

Высокоэффективные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи с низковольтными выходами — оптимальное решение для современных цифровых нагрузок

В статье представлены радиационно-стойкие (RAD-Hard) DC/DC-преобразователи серии GH компании International Rectifier, мирового лидера в технологии управления электропитанием. Новые 50-Вт устройства разработаны для максимизации КПД в бортовой аппаратуре космических аппаратов со сроками активного существования до 15 лет.

В качестве высокоэффективного решения с низкими выходными напряжениями преобразователи серии GH предназначены для удовлетворения требований к сокращению полной массы и габаритов системы, наряду с возрастающими требованиями ПЛИС FPGA и других цифровых схем для электронного оборудования космических аппаратов к стабильности напряжения. Статья написана по материалам, предоставленным компанией International Rectifier [1].

Виктор ЖДАНКИН
info@prochip.ru

Введение

Для применения в основных бортовых системах космических аппаратов (система сигнальной обработки, центральный бортовой компьютер, аппаратура ввода/вывода информации) радиационно-стойких процессоров, элементов памяти и функциональных логических элементов, для питания которых используются пониженные напряжения от 3,3 до 1 В и менее, нужны высокоэффективные импульсные источники питания, способные обеспечивать стабильным напряжением цифровые микросхемы с импульсными токами потребления. Большие обрабатываемые потоки данных в каждой из подсистем космического аппарата (КА) приводят к увеличению энергопотребления, что влечет за собой необходимость повышения мощности источников питания и КПД системы электропитания. Применение распределенной системы электропитания с использованием POL-преобразователей (point-of-load, преобразователи без гальванической развязки), которые размещаются в непосредственной близости от питаемого функционального узла, является вариантом, обеспечивающим оптимальные характеристики системы. Принципы построения распределенных систем электропитания, их преимущества и недостатки подробно рассмотрены в многочисленных публикациях, например [2–6].

Современные радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи типа POL и DC/DC-преобразователи с гальванической развязкой между первичной и вторичной цепями, применяемые для создания бортовых распределенных и частично централизованных систем электропитания с промежуточной шиной, а также возможные варианты построения этих систем питания рассматривались в публикациях [7, 8]. Поэтому в статье будет подробно представлен новейший 50-Вт радиационно-стойкий DC/DC-преобразователь серии GH компании International Rectifier, предназначенный для питания цифро-

вых микросхем и формирования низковольтной промежуточной шины с номинальным напряжением 5 В, к которой подключаются понижающие POL-преобразователи, обеспечивающие стабилизированным электропитанием цифровую нагрузку (напряжения в диапазоне от 2,5 до 0,8 В).

Общее описание DC/DC-преобразователя серии GH

GH — это семейство радиационно-стойких низковольтных одноканальных DC/DC-преобразователей. Их основные достоинства — высокое значение КПД, небольшие габаритные размеры и небольшая масса. Преобразователи разработаны для непрерывной работы с выходным током до 20 А или максимальной мощностью 50 Вт без снижения мощности в широком температурном диапазоне в условиях воздействия радиации с суммарной накопленной дозой радиации 100 крад (Si) и линейными потерями энергии (ЛПЭ) высокоэнергетичных частиц 82 МэВ·см²/мг.

DC/DC-преобразователь серии GH выполнен по толстопленочной гибридной технологии в виде герметизированного модуля. При производстве использованы методы проектирования конструкции и процессы, которые успешно применяются компанией International Rectifier при создании изделий силовой электроники для космической аппаратуры в течение почти 20 лет.

Модули DC/DC-преобразователей серии GH — это стандартные изделия, соответствующие требованиям к изделиям для применения в бортовой аппаратуре спутников и зондов для исследования дальнего космоса, спутников для работы на геостационарных орбитах и стратегического оружия. Они предназначены для использования в качестве стандартных блоков для системных разработок, требующих высоких показателей эффективности. Преобразователи явля-

ются изделиями класса К (для космического применения) согласно классификации по техническим условиям MIL-PRF-38534.

Конструкция изделия эффективна, компактна, удобна для интеграции в систему и предназначена для применений в условиях космического полета. Она обеспечивает превосходную эффективность и технические показатели, отвечающие требованиям к электропитанию современных цифровых нагрузок. Преобразователи являются оптимальным решением для применения в качестве источника питания для нескольких регуляторов типа POL или в качестве преобразователей с гальванической развязкой, формирующих отдельные напряжения непосредственно для цифровых нагрузок от шины питания космического аппарата.

Ключевые свойства

DC/DC-преобразователи серии GH — это законченные устройства, готовые для системной интеграции в большинство типичных применений. На рис. 1 показан внешний вид интегрально-гибридного DC/DC-преобразователя серии GH. Все компоненты, используемые в конструкции преобразователя, тщательно отобраны и сертифицированы для обеспечения надежной работы в условиях воздействия радиации. При разработке конструкции анализировались результаты электрического и температурного воздействия, показатели надежности изделия, аварийные режимы и влияние отказов компонентов на функционирование изделия, а также эксплуатационные характеристики преобразователя при воздействии наихудшего сочетания внешних факторов. Все отчеты по этим исследованиям стандартны и предоставляются по запросу.

