

Радиационно-стойкие низковольтные DC/DC-преобразователи для распределенных систем электропитания ракетно-космической техники

Виктор ЖДАНКИН
info@prochip.ru

В статье рассматриваются радиационно-стойкие (RAD-Hard) DC/DC-преобразователи серий SBB и SBA типа POL (point-of-load, преобразователи, размещаемые в непосредственной близости от питаемого функционального узла). Их выпускает компания International Rectifier (подразделение «Высоконадежные изделия» — HiRel) для применения в распределенных системах электропитания бортовой аппаратуры ракетно-космической техники. Статья написана по материалам, предоставленным компанией International Rectifier [1].

Введение

Новые поколения БИС программируемых вентильных матриц (FPGA), DSP-процессоров, заказных интегральных схем (ASIC), памяти и других цифровых устройств космического класса, представленных на рынке, отвечают возрастающим требованиям к повышенной пропускной способности и скорости обработки данных процессорами и сигнальными процессорами на борту космических аппаратов (КА). Эти новые цифровые устройства предъявляют особые требования к источникам питания, а именно пониженные значения напряжения

и большие значения токов, причем цифровые микросхемы потребляют импульсные токи с достаточно высокой частотой. Для крупных схем на цифровых сигнальных процессорах и процессорах обработки данных, где потребности в мощности или токе становятся решающим фактором, распределенная система электропитания (Distributed Power Architecture, DPA) часто является вариантом системы электропитания, обеспечивающим оптимальные характеристики системы.

Для цифровых устройств новых поколений необходимы низкие уровни напряжения. Для больших или составных цифровых сигнальных процессоров это означает, что требуемый рабочий ток может быть довольно большим (от 5 до 10 А или выше), в некоторых случаях он достигает нескольких десятков ампер. Обычно существует по крайней мере два основных подхода к проектированию, которые используют для основной части решений силовых схем. Одно общеизвестное решение, представленное на рис. 1, построено на принципе сосредоточенной архитектуры, когда несколько DC/DC-преобразователей с гальванической развязкой, работающих непосредственно от шины питания космического аппарата, служат для обеспечения стабилизированным напряжением с номинальными значениями 1; 1,5; 2,5; 3,3; 5 В и т. д., в соответствии с требованиями цифровых нагрузок. Другой распространенный подход, известный как архитектура распределенного электропитания, представлен на рис. 2.

В базовую распределенную систему электропитания обычно входят один DC/DC-преобразователь с гальванической развязкой, работающий непосредственно от шины электропитания космического аппарата, и два или больше преобразователей типа POL, размещаемых в непосредственной близости от питаемого функционального узла. Преобразователь с гальванической развязкой между первичными и вторичными цепями формирует промежуточное стабилизированное или нестабилизированное напряжение, оно подается на последующие стабилизаторы напряжения без гальванической развязки, которые обеспечивают стабилизированным электропитанием нагрузку. Для формирования определенного выходного напряжения обычно требуется один POL-преобразователь. Как правило, в системе необ-

