	8	15–50	15	0,53	80	25	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2815SF-H	8	15–50	15	0,53	80	25	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LSA2805D-H	8	15–50	±5	±0,8	78	25	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2805DF-H	8	15–50	±5	±0,8	78	25	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LSA2812D-H	8	15–50	±12	±0,33	80	25	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2812DF-H	8	15–50	±12	±0,33	80	25	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LSA2815D-H	8	15–50	±15	±0,26	80	25	27,51×27,51×7,1 (без фланцев)
LSA2815DF-H	8	15–50	±15	±0,26	80	25	38,7×27,51×7,1 (с монтажными фланцами)
LHF+2805S-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5	3	84	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2805SF-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5	3	84	30	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+285R2S-H	18	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5,2	3,46	84	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+285R2SF-H	18	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5,2	3,46	84	30	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2806S-H	18	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	6	3	84	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2806SF-H	18	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	6	3	84	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2812S-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	12	1,67	83	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2812SF-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	12	1,67	83	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2815S-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	15	1,34	85	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2815SF-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	15	1,34	85	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2805D-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±5	±1,5	81	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2805DF-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±5	±1,5	81	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2812D-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±12	±0,84	85	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2812DF-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±12	±0,84	85	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF+2815D-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±15	±0,67	86	29	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF+2815DF-H	20	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	±15	±0,67	86	33	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF28512T-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5/±12	1,5/±0,312	78	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF28512TF-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5/±12	1,5/±0,312	78	32	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)
LHF28515T-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5/±15	1,5/±0,25	78	30	36,96×26,58×8,38 (без монтажных фланцев)
LHF28515TF-H	15	15–50, допускаются выбросы напряжения до 80 В длительностью 1 с	5/±15	1,5/±0,25	78	32	50,8×26,58×8,38 (с монтажными фланцами)