Основные технические параметры DC/DC-преобразователей серии GH:

- Накопленная доза — >100 крад по объемному кремнию.
- Отсутствие одиночных эффектов (SEL/SEB/SET) от воздействия высокоэнергетических частиц при значениях линейных потерь энергии >82 МэВ·см²/мг.
- Диапазон входного напряжения — 18–40 В.
- Выходные напряжения с номинальными значениями 1; 1,5; 1,8; 2,5; 3,3 и 5 В.
- Суммарная нестабильность выходного напряжения — ±3%.
- Выходная мощность — до 50 Вт или максимальный ток нагрузки 20 А без снижения мощности.
- Синхронное выпрямление обеспечивает КПД до 87%.
- Трансформаторная развязка в контуре обратной связи.
- Диапазон рабочих температур (корпус) — -55...+85 °С.
- Встроенный помехоподавляющий фильтр на входе.
- Внешняя обратная связь.



Рис. 1. Внешний вид DC/DC-преобразователя серии GH

- Фиксированная частота преобразования — 500 кГц.
- Регулировка выходного напряжения внешними резисторами в диапазоне ±10% от номинального значения.
- Дистанционное управление включением/выключением.
- Защита от пониженного входного напряжения.
- Защита от перегрузки по току и короткого замыкания.
- Низкий уровень пульсаций обеспечивается встроенным входным фильтром и многосвязным фильтром на выходе.
- Мягкий запуск.
- Вход и выход сигнала синхронизации.
- Значение среднего времени наработки на отказ (MTBF) >5,8 млн часов рассчитано для условий космического полета при температуре окружающей среды +35 °С.
- Габариты (Д×Ш×В) — 88,9×63,5×12,07 мм с учетом длины выводов и размеров монтажных проушин.
- Небольшая масса <110 г (max).

Модели со стандартными выходными напряжениями

Доступные модели DC/DC-преобразователей серии GH со стандартными выходными напряжениями, мощностями, кодами для заказа и номерами SMD представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики DC/DC-преобразователей серии GH

Код для заказа	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Выходная мощность, Вт	КПД (тип.), %	Номер SMD
GH2801S	1	20	20	73	—
GH2801R5S	1,5	20	30	75	—
GH2801R8S	1,8	20	36	78	—
GH2802R5S	2,5	20	50	84	—
GH2803R3S	3,3	15,2	50	85	5962-10217
GH2805S	5	10	50	87	5962-10219

Модели с выходными напряжениями 3,3 и 5 В являются устройствами, которые соответствуют техническим требованиям по классу К с номерами SMD, присвоенными DLA (Defense Logistics Agency, Агентство материально-технического снабжения МО США).

Топология конструкции

Структурная схема DC/DC-преобразователя серии GH показана на рис. 2.

Топология преобразователя использует режим управления по пиковому току и возможности двухтактной структуры с поочередной работой полуобмоток трансформатора (структура типа push-pull) и выходным каскадом с удвоением тока. Для максимизации КПД в преобразователе применяется синхронное выпрямление, а также патентованная схема контура обратной связи с трансформаторной развязкой, которая обеспечивает передачу напряжения для электронных схем вторичной части. Внешняя схема генератора (oscillator) используется совместно с ШИМ-контроллером UC1825 для повышения стабильности частоты переключения, обеспечения синхронизации внешним сигналом и формирования выходного сигнала синхронизации при работе нескольких преобразователей в соответствии с требованиями конкретного приложения. Применение схемы блокировки от пониженного напряжения (under-voltage lockout, ULDO) гарантирует, что низкое напряжение входной шины не сможет привести к нештатной работе схемы контроллера и потере стабилизации на выходе преобразователя. Конструкция также содержит входной фильтр для подавления помех, передаваемых во входную шину.

Входные цепи преобразователя развязаны от выходных цепей. Входные и выходные цепи изолированы от корпуса. Трансформаторы обеспечивают изоляцию для входных и выходных цепей, тогда как подложка сборки — изоляцию для входных и выходных цепей от корпуса. Конструкция преобразователя серии GH разработана на основе библиотечной системы обеспечения проектирования компании IR