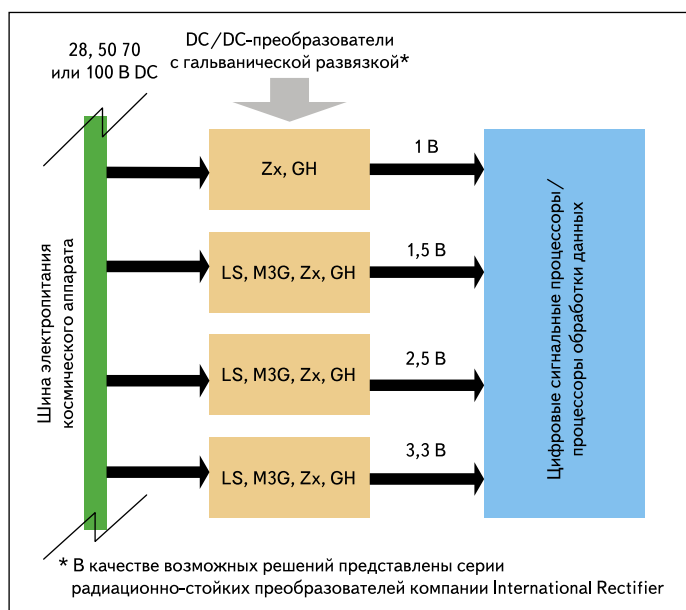


Рис. 1. Упрощенная схема сосредоточенной архитектуры системы электропитания

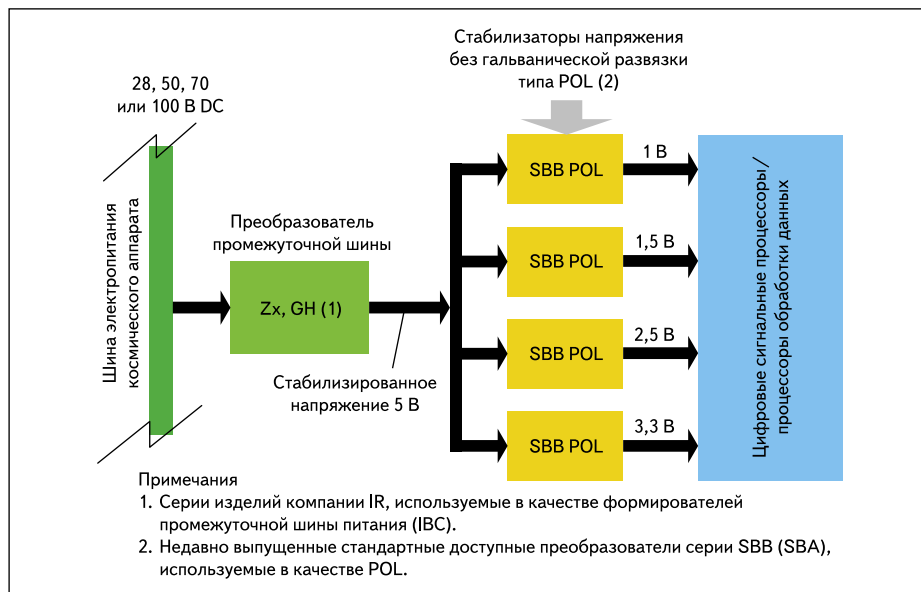


Рис. 2. Упрощенная структурная схема распределенной системы электропитания

ходимо два или более выходных напряжения (для питания ядра FPGA, ячеек ввода/вывода, вспомогательных схем). Каждое напряжение может быть в диапазоне от 0,8 до 3,3 В, однако существует тенденция снижения напряжения до 1 В и менее. Резервирование и другие соображения при проектировании системы добавляют сложности, и поэтому может возникнуть необходимость в дополнительных DC/DC- и POL-преобразователях для удовлетворения требований к исполнению системы.

Изделия, предлагаемые компанией International Rectifier, поддерживают оба представленных подхода к проектированию подобных систем. Фактически IR предлагает решения, подходящие для большей части исполнений систем питания. На структурных схемах перечислены наименования серий стандартных блоков DC/DC-преобразователей (например, LS, M3G, Zx и GH), разработанных для современных цифровых устройств, предназначенных для применений в условиях широких диапазонов температур и воздействия радиации, включая проекты для длительных космических программ со сроком 15 лет и более.

Каждый из двух основных методов проектирования имеет свои достоинства и недостатки. Как правило, проводятся подробный анализ и компромиссное исследование, чтобы гарантировать соответствие конкретному применению и техническим требованиям программы. Обычно выбор способа проектирования системы определяется, но не ограничивается, следующими факторами:

- эффективность системы;
- динамические характеристики из-за паразитных импедансов;
- размеры и масса;
- рассеивание тепла;
- механическая компоновка конструкции;
- требования к системному резервированию;

- доступность составных частей преобразования энергии;
- стоимость.

Описание POL-преобразователей серии SBB и их ключевые свойства

Конструктивно POL-преобразователи серии SBB построены по гибридной технологии и представляют собой герметизированный блок. При производстве преобразователей применяются модульные конструкции и производственные процессы, которые IR успешно предлагает мировому космическому сообществу в течение почти 20 лет. Преобразователи POL серии SBB — первые в промышленности серийные изделия подобного класса, сертифицированные для применения в аппаратуре космической техники. Изделия относятся к продукции Class K (для применения в космосе), отбраковываемой при производстве согласно требованиям MIL-PRF-38534.

Конструкция изделий эффективна, отличается компактным форм-фактором, простотой для системной интеграции и приспособлена для условий космического полета; она обеспечивает отличную эффективность и технические характеристики, соответствующие требованиям к питанию современных цифровых нагрузок. Преобразователь серии SBB — это модульное устройство типа POL. Его легко интегрировать в систему, так как внешние фильтры в большинстве типичных применений не нужны, но для нагрузки может потребоваться установка развязывающих конденсаторов в зависимости от фактической физической реализации.

Все внутренние компоненты тщательно отобраны, и их параметры зафиксированы для гарантии надежной работы при определенных условиях окружающей среды. Исследования конструкции включают анализ электрического и температурного воздействия, анализ ава-

рийных режимов и воздействий (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA), анализ среднего времени наработки на отказ (MTBF) и анализ наихудшего случая, представляющего эксплуатационные характеристики изделия при воздействии наихудшего сочетания внешних факторов, включая показатели срока службы. Эти отчеты доступны по запросу.

Основные свойства POL-преобразователей серии SBB:

- Значение суммарной дозы ионизирующего излучения — >100 крад по объемному кремнию.
- Одиночные эффекты от воздействия протонов и ионов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей (SEL/SEB/SET) характеризуются пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) иона в веществе >82 МэВ·см²/мг.
- Работа от сетей постоянного напряжения с отклонениями напряжения от 4,5 до 5,5 В.
- Выходное напряжение — 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,5 и 3,3 В постоянного тока.
- Выходная мощность — до 30 Вт или ток 14 А (max) без снижения выходной мощности.
- Высокое значение КПД — до 89%.
- Диапазон рабочих температур — -55...+85 °С (температура корпуса) без понижения выходной мощности.
- Фиксированная частота преобразования — 400 кГц.
- Внешняя обратная связь.
- Регулировка выходного напряжения в пределах ±10% от номинального значения с применением внешних резисторов.
- Дистанционное включение/выключение.
- Выключение при пониженном входном напряжении.
- Защита от перегрузки и короткого замыкания.
- Низкий уровень пульсаций и шумов, обеспечиваемый встроенными фильтрами на входе и выходе.
- Не требуется применение внешних фильтрующих конденсаторов.
- Мягкий запуск.
- Синхронизация частоты преобразования со стороны входных и выходных цепей.
- Состояние выходного напряжения представляется логическим сигналом высокого уровня (Power OK).
- Анализ наихудшего случая.
- Компоненты отобраны в соответствии с требованиями технических условий MIL-PRF-38534.
- Отклонения от номинальных значений параметров в условиях космического полета согласно MIL-STD-1547.
- Значение среднего времени наработки на отказ (MTBF) >2,8 млн часов рассчитано для условий космического полета.
- Габаритные размеры — 60,96×50,8×8,51 мм с учетом длины выводов и размеров монтажных ушек.

