

Радиационно-стойкие источники питания компании Microsemi для высоконадежных применений

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ
info@icquest.ru

В статье представлены перспективные радиационно-стойкие источники питания, предлагаемые компанией Microsemi для военного и космического применения. Приводятся основные технические характеристики, соответствующие требованиям стандартов, рассматриваются типовые схемы подключения, а также методика проведения выходных испытаний готовой продукции.

Введение

Современные тенденции развития оборудования специального назначения, применяемого в космических и военных программах, напрямую связаны с усовершенствованием электронно-вычислительной техники. Повышение объемов обрабатываемых данных и скорости передачи информации требует применения высокопроизводительных контроллеров, цифровых сигнальных процессоров, микросхем памяти и т.д., для питания которых обычно необходимо несколько номиналов стабильных напряжений (1,2; 1,8; 2,5; 3,3 В) [1].

Для обеспечения безотказной работы сложного и дорогого военного и космического оборудования источники питания должны соответствовать ряду жестких требований. Так, импульсный характер изменения потребляемого тока, вызванный пиковыми вычислительными нагрузками, диктует необходимость высокой выходной мощности и эффективности преобразования напряжения систем электропитания. Источники питания часто располагаются в непосредственной близости от питаемого оборудования, в том числе высокочастотного. Поэтому преобразователи должны быть сконструированы таким образом, чтобы соответствовать требованиям по уровню кондуктивных помех, генерируемым самим преобразователем, и по устойчивости к импульсным помехам, наводимым системой [2].

Важным дополнением, позволяющим обеспечить безопасность и гибкость применения модулей питания, является наличие ряда вспомогательных функций, а именно: защиты от короткого замыкания и перенапряжения, внешней синхронизации, дистанционных команд включения/выключения, регулирования выходного напряжения. Необходимость

применения этих функций регламентируется специальными стандартами. Кроме того, к преобразователям напряжения, предназначенным для эксплуатации в бортовой аппаратуре авиационной и космической техники, предъявляются дополнительные требования по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам (механическим, климатическим и специальным средам). Испытания на соответствие данным условиям основываются на методах, описанных в стандарте MIL-PRF-38534.

Основные требования, предъявляемые к регуляторам питания и включающие в себя показатели надежности, допустимые уровни пульсаций на выходе, диапазоны входных и выходных напряжений, эффективность преобразования энергии и другие параметры, представлены в таблице 1. Исходя из характеристик приборов, размещаемых на оборонных и космических объектах, в настоящее время наиболее востребованы преобразователи напряжения с выходной мощностью до 100 Вт, частотой преобразования от 375 до 675 кГц и КПД от 80%.

Одним из важнейших требований к электронным компонентам, предназначенным для применений в составе аппаратуры космических аппаратов, является радиационная стойкость, которая во многом определяет вероятность безотказной работы бортовых систем и, как следствие, длительность срока активной эксплуатации. Преобразователи должны длительное время работать в условиях воздействия полей ионизирующих излучений космического пространства без ухудшения технических характеристик или без отказов при поглощенной дозе в диапазоне от 25 до 100 крад и более. Также требуется, чтобы источник питания бортовой радиоэлектронной аппаратуры сохранял работоспособность при воздействии на него за-

ряженных частиц космического пространства, так как вызываемые ими одиночные эффекты приводят к обратимым и необратимым (катастрофическим) отказам. Согласно статистике на их долю приходится до 35% обнаруженных отказов.

Типовые значения линейных потерь энергии (ЛПЭ) заряженных частиц в материале, при которых начинают наблюдаться одиночные эффекты, составляет от 37 до 83 МэВ·см²/мг. Вероятность возникновения одиночных эффектов зависит от условий пребывания аппаратуры в космосе (параметров

Таблица 1. Типовые требования к преобразователям питания, применяемым в бортовой аппаратуре