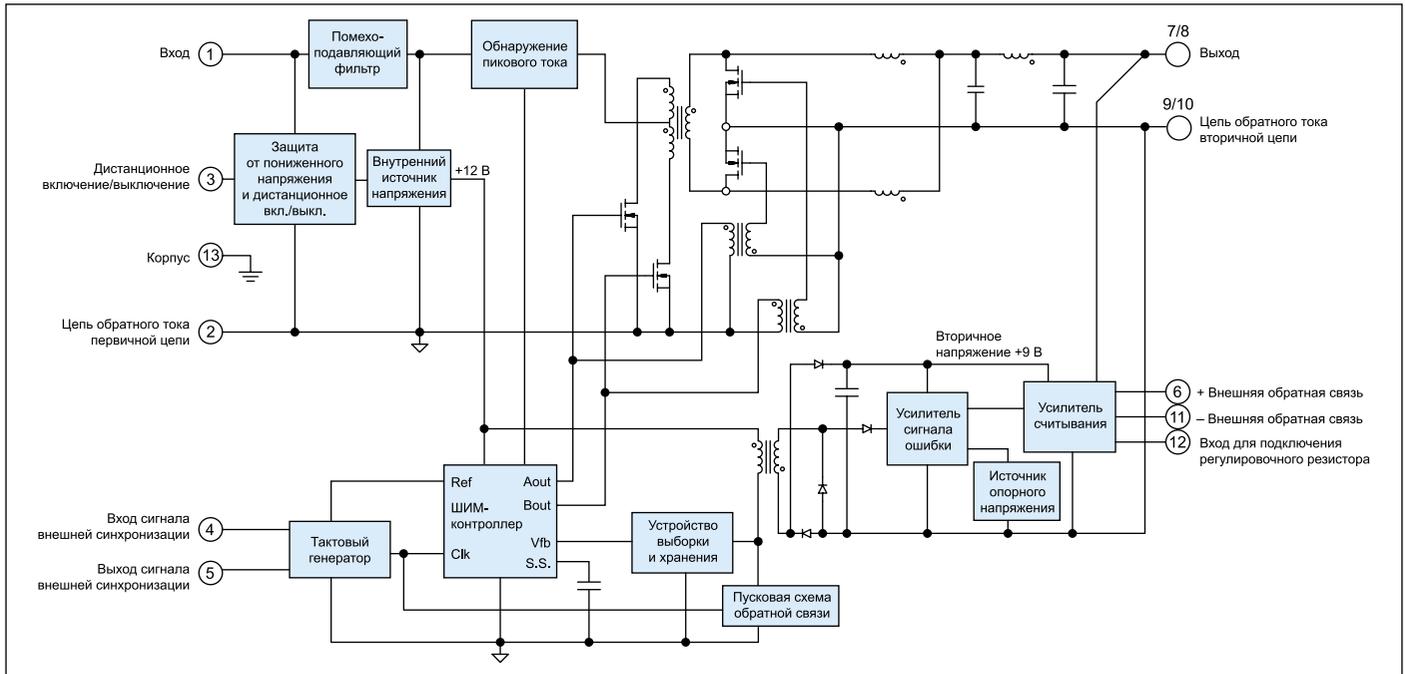


Рис. 2. Структурная схема DC/DC-преобразователя серии GH

с известными компонентами и сведениями о показателях надежности схемы. Много преобразователей, выполненных с применением подобной структуры схемы, работают сейчас на космической орбите.

Входной фильтр

Входной многозвенный фильтр включает компоненты для подавления синфазной и дифференциальной составляющей помехи для обеспечения стабильной работы преобразователя во всех условиях динамического изменения входного напряжения и нагруз-

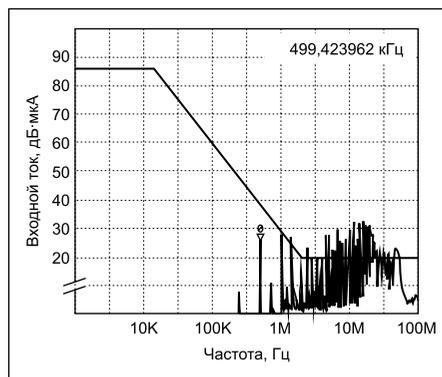


Рис. 3. Кондуктивные синфазные помехи

теля электромагнитной совместимости входа преобразователя GH и нормы напряженности помех CE03 по стандарту MIL-STD-461C.

В таблице 2 представлены максимальные пределы CE03 для преобразователей серии GH.

Силовой каскад и цепи защиты от перегрузки и короткого замыкания

В качестве силовых ключей в силовом каскаде применяются усовершенствованные радиационно-стойкие транзисторы MOSFET IRHC63230 поколения R6 компании IR с номинальным рабочим напряжением VDC 200 В. Ключи управляют непосредственно выходным каскадом ШИМ-контроллера UC1825, работающего на фиксированной частоте переключения около 500 кГц.

Считывание тока токовым трансформатором на первичной стороне преобразователя необходимо для контролирования пикового тока, который используется в ка-

ти. Типичные графики напряжения кондуктивных помех относительно нормирующей линии CE03 стандарта MIL-STD-461C представлены на рис. 3, 4. На рис. 4в приведены типичные показатели CE03 с границей показа-

Таблица 2. Максимальные пределы кондуктивных помех CE03 для преобразователей серии GH

Частотные диапазоны	Пределы входного тока GH CE03
<150 кГц	86 дБ (max)
150 кГц – 4 МГц	86 дБ с линейным понижением до 40 дБ
4–50 МГц	40 дБ

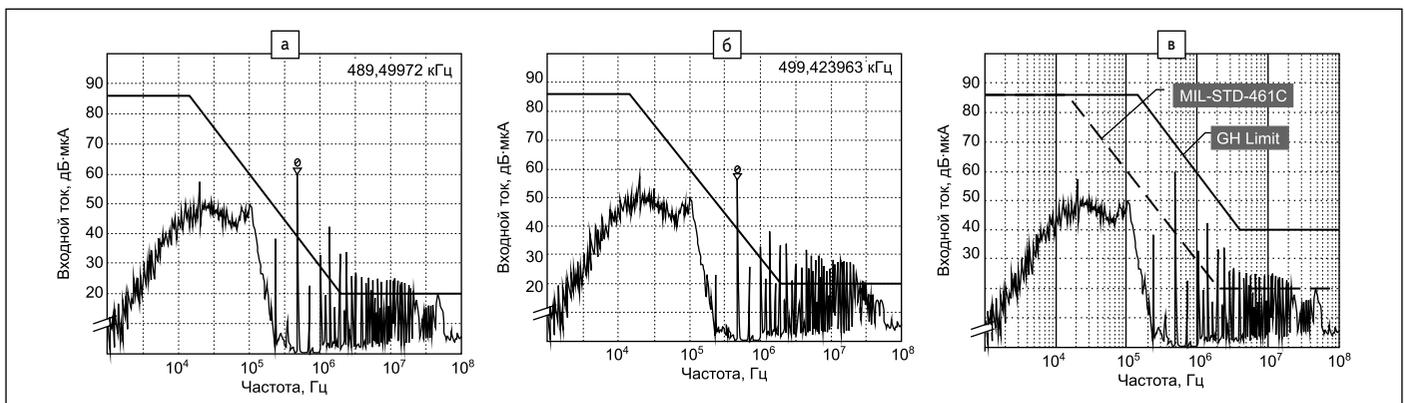


Рис. 4. Кондуктивные дифференциальные помехи:

а) линия напряжения положительной полярности; б) линия отрицательной полярности; в) линия положительного напряжения с нормами помех CE03 GH и MIL-STD-461C

честве пилообразного сигнала для ШИМ-модулятора. Эта же схема считывания тока служит для защиты преобразователя в случае перегрузки по току или короткого замыкания. Схема защиты ограничивает ток до постоянного уровня. Выходной ток будет оставаться почти постоянным во время перегрузки по току или короткого замыкания, как только выходной ток достигнет предварительно установленного порогового уровня (приблизительно 125% номинального значения). Преобразователь возвращается в режим нормальной стабилизации после устранения причины перегрузки/короткого замыкания.