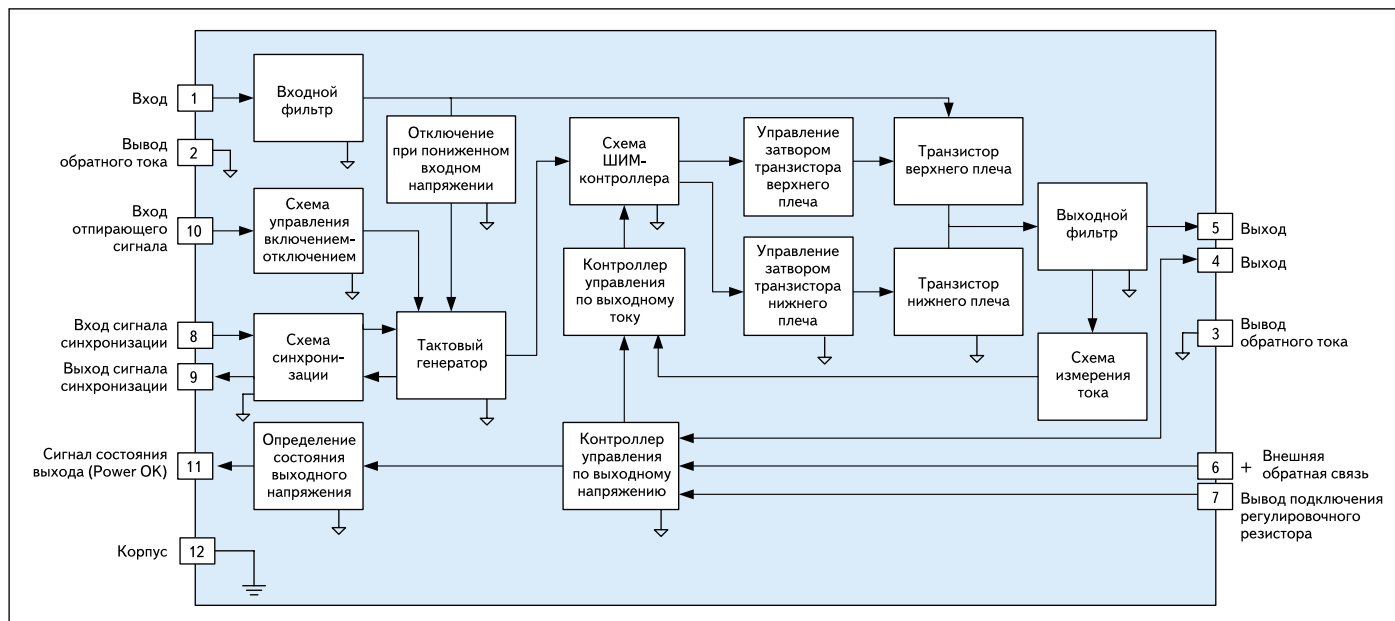


Рис. 3. Структурная схема POL-преобразователя серии SBB

- Масса — 60 г (max).
- Доступны модели, выполненные по спецификациям заказчика.

Топология конструкции

Преобразователи серии SBB выполнены по топологии понижающего (buck) преобразователя с синхронным выпрямлением без гальванической развязки между первичной и вторичной цепью, которая понижает входное напряжение с номинальным значением 5 В до низкого значения 1 В и др. Как показано на рис. 1, преобразователи серий Zx и GH могут быть использованы для формирования напряжения 5 В для питания POL-преобразователей серии SBB (рис. 3). Силовая цепь преобразования состоит из входного фильтра, транзисторов верхнего и нижнего плеча и выходного фильтра. Регулирование выходного напряжения осуществляется методом управления по среднему значению тока на фиксированной рабочей частоте примерно 400 кГц. ШИМ-контроллер выполнен на дискретных компонентах и включает счетверенный операционный усилитель LM124, ИМС 54AC14 (шесть инвертирующих триггеров Шмидта) и ИМС высокоскоростного операционного усилителя AD8042. В качестве силовых ключей используются радиационно-стойкие транзисторы MOSFET IRHC57Z30 (International Rectifier). Радиационно-стойкие транзисторы MOSFET поколения R7 с логическим уровнем управления применяются в качестве предварительных драйверов и используются повсеместно в конструкции для общей обработки сигналов. Все полупроводниковые устройства выбраны по причине их известных технических характеристик при воздействии радиации.

Так как внутренние схемы должны работать от источника входного напряжения 5 В,

все компоненты отобраны с учетом доступного источника напряжения. Тем не менее добавлена схема повышения напряжения до 6,5 В для некоторых полупроводниковых устройств. Кроме того, используются небольшие сигнальные трансформаторы для повышения напряжения управления, как это необходимо для радиационно-стойких ключевых MOSFET-транзисторов, которые требуют напряжения затвора 10 В для значительного улучшения функций коммутации.

Входной фильтр

Входной фильтр — фильтр второго порядка с резистивным демпфированием. Он спроектирован для обеспечения достаточного ослабления пульсаций тока 5 В шины и низких пульсаций напряжения для POL-преобразователя. Пульсации тока удерживаются ниже 100 дБ·мкА (среднеквадратическое значение) по первой гармонике, а пульсации входного напряжения — на уровне менее 0,5 мВ (среднеквадратическое значение), что является еще одной целью проектирования. Эти цели устанавливают базовый уровень, на котором основывается проектирование системы, чтобы обеспечить стабильность системы, когда нужно выбрать формирователь промежуточной шины напряжения и POL-преобразователя.

Силовой каскад

Радиационно-стойкие силовые транзисторы MOSFET поколения R5 IRHC57Z30 с максимальным рабочим напряжением $V_{DS} = 30$ В используются в качестве ключей верхнего и нижнего плеча: один транзистор в верхнем плече и два силовых MOSFET, соединенных параллельно, — в нижнем плече полумосто-

вого каскада. Кроме того, диод Шоттки с низким падением напряжения включен параллельно транзистору нижнего плеча для обеспечения свободной от шумов коммутации выходного тока от верхнего к нижнему ключу. Диод Шоттки также обеспечивает путь для быстрого разряда во время обратного восстановления переключения для минимизации потерь на восстановление и дальнейшего улучшения эффективности.