Параметр	Типовые требования
Требования к электрическим параметрам	
Входное напряжение	28 В; 100 В постоянного тока
Выходные напряжения	От 1 до 15 В
Количество выходных каналов	От 1 до 3
Выходная мощность	От единиц до 100 Вт
КПД	Не менее 80%
Пульсации выходного напряжения	От 20 до 50 мВ
Электромагнитные помехи	Стойкость к воздействию кондуктивных помех и уровень собственного излучения определяется стандартом MIL-STD-461
Системные функции	
Наличие входа синхронизации	Требуется
Дистанционное включение/выключение	Требуется
Ограничение выходного тока	Требуется
Регулировка выходного напряжения	Требуется
Плавное включение	Требуется
Требования к параметрам радиационной стойкости	
Допустимое значение суммарной поглощенной дозы	От 25 до 100 крад
Одиночные эффекты	Отсутствие необратимых отказов от воздействия космических заряженных частиц при ЛПЭ от 37 до 83 МэВ·см ² /мг
Устойчивость к воздействию ионизирующих излучений небольшой интенсивности	От 5 до 10 мрад/с (согласно методу 1019.9 стандарта MIL-STD-883H)

орбиты, времени функционирования и пр.). Повышение радиационной стойкости является сложной задачей и требует принятия мер на всех стадиях разработки: конструирования библиотечных элементов схем, моделирования схемотехнических решений, трассировки шин питания, технологического процесса изготовления, разработки методик для оценки степени воздействия излучения и т. д. Успешное решение этой задачи позволило компании Microsemi представить семейство радиационно-стойких источников питания, отвечающих всем современным требованиям.

Радиационно-стойкие высоконадежные источники питания Microsemi

Компания Microsemi известна в качестве разработчика высоконадежной электроники для военных, авиационных и космических применений и имеет собственный многолетний опыт производства радиационно-стойкой продукции. Твердотельные реле и транзисторы на основе нитрида галлия находят широкое применение вследствие высокой надежности, превосходных рабочих характеристик и использованию современных материалов. Рассматриваемая линейка преобразователей питания появилась в результате объединения наработок двух компаний. (Фирма Satcon — производитель высококачественных гибридных электронных модулей с более чем 30-летним опытом работы — была приобретена компанией Microsemi.)

Семейство радиационно-стойких источников питания состоит из DC/DC-преобразователей типа POL (серия MHP856X), гальванически изолированных SA50-120 и SA50-28 с высокой выходной мощностью, линейных регуляторов MHL117X/MHL127X, выполненных по гибридной технологии, и линейных стабилизаторов напряжения MHL860X со сверхмалым падением напряжения [3].

DC/DC-преобразователи типа POL

Преобразователи типа POL (point-of-load) размещаются в непосредственной близости от питаемого функционального узла. Они предназначены для использования в распределенных системах электропитания бортовой аппаратуры. Преобразователи семейства MHP856X обеспечивают максимальную гибкость благодаря набору управляемых функций и разработаны для формирования стабильного напряжения в жестких условиях окружающей среды (при рабочей температуре от -55 до $+125$ °C и воздействии радиации). Диапазон входных напряжений — от 4,5 до 16 В постоянного тока, выходное напряжение фиксированное либо регулируемое, от 1 до 4 В с погрешностью установки, не превышающей 1% [4].

Понижающий ШИМ-контроллер, катушка индуктивности, фильтрующие конденсаторы на входе и выходе объединены в компак-

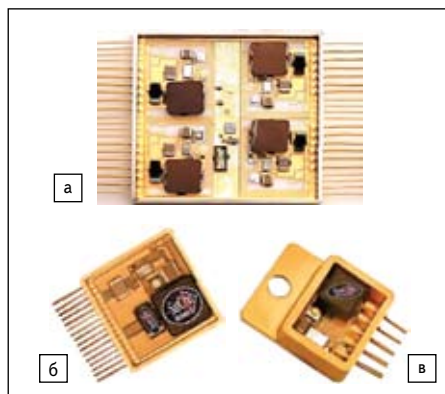


Рис. 1. Внешний вид радиационно-стойких POL-преобразователей:
а) MHP8566; б) MHP8564; в) MHP8565

ном металлическом корпусе. В зависимости от количества выходных каналов, а также от величины выходного тока применяются три вида герметичных корпусов: 5-выводный MO-078 ($27 \times 32 \times 8$ мм), 16-выводный SIP ($35,3 \times 36 \times 9,8$ мм) и 42-выводный Flat pack ($82,5 \times 82,5 \times 11,2$ мм). Высокое значение КПД уменьшает проблемы, связанные с рассеиваемой тепловой мощностью, тем не менее, для обеспечения лучшего теплоотвода рекомендуется прикреплять преобразователи к теплопроводящей поверхности.