Синхронное выпрямление

Синхронное выпрямление используется для максимизации показателя эффективности преобразования. Применение режима синхронного выпрямления в преобразователе с низкими уровнями напряжения, при котором выходные диоды Шоттки заменяются полевыми транзисторами, позволило повысить КПД на несколько процентов [9]. Необходимо заметить, что преобразователи серии GH являются фактически первыми радиационно-стойкими преобразователями с гальванической развязкой, в состав которых входит синхронный выпрямитель на полевых транзисторах.

В моделях с выходными напряжениями 3,3 и 5 В применяются радиационно-стойкие транзисторы MOSFET поколения R5 компании IR — IRHC57034, в моделях с более низкими напряжениями используются транзисторы IRHC57Z30. Сигнал для управления затворами синхронные выпрямители получают от ШИМ-контроллера с первичной стороны через обмотки трансформатора, а напряжение смещения — от вспомогательного напряжения вторичной стороны, передаваемого через основной трансформатор силового каскада.

Стабилизация выходного напряжения (обратная связь и управление)

Выходное напряжение снимается через резистивный делитель, обрабатывается усилителем считывания и сравнивается с постоянным опорным напряжением на входе усилителя сигнала рассогласования (рис. 2). Усилитель сигнала рассогласования обеспечивает высокий коэффициент усиления по постоянному току для сохранения постоянной рабочей точки по постоянному току и вводит поправку на изменения в выходном напряжении вследствие изменений входного напряжения и тока нагрузки с применением корректирующих цепей на основе резисторов и конденсаторов в цепи обратной связи. Эти цепи резисторов и конденсаторов, подключенные к усилителю сигнала ошибки, обеспечивают требуемую ширину полосы пропускания (быстродействие системы) с необходимым запасом по амплитуде и фазе. Подробно об эффективном способе обеспечения устойчивости контура обратной

связи понижающего преобразователя рассказывается, например, в работе [10].

Выходной сигнал усилителя рассогласования (уровень постоянного тока с модуляцией переменным током) далее модулируется и передается через трансформатор обратной связи со вторичной на первичную сторону. Подобная трансформаторная обратная связь между первичной и вторичной цепями (с устройством выборки и хранения) обеспечивает более высокую устойчивость к суммарной накопленной дозе ионизирующего излучения по сравнению с оптоэлектронной развязкой в контуре обратной связи, которая имеет значительное изменение коэффициента передачи тока при воздействии радиации. Первичный сигнал обратной связи затем изменяется в модулированный переменным током сигнал ошибки постоянного тока. Далее этот сигнал передается к ШИМ-контроллеру на первичной стороне и сравнивается с пилообразным сигналом пикового тока.

Выходной фильтр

Схема выходного фильтра представляет собой двухзвенный LC-фильтр, который уменьшает как помехи на основной частоте преобразования, так и высокочастотные пульсации и шумы. Двухзвенный фильтр соответствует также требованиям к низкому выходному импедансу, обеспечивающему приемлемую амплитуду отклонения от номинального значения выходного напряжения при динамичном переключении нагрузки. Типичные переходные характеристики при импульсном изменении нагрузки и формы пульсаций напряжения представлены далее в разделе «Некоторые технические характеристики и данные испытаний».

Защита от пониженного входного напряжения

DC/DC-преобразователи серии GH защищены от пониженного напряжения на входе, когда напряжение входной шины уменьшается ниже предельного уровня (приблизительно 15,5 В). Защита способна самовосстанавливаться: когда входное напряжение повысится примерно до 17 В, преобразователь возвращается в нормальный режим работы. Входная схема защиты от пониженного входного напряжения (UVP) считывает напряжение входной шины и сравнивает его с опорным напряжением. В случае, когда входное напряжение ниже установленного порога (около 17 В), преобразователь не будет работать и на выходе не будет напряжения. Когда входное напряжение превысит установленный порог, преобразователь будет обеспечивать стабилизированное выходное напряжение. Пороговые уровни включения и отключения незначительно изменяются в зависимости от температуры. Схема UVP содержит гистерезис, предохраняющий преобразователь от включения и выключения в случае, когда напряжение источника не повышается монотонно.

Функциональные возможности

DC/DC-преобразователи серии GH обладают несколькими важнейшими свойствами, полезными для типичных применений: вход дистанционного включения/выключения, внешняя синхронизация нескольких преобразователей, компенсация падения напряжения на соединительных линиях с нагрузкой (внешняя обратная связь), точная установка выходного напряжения.

Дистанционное включение/выключение

DC/DC-преобразователи серии GH имеют командный вход дистанционного включения/выключения (вывод 3, Inhibit). Преобразователь будет выключен, когда к выводу Inhibit будет приложен сигнал с уровнем 0,8 В или ниже относительно вывода Input Return (контакт 2) и на входе (выводы 1 и 2) присутствует напряжение в диапазоне от 18 до 40 В. Преобразователь включается, когда вывод Inhibit остается свободным или когда на этот вывод подается сигнал с напряжением более 2 В. Типичный порог включения составляет примерно 2 В относительно цепи Input Return. Контакт Inhibit может быть также использован для управления несколькими модулями серии GH для задания последовательности включения выходных напряжений.