Стабилизация POL и защита от перегрузки

Как было упомянуто ранее, для стабилизации напряжения выбран режим управления по среднему значению тока. Стабилизация напряжения реализована с помощью ИМС счетверенного операционного усилителя LM124. Выходной сигнал воспринимается, обрабатывается и модулируется (ШИМ) через цепь дискретных устройств, которые являются частями ШИМ-контроллера. Он работает на постоянной частоте примерно 400 кГц через последовательность каскадов обработки сигнала. ШИМ-контроллер на дискретных компонентах формирует рабочий цикл напряжений управления драйвером затвора MOSFET (RIC7113), который переключает транзисторы верхнего и нижнего плеча, которые, в свою очередь, обеспечивают четко регулируемое и стабильное выходное напряжение.

Режим управления по среднему значению тока, когда выходной ток измеряется на выходном дросселе, также обеспечивает ограничение постоянного тока при перегрузке выхода и защите от короткого замыкания. Это позволяет отказаться от токоизмерительного резистора, так как резистивное сопротивление выходного индуктивного компонента просто выполняет функцию измерения тока.

Однако на сопротивление медных проводников дросселя значительное влияние оказывает температура. Это влияние необходимо учитывать в пределах $\pm 20\%$ заданного порога с включением диода температурной компенсации и собственного положительного температурного коэффициента сопротивления меди. Пороговая величина сверхтока по своей природе ниже при условиях повышенной температуры, чем при низкой рабочей температуре, таким образом, уменьшается электрическое воздействие на силовые компоненты и другие компоненты силовой цепи.

Выходной фильтр

Схема выходного фильтра выполнена в виде двухзвенного LC-фильтра, который уменьшает как низкочастотные, так и высокочастотные пульсации и шумы. Двухзвенный фильтр также соответствует требованию к низкому выходному импедансу, обеспечивающему допустимые отклонения вверх и вниз от номинала выходного напряжения при изменении нагрузки от половинного до полного значения. Типовой отклик при ступенчатом изменении нагрузки и диаграммы пульсаций/шумов на выходе приведены в разделе типовых технических характеристик информационной листовки [2].

Защита от пониженного входного напряжения

Преобразователи серии SBB защищены от пониженного входного напряжения, когда напряжение источника входного напряжения опускается ниже предельного значения 4,5 В. Это защита без защелкивания с автоматическим восстановлением при возвращении входного напряжения в нормальный рабочий диапазон. Схема защиты от пониженного напряжения воспринимает напряжение 5 В и сравнивает его с источником опорного напряжения. В том случае, когда входное напряжение ниже предельного значения (приблизительно 3,9 В), POL-преобразователь не будет функционировать и на выходе не будет напряжения. Как только входное напряжение превысит установленный порог (приблизительно 4,3 В), преобразователь начнет работать и обеспечивать на выходе стабилизированное напряжение. Пороговые уровни включения и выключения незначительно изменяются от температуры. Схема защиты имеет гистерезис срабатывания для предотвращения включения и выключения преобразователя в том случае, когда напряжение источника увеличивается не монотонно.

Сервисные функции

POL-преобразователи серии SBB имеют несколько важнейших сервисных функций, полезных для многих применений. Это дистанционное включение/отключение,

синхронизация частоты нескольких преобразователей, внешняя обратная связь для компенсации падения напряжения на соединительных проводниках, точная регулировка выходного напряжения и сигнал состояния выходного напряжения (РОК).

Дистанционное включение/отключение

Команда на включение или отключение может подаваться через вывод Enable (вывод 10). Преобразователь включает, когда на вывод Enable будет подан сигнал с логическим уровнем 0,4 В или ниже относительно вывода Input Return (вывод 2) и напряжение источника входного напряжения 5 В приложено к выводу Input. Преобразователь выключается, когда вывод Enable разомкнут, или при подаче на этот вывод сигнала с уровнем более 2,5 В. Типовое значение порога включения составляет 2,5 В относительно Input Return. Вывод Enable может быть использован для управления несколькими модулями при определении последовательности подачи выходного напряжения.

Синхронизация

Несколько модулей POL-преобразователей могут синхронизироваться одной рабочей частотой внешним источником сигнала в диапазоне частот 400 ± 40 кГц. Каждый модуль может также служить в качестве источника сигнала синхронизации и принимать сигнал от другого преобразователя при последовательном соединении, когда вывод Sync Out модуля A соединяется с выводом Sync модуля B, Sync Out B — с выводом Sync модуля C и т. д.

Внешняя обратная связь и регулировка выходного напряжения

При размещении нагрузки на некотором удалении от преобразователя для правильной работы необходимо вывод +Sense соединять с выходными выводами (4 и 5) или с выходной шиной непосредственно у нагрузки. В последнем случае модуль POL способен компенсировать падение напряжения на выходной линии положительной полярности напряжения. Это может быть достигнуто подключением вывода +Sense (6) к точке с высоким потенциалом нагрузки. Максимальное значение напряжения компенсации может достигать 10% от номинального значения выходного напряжения модуля в том случае, когда не используется функция регулировки выходного напряжения. Цепи Input Return и Output Return соединены внутри модуля. Для улучшения стабилизации выходного напряжения можно соединить цепи Input Return (вывод 2) и Output Return (вывод 3) внешним проводником.

Модули серии SBB также оснащены функцией регулировки выходного напряжения для его точной установки. Стандартное значение выходного напряжения каждого мо-

Таблица 1. Основные технические характеристики POL-преобразователей серии SBB

Код модуля	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Выходная мощность, Вт	КПД (тип.), %
SBB501S	1	14	14	72
SBB501R2S	1,2	14	16,8	73
SBB501R5S	1,5	14	21	76
SBB501R8S	1,8	14	25	79
SBB502R5S	2,5	12	30	86
SBB503RS	3,3	9,1	30	89

дуля устанавливается при производстве. Предлагаются модули с номинальными значениями выходного напряжения 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,5 и 3,3 В (табл. 1).