Синхронизация

Несколько модулей DC/DC-преобразователей серии GH могут синхронизироваться общим частотным сигналом от внешнего источника сигнала с частотным диапазоном 500 ± 50 кГц. Каждый преобразователь может быть источником и приемником сигнала синхронизации от другого преобразователя при шлейфовом соединении, то есть вывод Sync Out A соединен с Sync In B, Sync Out B — с Sync Out C и т. д. Таким образом, каждый выход синхронизации (Sync Out) управляет только одним входом синхронизации (Sync In), и сигналы генераторов преобразователей незначительно отличаются по фазе один от другого, что уменьшает комбинированные шумы и пульсации на входе.

Внешняя обратная связь

Для правильной работы преобразователя выводы +Sense (контакт 6) и -Sense (контакт 11) должны быть соединены с выходными контактами (выводы 7 и 8) и выводами Output Return (контакты 9 и 10) соответственно. Преобразователь серии GH способен компенсировать падение напряжения на выходных линиях в случае, когда нагрузка расположена на некотором расстоянии от преобразователя. Это обеспечивается присоединением вывода +Sense (контакт 6) к точке с высоким потенциалом на нагрузке и присоединением вывода -Sense (контакт 11) к точке нагрузки с низким потенциалом.

Максимальное значение напряжения, которое может быть скомпенсировано, —

не более 10% от номинального значения выходного напряжения преобразователя, когда не используется функция подстройки выходного напряжения.

Подстройка выходного напряжения

Для точной установки выходного напряжения преобразователь серии GH оснащен функцией подстройки выходного напряжения. При изготовлении выходное напряжение каждого преобразователя настраивается до стандартного значения. Стандартными напряжениями являются 1; 1,5; 1,8; 2,5; 3,3 и 5 В. Тем не менее, если необходимо получить напряжение незначительно ниже или выше, чем установленные стандартные значения, выход преобразователя может быть отрегулирован до необходимого уровня дополнительным внешним резистором. Комбинированное напряжение увеличенного выходного напряжения и напряжения падения на выходных линиях (в том случае, когда функция внешней обратной связи не используется) ограничено до $\pm 10\%$ от номинального выходного напряжения. Если внешняя обратная связь не используется, выходное напряжение может быть установлено не более чем на 10% выше номинального значения напряжения. Формула для определения необходимого выходного напряжения и соответствующие комментарии по применению приведены в справочном листке технических данных для преобразователей серии GH [11].

Конструкция

Подобно большей части DC/DC-преобразователей компании International Rectifier преобразователи серии GH являются толсто пленочными герметизированными модулями. Эта конструкция имеет определенные преимущества. Гибридная конструкция с изотермической плоскостью обеспечивает кратчайшие тепловые пути от компонентов к основанию корпуса для отвода тепла, используя наименьшие тепловые сопротивления «кристалл – поверхность корпуса». Применение материалов с высокой удельной теплопроводностью позволяет достичь наилучших температурных показателей. Конструкция обеспечивает минимальный перегрев внутренних компонентов, повышая таким образом надежность изделия.

Основание и боковые стенки модуля сварены. Подобно преобразователю серии M3G, предназначенному для применения в аппаратуре космических аппаратов, основание корпуса преобразователя серии GH выполнено из Al/SiC (алюминий с карбидом кремния), а кольцевой шпангоут — из железоникелевого сплава (Alloy 48) для минимизации массы и обеспечения повышенной жесткости конструкции. Крышка выполнена из кобальт-никелевого сплава (ковара). Медные выводы для ввода/вывода сигналов и напряжения уплотнены прочной керамикой, а корпус герметизирован шовно-роликовой сваркой. Система шовно-роликовой сварки, интегри-

рованная в атмосферную камеру, идеально подходит для герметизации микросхем специального применения высокой надежности, так как обеспечивает заданную атмосферу внутри микросборки. Герметичность изделия продлевает срок его службы [12].

Конструкция корпуса и отвод тепла

Конструкция корпуса преобразователей серии GH подобна конструкции корпуса популярного преобразователя серии M3G, выпускаемого компанией International Rectifier в течение длительного времени. Габаритные размеры корпуса составляют (Д×Ш×В) 88,9×63,5×12,07 мм. Длина и ширина включают выступы входных и выходных выводов и монтажных проушин. Основание корпуса имеет размеры 76,2×50,8 мм. Расположение монтажных проушин таково, что позволяет разместить несколько модулей рядом, сколько монтажных проушин одного модуля могут быть размещены на одной прямой с другими модулями для минимизации площади монтажа.

При эксплуатации модуля для соблюдения теплового режима должно быть обеспечено достаточное охлаждение. Для отвода тепла преобразователь необходимо установить на теплопроводящую поверхность. Для заполнения пустот между основанием корпуса и поверхностью, на которой устанавливается модуль, рекомендуется применять теплопроводящую прокладку, подобную Sil-Pad [13].

Выходные квалификационные испытания и отчеты по анализу конструкции

DC/DC-преобразователи серии GH классифицированы компанией IR как изделия класса К (для применения в космической аппаратуре) в соответствии с техническими условиями MIL-PRF-38534. Образцы преобразователей успешно выдержали испытания воздействием ионизирующего излучения и тяжелыми заряженными частицами. Результаты испытаний на соответствие классу К оформлены в виде отчетов по ресурсным испытаниям и отчетов по радиационной стойкости.

Также доступны отчеты по анализу конструкции, которые включают сведения об анализе электрических и температурных воздействий и снижения номинальных параметров, анализе аварийных режимов и влияния отказов компонентов на функционирование модуля, расчете среднего времени наработки на отказ и анализе изменения эксплуатационных характеристик изделия при наихудшем сочетании внешних факторов.

Показатели радиационной стойкости

Образцы преобразователей GH2805S (5-вольтовый выход) были подвергнуты испытаниям на проверку влияния суммарной нако-

пленной дозы радиации и воздействия тяжелых заряженных частиц, вызывающих одиночные сбои. Образцы успешно прошли испытания на воздействие ионизирующего излучения и тяжелых заряженных частиц и сертифицированы для применения в аппаратуре ракетно-космической техники в условиях радиации.

Результаты испытаний воздействием заряженными частицами

Преобразователи серии GH успешно выдержали испытания заряженными частицами с линейными потерями энергии (ЛПЭ) 86,9 МэВ·см²/мг. Тем не менее обнаружилась незначительная чувствительность к воздействию одиночными заряженными частицами. Зафиксированные наибольшие отклонения выходного напряжения (160 мВ, 3,2% от 5 В) находятся четко в пределах 10%-ного ограничения номинального значения выходного напряжения.

Во время испытаний преобразователи работали при 50% от номинальной нагрузки (5 В/5 А), при приложенном номинальном входном напряжении 28 В. Подробная информация о процедуре и результатах испытаний воздействием заряженных частиц представлена в документе RAD173323SEE [14]. В таблице 3 приведены результаты испытаний.

Таблица 3. Результаты испытаний преобразователя GH2805S (S/N 005) на воздействие заряженными частицами

Фактическое значение ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Энергия по видам ионов, МэВ	Наибольшее отклонение выходного напряжения, мВ	Комментарии
37,8	372 — криптон	160 (3,2%)	Наибольшее отклонение напряжения произошло при низком входном напряжении (18 В)
60	737 — ксенон	120 (2,4%)	
86,9	1961 — золото	150 (3%)	Наибольшее отклонение напряжения произошло при максимальном входном напряжении (50 В)

На рис. 5 в качестве примера представлены графики изменения выходного напряжения и входного тока при воздействии ионов криптона с ЛПЭ 37 МэВ·см²/мг.

Отклонения выходного напряжения и входного тока при воздействии ионов золота с ЛПЭ 86,9 МэВ·см²/мг приведены на рис. 6.

Результаты испытаний на стойкость к суммарной накопленной дозе радиации

Четыре модуля GH2805S были подвергнуты испытаниям на воздействие электромагнитных ионизирующих излучений в соответствии с MIL-STD-883, Method 1019.5 Condition A. Все четыре устройства успешно выдержали испытания при накоплении дозы 150 крад (Si) и последующем отжиге при температуре +100 °С в течение 168 часов.

Далее представлена краткая сводка основных электрических параметров двух модулей, которые подвергались воздействию

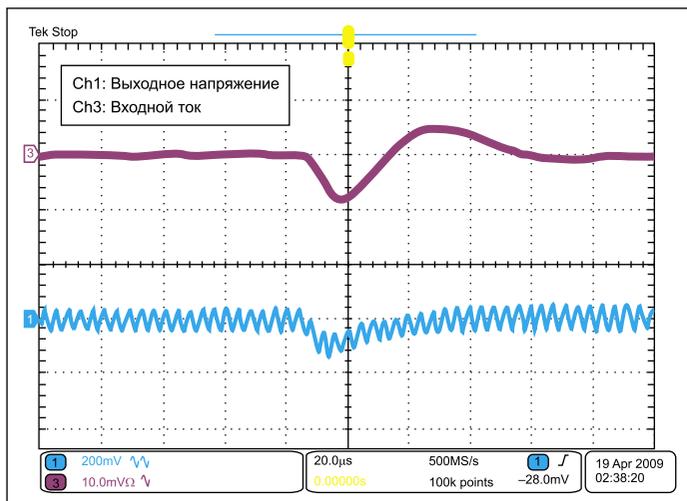


Рис. 5. Отклонения выходного напряжения при воздействии заряженного иона (криптон) с ЛПЭ 37,8 МэВ·см²/мг. Входное напряжение — 18 В

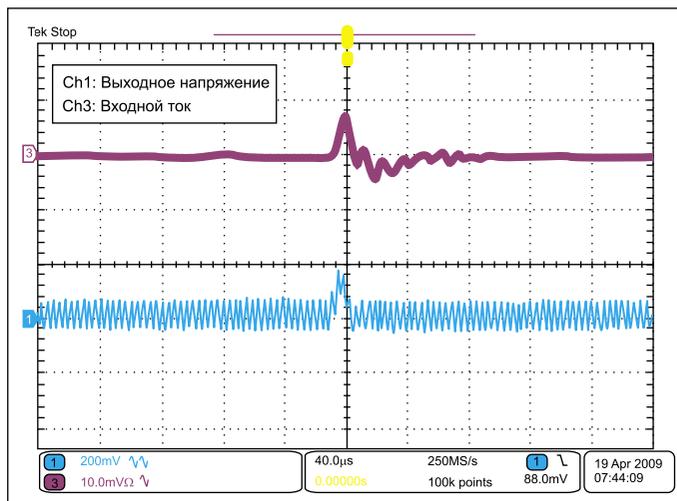


Рис. 6. Отклонения выходного напряжения и входного тока при воздействии ионов золота с ЛПЭ 86,9 МэВ·см²/мг. Входное напряжение — 28 В