Однако в том случае, когда необходимо установить выходное напряжение немного ниже или выше, чем заданное стандартное значение, это можно сделать путем подключения внешнего резистора. Суммарное напряжение увеличенного напряжения и напряжения падения на выходной линии (при компенсации внешней обратной связью) ограничено $\pm 10\%$ от номинального значения выходного напряжения. В том случае, когда внешняя обратная связь не используется, максимальное значение выходного напряжения может быть установлено на 10% выше номинального значения. Для снижения выходного напряжения регулировочный резистор подключается между выводами V_{adjust} (7) и выводом Output (4 и 5), а для повышения выходного напряжения — между выводами V_{adjust} (7) и выводом Output Return (3). Формулы для расчета внешнего резистора приведены в спецификации [2].

Состояние выхода (Power OK)

Схема состояния выходного напряжения формирует логический сигнал высокого уровня (вывод 11) в случае, когда выходное напряжение преобразователя превышает значение, равное приблизительно 95% от номинальной величины. При перенапряжении на выходе сигнал РОК не падает до низкого логического уровня.

Компоновка и конструкция

Подобно большей части DC/DC-преобразователей компании International Rectifier POL-преобразователи серии SBB выполнены в виде герметичных толстопленочных гибридных сборок. Компоновка и конструкция позволяют получить многочисленные преимущества. Гибридная сборка со свойственной ей изотермической плоскостью обеспечивает наикратчайшие тепловые пути от компонентов к основанию корпуса для отвода тепла с наиболее низкими переходными тепловыми сопротивлениями. Использование в конструкции материалов с высокой теплопроводностью позволяет достичь лучших тепловых параметров. Конструкция сборки обеспечивает минимизацию повышения

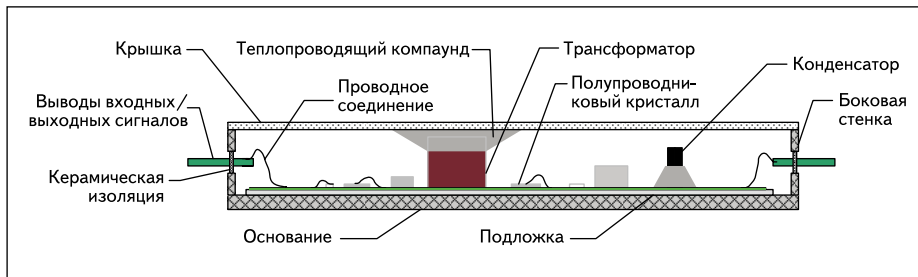


Рис. 4. Поперечное сечение конструкции POL-преобразователя серии SBB

температуры компонентов, соответственно — повышается надежность устройства.

Основание корпуса и боковые поверхности модуля сварены. В качестве материала для корпуса используется холоднокатаная сталь, придающая сборке жесткость. Крышка выполнена из ковара, она выполняет функцию экрана от воздействия протонного и электронного излучения. Крышка скреплена с корпусом швом для герметичности конструкции, что обеспечивает надежное функционирование в течение длительного срока. Упрощенный вид поперечного сечения конструкции POL-преобразователя серии SBB представлен на рис. 4.

На рис. 5 показан внешний вид преобразователя серии SBB.

Сборка модуля начинается с присоединения электронных компонентов пайкой или эпоксидным клеем к неизолированной толсто пленочной подложке из окиси бериллия (BeO), содержащей резисторы, нанесенные методом трафаретной печати.

Трансформаторы и другие детали из магнитных материалов присоединяются к подложкам и основанию сборки теплопроводящим эпоксидным материалом. Собранные подложки затем припаиваются к основанию. Каркасы с проводниками и проводные соединения прикрепляются от одной подложки к другой и от подложки к выводам. Затем проверяется качество сборки и контролируется функциональность. Компоненты с высоким профилем защищаются силиконовым наполнителем зазоров для усиления конструктивной прочности при воздействии ударных и вибрационных воздействий. Сборка завершается лазерным уплотнением



Рис. 5. Внешний вид POL-преобразователя серии SBB

крышки. Готовая сборка подвергается повторному испытанию для гарантирования правильной функциональности, и, если требуется, проводятся дополнительные отбраковочные испытания.

Отвод тепла

Габаритные размеры корпуса преобразователя серии SBB (Д×Ш×В) — 60,96×50,8×8,51 мм. Значения длины и ширины учитывают выступающие части выводов и монтажных проушин. Размеры основания корпуса — 48,26×50,8 мм. Расположение и размеры монтажных петель (проушин) таковы, что позволяют установить рядом несколько модулей, где крепежные проушины одного модуля могут быть размещены в одну линию с другим модулем для минимизации площади платы.

Для нормальной работы необходимо достаточное охлаждение. Для обеспечения отвода тепла модуль должен быть прикреплен к теплопроводящей поверхности. Для заполнения пустот между основанием корпуса и поверхностью, на которую установлен модуль, рекомендуется применять теплопроводящую электроизолирующую прокладку, подобную Sil-Pad [3]. Силиконовый каучук с высокой теплопроводностью заполняет все неровности микрорельефа поверхностей, повышая теплоотдачу.

Выходные квалификационные испытания

В настоящее время доступны модули POL-преобразователей для применения в аппаратуре ракетно-космической техники. Эти модули прошли испытания согласно требованиям технических условий MIL-PRF-38534. Образцы были подвергнуты испытаниям на стойкость к воздействию ионизирующих излучений: гарантируется работа модулей при накопленной дозе низкоинтенсивного ионизирующего излучения и отсутствие сбоев и катастрофических отказов от воздействия протонов и ионов естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей. Отчеты по результатам испытаний для квалификации изделий по Class K включают также результаты по ресурсным

испытаниям [4, 5]. Доступны отчеты по результатам анализов электрического и температурного воздействия, аварийных режимов и воздействий (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA), среднего времени наработки на отказ (MTBF) и наихудшего случая, представляющего эксплуатационные характеристики изделия при воздействии наихудшего сочетания внешних факторов, включая показатели срока службы.