Таблица 4. Результаты испытаний модулей GH2805S на стойкость к суммарной накопленной дозе радиации

Параметр	Перед испытанием	После испытания	После отжига	Фактические изменения	Изменения в %
Модуль с S/N: 004					
Выходное напряжение, В	5,002	4,962	4,995	-7 мВ	-0,1
КПД, %	86,724	86,571	86,622	-0,102%	-0,1
Частота преобразования, кГц	505,63	515,99	508,72	+3,09 кГц	0,6
Модуль с S/N: 005					
Выходное напряжение, В	5,005	4,963	4,994	-11 мВ	-0,2
КПД, %	86,746	86,563	86,548	-0,198%	-0,2
Частота преобразования, кГц	505,4	516,89	509,04	+3,64 кГц	0,7

Примечания. Оба модуля прошли все проверки электрических параметров после отжига. Результаты испытаний подобны значениям параметров перед воздействием радиации для всех трех температурных значений Group A.

Некоторые технические характеристики и данные испытаний

На рис. 7–9 представлены некоторые технические характеристики DC/DC-преобразователей серии GH.

На рис. 7 приведена осциллограмма выходных шумов и пульсаций преобразователя GH2805S: измерения сделаны в частотном диапазоне 20 МГц, значения пульсаций — 8 мВ (от пика до пика).

Изменения выходного напряжения при ступенчатом изменении нагрузки представлены на рис. 8. Выброс на заднем фронте импульса составляет 150 мВ с длительностью 250 мкс; отрицательный выброс перед фронтом импульса составляет 147 мВ с длительностью 250 мкс.

На рис. 9а представлена зависимость КПД от нагрузки при различных значениях входного напряжения для DC/DC-преобразователя GH2805S. При максимальной нагрузке значение КПД снижается незначительно ввиду небольших потерь при повышенных

электромагнитного ионизирующего излучения. Более подробно процедура испытаний описана в документе RAD-173323TID [15]. Условия испытаний:

- Входное напряжение — 28 В.
- Выходные параметры — 5 В/5 А (50% от номинальной нагрузки).
- Мощность ионизирующего излучения — 2,5 крад/мин.
- Поглощенная доза радиоактивного излучения — 150 крад.
- Отжиг — при +100 °С в течение 168 ч согласно Method 1019.5.

Результаты испытаний на стойкость к суммарной накопленной дозе радиации приведены в таблице 4.

Необходимо заметить, что во время этих испытаний у всех четырех образцов было зафиксировано импульсное повышение входного тока при значении поглощенной дозы 300 крад. Специалисты IR считают, что это явление связано с неправильным функционированием микросхемы ШИМ-контроллера UC1825 при высоких уровнях радиации. Исследования стойкости ИМС ШИМ-контроллеров показывают, что некоторые из них (UC1843, UC1842, UC 1825, UC1805 и другие) имеют неплохие показатели стойкости к воздействию радиации. Но микросхемы, выполненные по сме-

шанной BiCMOS-технологии (например, UC1803), чувствительны как к суммарной накопленной дозе радиации, так и к воздействию заряженных частиц. Применение перспективной радиационно-стойкой ИС ШИМ-контроллера IRHPC71825, разработанной специалистами International Rectifier, позволит повысить стойкость интегрально-гибридных модулей DC/DC-преобразователей серии GH к воздействию радиации.

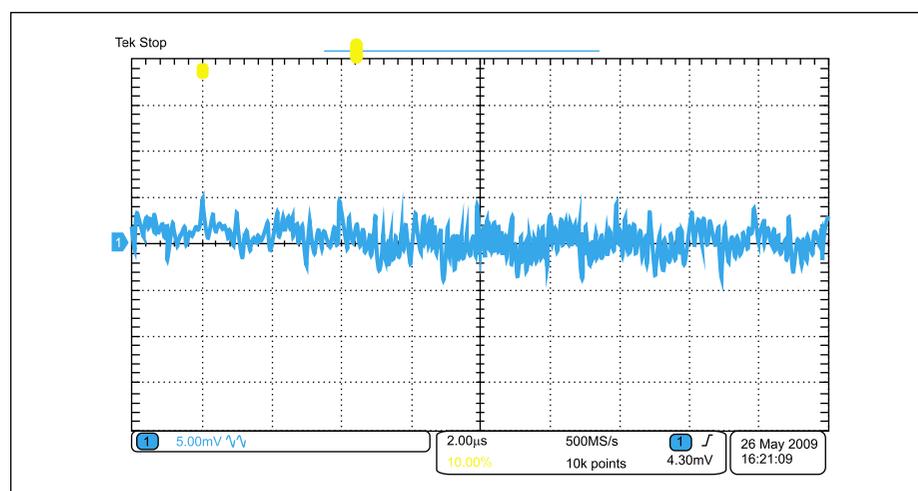


Рис. 7. Шумы и пульсации на выходе при входном напряжении 28 В и номинальной нагрузке для GH2805S (выход 5 В/10 А)



Рис. 8. Типичные изменения выходного напряжения при ступенчатом изменении нагрузки от 5 до 10 А и от 10 до 5 А для GH2805S (выходное напряжение 5 В)

нагрузках. Зависимость КПД от температуры для модели GH2805S показана на рис. 9б.