Испытания для подтверждения стойкости к суммарной накопленной дозе радиации проводились на установке рентгеновского излучения с первичным источником на изотопе ^{60}Co , способной обеспечить мощности дозы излучения до 1 крад (SiO_2)/мин. Последовательность испытаний соответствовала методу испытаний согласно MIL-STD-883D Method 1019.5, условия В. Один образец (SBB503R3S) подвергнулся облучению в течение пяти сеансов. При первом сеансе было накоплено 50 крад, в течение последующих сеансов накапливалось по 50 крад. В последнем сеансе образцы получили суммарную дозу 300 крад. Второй образец (SBB503R3S) в течение первого сеанса получил дозу 50 крад, во втором сеансе — дополнительные 50 крад до суммарной дозы 100 крад; в течение третьего сеанса облучения было накоплено дополнительно 100 крад до суммарной дозы 200 крад, а во время четвертого сеанса было добавлено 100 крад до суммарной дозы 300 крад. При этом образцы были подключены к источнику напряжения 5 В, нагрузка составляла 6 А. Осуществлялся текущий контроль входного напряжения, входного тока, выходного напряжения и тока. Затем образцы были подвергнуты отжигу при температуре 125 °С в течение 160 часов, после чего была осуществлена полная функциональная проверка. Изменения электрических параметров при воздействии ионизирующего излучения незначительны.

Были отмечены следующие тенденции:

- Выходное напряжение уменьшилось на 3% при суммарной накопленной дозе 300 крад по объемному кремнию. После отжига выходное напряжение восстановилось до значения 0,5% от первоначального.
- Пороговое значение минимального входного напряжения и порог срабатывания сигнала включения уменьшились на 2,5% при значениях накопленной дозы до 200 крад (для модели SBB503R3S). Затем пороговое значение минимального входного напряжения увеличилось на 10% при дозах 200 и 300 крад (Si). После отжига пороговые значения входного минимального напряжения и напряжения включения вернулись к значениям 5% от первоначальных. Более подробно с результатами этих испытаний можно ознакомиться в отчете [4].

Одиночные эффекты от воздействия заряженных частиц космического пространства приводят к обратимым и необратимым (катастрофическим) отказам. На их долю

приходится до 35% обнаруженных отказов. Поэтому обеспечение требуемой стойкости бортовой аппаратуры к воздействию протонов и ионов — одна из важнейших задач создания космических аппаратов с длительными сроками активного существования.

Модули POL-преобразователей серии SBB выполнены на биполярных и МОП интегральных микросхемах и дискретных электронных компонентах. Цель испытаний на воздействие тяжелыми заряженными частицами — показать, что DC/DC-преобразователи не подвержены одиночным сбоям и катастрофическим отказам при пороговых линейных потерях энергии (ЛПЭ) иона в веществе 87 МэВ·см²/мг.

Испытания проводились на циклотроне, способном генерировать пучок тяжелых частиц с энергией 15 МэВ. Уровни энергий, пороговые линейные потери энергии (ЛПЭ) ионов в веществе и глубина проникновения

всех выбранных частиц ионов представлены в таблице 2.

При испытаниях у модулей были сняты крышки, и они были установлены на испытательной пластине перпендикулярно направлению воздействия пучка. Входное напряжение модуля было на уровне 5,5 В при номинальной нагрузке. При воздействии пучка непрерывно контролировались входное напряжение, ток и выходное напряжение.

Образца выдержали испытания при значениях ЛПЭ 37,6 и 87 МэВ·см²/мг. При воздействии ионов криптона с ЛПЭ 37 МэВ·см²/мг оба образца выдержали испытания без аномальных отклонений параметров.

При воздействии ионов ксенона с ЛПЭ 60 МэВ·см²/мг были отмечены изменения выходного напряжения не более 60 мВ, или 1,8% от номинального значения. Оба образца успешно выдержали воздействие пучка ионов золота с ЛПЭ 87,6 МэВ·см²/мг, однако было зарегистрировано отклонение выходного напряжения на 100 мВ, или 3% от номинального значения. Аномальным считается отклонение напряжения более чем на 10% от номинального значения.

Необходимо отметить, что для большей части применений на геостационарных орбитах, где присутствует воздействие протонов и электронов, захваченных поясами Ван

Алена, или при экспедициях в дальний космос, где заряженные частицы солнечных и галактических космических лучей воздействуют на бортовую аппаратуру, модули процессоров и микросхемы обвязки должны быть разработаны таким образом, чтобы исключить возбуждение паразитных тиристорных полупроводниковых структур (как правило, это сопровождается резким возрастанием тока потребления) при ЛПЭ > 37 МэВ·см²/мг [6]. Более подробно с вопросами оценки радиационной стойкости электронной аппаратуры космических аппаратов расчетными методами можно ознакомиться, например, в работе [7].

Примеры реальных данных испытаний и технических параметров

На рис. 6–9 представлены примеры типовых технических характеристик POL-преобразователей серии SBB.

Значения КПД для моделей с выходными напряжениями 3,3 и 1,2 В достигают максимума примерно при половинной нагрузке, и температура весьма незначительно влияет на показатели эффективности для модели с выходным напряжением 1,2 В. Подобный вывод можно сделать для других моделей серии SBB.

Таблица 2. Типы ионов, применяемые при тестировании на стойкость к воздействию заряженных частиц

Ион	Энергия, МэВ	Эффективное значение ЛПЭ, МэВ·см ² /мг	Глубина проникновения в кремний, мкм
⁸⁴ Kr	416	37	50,5
¹²⁹ Xe	737	60	59,6
¹⁹⁷ Au	1900	87,3	100,8

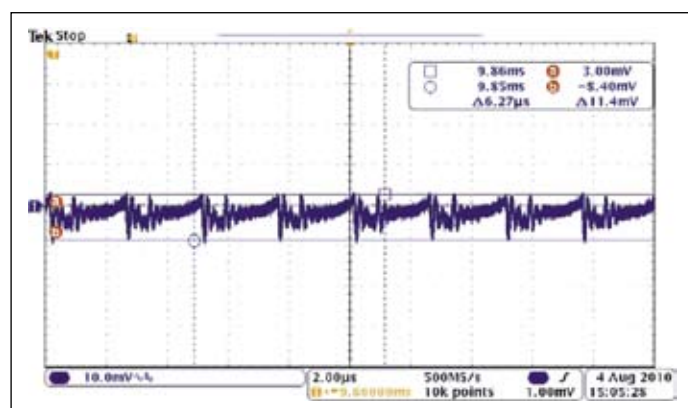


Рис. 6. Пульсации и шумы выходного напряжения SBB503R3S (выход 3,3 В) при входном напряжении 5 В и номинальной нагрузке

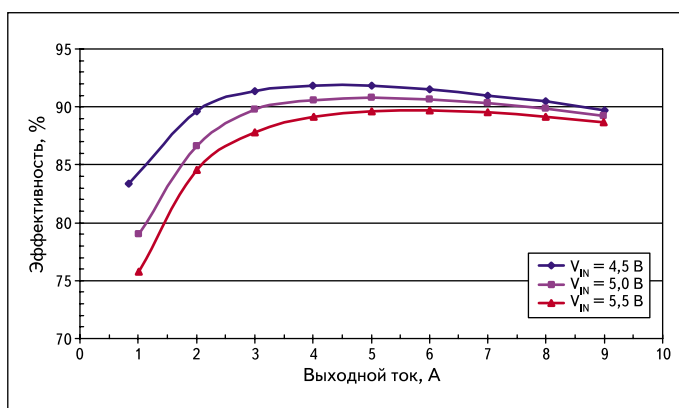


Рис. 7. Зависимость КПД от нагрузки и входного напряжения при +25 °C для модуля SBB503R3S (выходное напряжение 3,3 В)

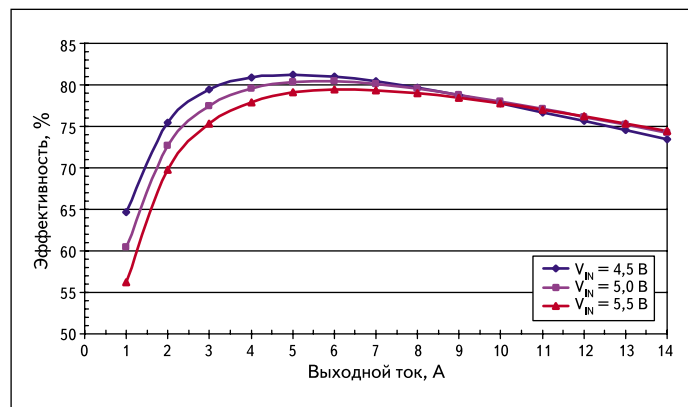


Рис. 8. Зависимость КПД от нагрузки и входного напряжения при +25 °C для модуля SBB501R2S (выходное напряжение 1,2 В)

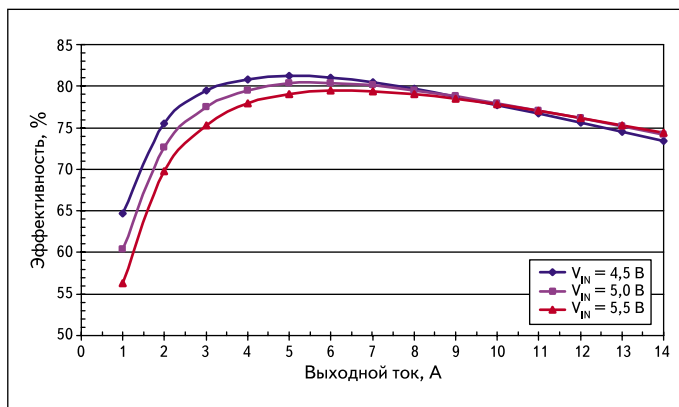


Рис. 9. Зависимость КПД от нагрузки и входного напряжения при +85 °C для модуля SBB501R2S (выходное напряжение 1,2 В)