Заключение

После нескольких лет крупномасштабных работ компания IR успешно справилась со сложными проблемами в конструировании и разработке первого интегрально-гибридного DC/DC-преобразователя с гальванической развязкой, имеющего синхронное выпрямление для максимизации КПД в применениях с выходными мощностями от низких до средних. Ключевыми факторами в успешной разработке являются выбор компонентов для работы в сложных условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства, выбор материалов и проверенной структуры конструкции, умеренный подход к выбору запаса технических параметров компонентов, оптимальная компоновка конструкции и разработка производственного процесса. Преобразователи серии GH обеспечивают непосредственную выгоду: она заключается в сниженных затратах на программу, в коротком времени производственного цикла и простой компоновке системы. Благодаря высокому показателю эффективности и небольшой площади основания,

DC/DC-преобразователи серии GH подходят для применения в распределенных и централизованных системах электропитания космических аппаратов, использующих в основных системах современные цифровые устройства.

Литература

1. Bussarakons T. High Efficiency Space Grade DC-DC Converter is a Prime Solution for Modern Day Digital Loads: GH Series White Paper. International Rectifier, 2011.
2. Лукин А. В. Распределенные системы электропитания // Электронные компоненты. 1997. № 7. 1998. № 2–3.
3. Жданкин В. К. Преобразователи напряжения для современных высокопроизводительных цифровых систем // Современные технологии автоматизации. 2002. № 4.
4. Чанов Л. Микросхемы силовой электроники в распределенных системах электропитания // Электронные компоненты. 2006. № 6.
5. Дмитриков В., Шушпанов Д., Кобелянский А. Устойчивость работы распределенной системы электропитания при двукратном преобразовании энергии // Электронные компоненты. 2007. № 9.
6. Гринлэнд П. Разработка системы питания устройства с использованием POL-преобразователей // Электронные компоненты. 2009. № 6.
7. Жданкин В. К. Низковольтные DC/DC-преобразователи типа POL для бортовой авиационной и ракетно-космической аппаратуры // Силовая электроника. 2011. № 2.
8. Жданкин В. К. Радиационно-стойкие низковольтные DC/DC-преобразователи для распределенных систем электропитания ракетно-космической техники // Компоненты и технологии. 2011. № 7.
9. Жикленков Д. В., Мишин А. А. Применение МДП-транзисторов в схемах синхронного выпрямления // Практическая силовая электроника. 2001. № 3.
10. Иоффе Д. Обеспечение устойчивости понижающего преобразователя // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
11. GH Series High Reliability, High Efficiency Radiation Hardened DC-DC Converter. International Rectifier, 2011.
12. Иванов А., Кононыхин Д. Знакомство с технологией шовно-роликковой герметизации // Силовая электроника. 2011. № 2.
13. Тетерев А. Решение проблемы теплоотвода. Материалы компании Bergquist // Электроника: НТБ. 2004. № 2.
14. Single Event Effects Test Report for GH2805S DC/DC Converter: RAD173323. Rev. A. International Rectifier, 2009.
15. TID Radiation Test Report GH2805S: RAD173323TID. Rev. A. International Rectifier, 2009.

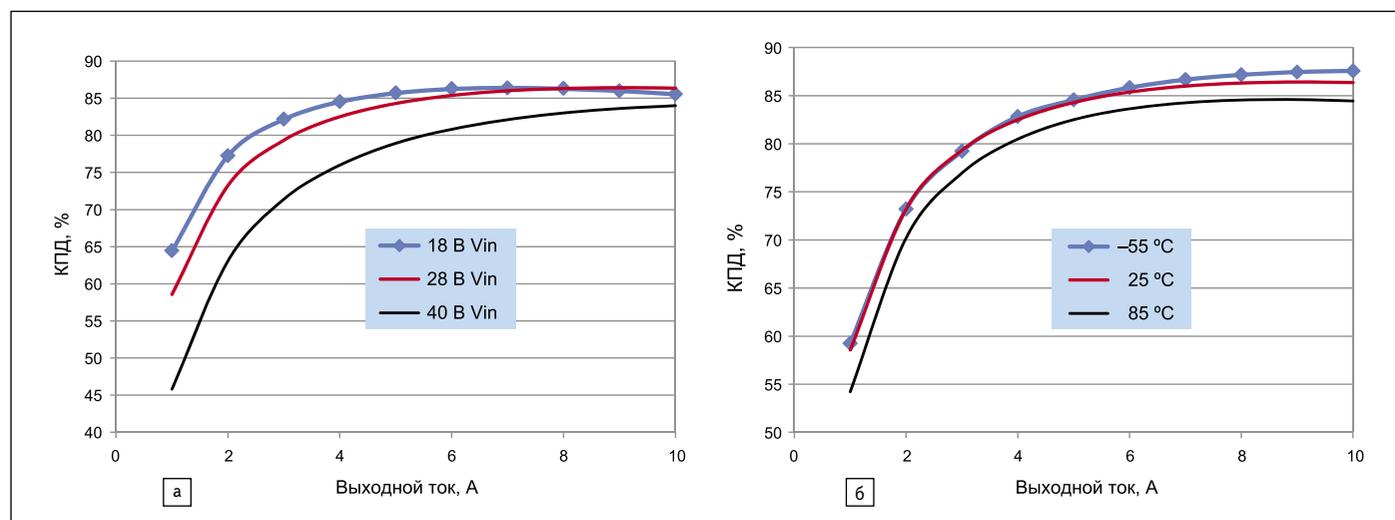


Рис. 9. Зависимость КПД:

- а) от нагрузки и входного напряжения для модуля GH2805S (выходное напряжение 5 В) при температуре +25 °С;
- б) от температуры при номинальном входном напряжении для модели GH2805S (выход 5 В / 10 А)