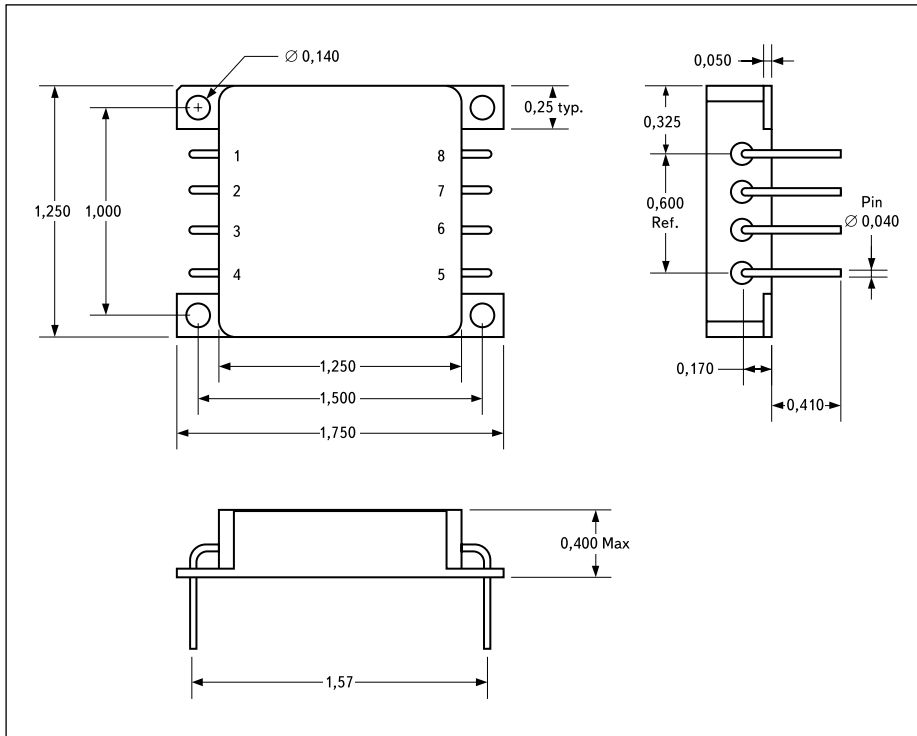


Рис. 10. Чертеж корпуса POL-преобразователя серии SBA (размеры указаны в дюймах)

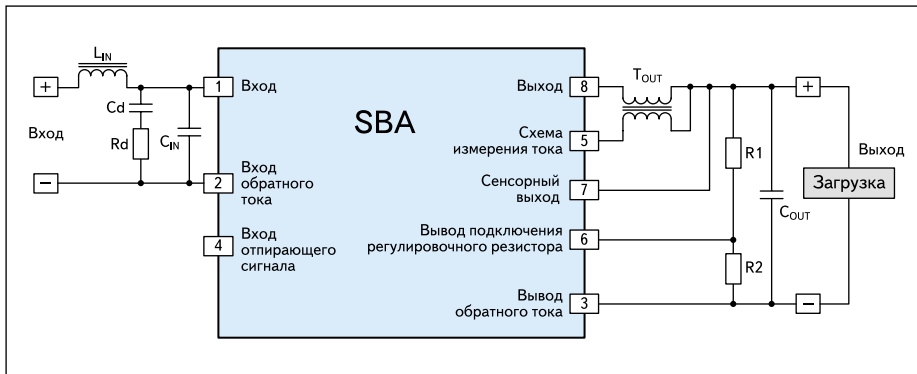


Рис. 11. Схема подключения внешних компонентов к модулю POL-преобразователя серии SBA

Перспективные разработки

В соответствии с требованиями рынка и тенденциями проектирования в разработке компании International Rectifier находятся другие платформы, включая высокоэффективные 50-ваттные одноканальные DC/DC-преобразователи с гальванической развязкой серии GH, 100-ваттные DC/DC-преобразователи серии ZA, предназначенные

для формирования промежуточной шины напряжения, а также маломощную модификацию POL-преобразователей серии SBB — 10-ваттные DC/DC-преобразователи серии SBA. Серии GH и SBA предназначены для применения в маломощных распределенных системах электропитания, тогда как модули серии ZA предназначены для поддержки распределенных систем электропитания средней мощности.

В таблице 3 представлены предварительные технические параметры POL-преобразователей серии SBA. Структурная схема преобразователя серии SBA аналогична схеме преобразователя серии SBB. Эксплуатационные параметры также сходны с характеристиками изделий SBB, за исключением диапазона регулировки выходного напряжения: для серии SBA он составляет $\pm 5\%$. Габаритные размеры POL-преобразователя — $31,75 \times 31,75 \times 10,16$ мм,

Таблица 3. Основные технические характеристики POL-преобразователей серии SBA

Код модуля	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Выходная мощность, Вт	КПД (мин.), %
SBA501S	1	5	5	70
SBA501R5S	1,5	5	7,5	75
SBA501R8S	1,8	5	9	77
SBA502R5S	2,5	4	10	82
SBA503R3S	3,3	3,3	10	86

масса корпуса — < 36 г. Модули серии SBA с вертикальным расположением выводов предназначены для установки в отверстия печатной платы (рис. 10).

На рис. 11 показана схема подключения внешних компонентов к модулю POL-преобразователя серии SBA [8]. Рекомендуемые значения параметров компонентов будут определены при начале серийного выпуска в конце 2011 года.

Заключение

После нескольких лет всесторонних исследований и проектирования компании International Rectifier успешно преодолела сложные проблемы в разработке и конструировании первого радиационно-стойкого стабилизатора напряжения типа POL, предназначенного для применения в мощных системах электропитания аппаратуры космической техники. Ключевые факторы в успешной разработке — это выбор компонентов для применения в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства, выбор материалов, проверенной структуры схемы, небольшой запас по снижению параметров компонентов, конструкция сборки и процесс разработки. Преобразователи серий SBB и SBA обеспечивают преимущества, выражающиеся в сниженной стоимости программы, коротких сроках выполнения заказа и простоте интеграции системы. Имея высокие показатели эффективности и небольшую площадь основания, преобразователи серий SBA и SBB оптимально подходят для применения в распределенных системах электропитания современных цифровых устройств.

Литература

- Bussarakons T. High Power Space Grade Point of Load (POL) Voltage Regulator for Distributed Power Architecture (DPA): SBB Series White Paper. International Rectifier. 24.09.2010.
- PD-97563. SBB Series Single Output POL: Data Sheet: International Rectifier. 10.01.2010.
- Шахнович И. Эластичные изолирующие термоводящие материалы // Компоненты и технологии. 2001. № 7.
- Total Dose Test Report for SBB-Series DC/DC-Converter. International Rectifier. Sept. 2009.
- Single Event Effect Test Report for SBB-Series DC/DC-Converter. International Rectifier. Apr. 2009.
- Lai A. Space-ready, radiation-tolerant processor modules: A COTS technology strategy // Military Embedded Magazine. 2005.
- Полеский С., Жаднов В., Артюхова М., Прохоров В. Обеспечение радиационной стойкости аппаратуры космических аппаратов при проектировании // Компоненты и технологии. 2010. № 9.
- SBA Series Single Output POL: Data Sheet. Preliminary. International Rectifier. 17.07.2009.