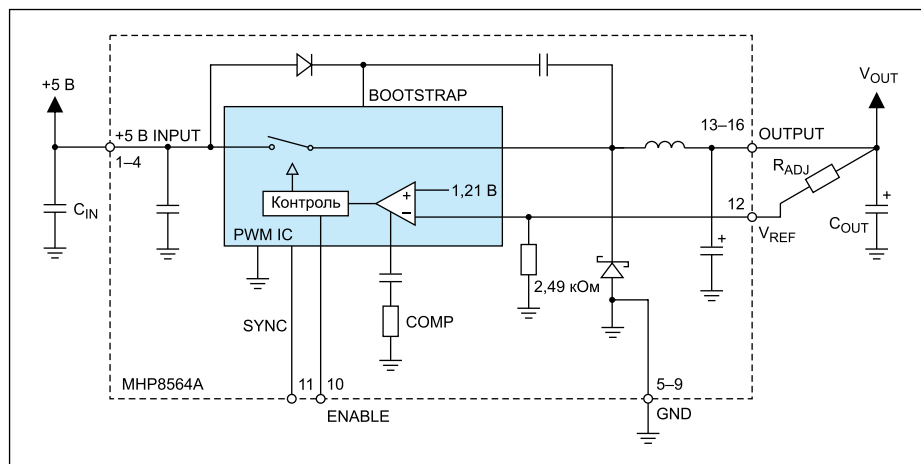


Рис. 2. Схема подключения радиационно-стойкого регулятора MHP8564A

Таблица 2. Основные характеристики POL-преобразователей Microsemi

Наименование	Напряжение питания, В	Диапазон выходных напряжений, В	Максимальный выходной ток, А	Тип корпуса			Выход			Дополнительные функции			Примечание
				MO-078	SIP	Flat Pack	Регулируемый	Фиксированный	Измерение выходного напряжения	Выход Enable	Параллельное включение	Внешняя синхронизация	
MHP8565A	5	1–4	3,5	✓			✓			✓			Малогобаритный
MHP8565P	5	1–4	3,5	✓			✓				✓	✓	Малогобаритный
MHP8564A	5	1–4	4,5		✓		✓			✓		✓	
MHP8564F	5	1–4	4,5		✓			✓		✓		✓	
MHP8564R	5	1–4	4,5		✓				✓	✓		✓	
MHP8564S	5	1–4	4,5		✓		✓			✓	✓	✓	
MHP8566A	5	1–4	18			✓	✓			✓	✓	✓	4 выхода
MHP8567A	12	1–10	18			✓	✓			✓	✓	✓	4 выхода

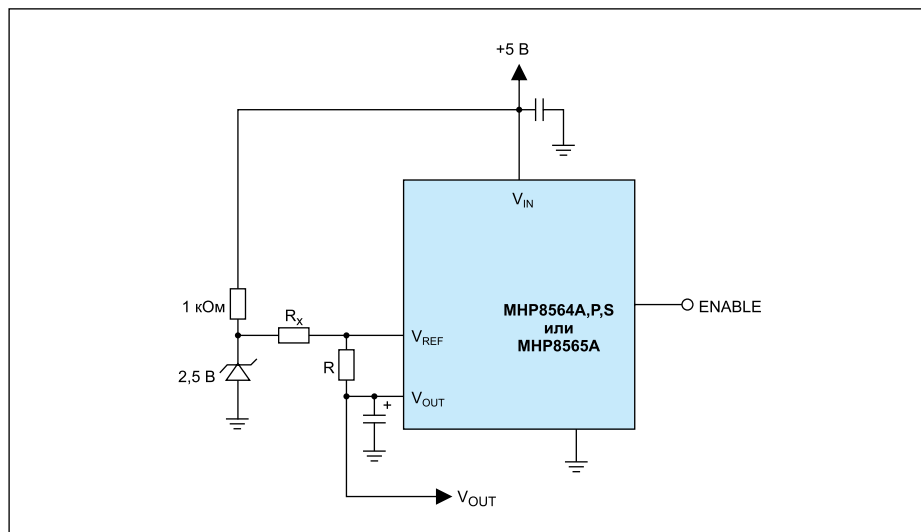


Рис. 3. Схема подключения MHP8564A для получения выходного напряжения менее 1,21 В

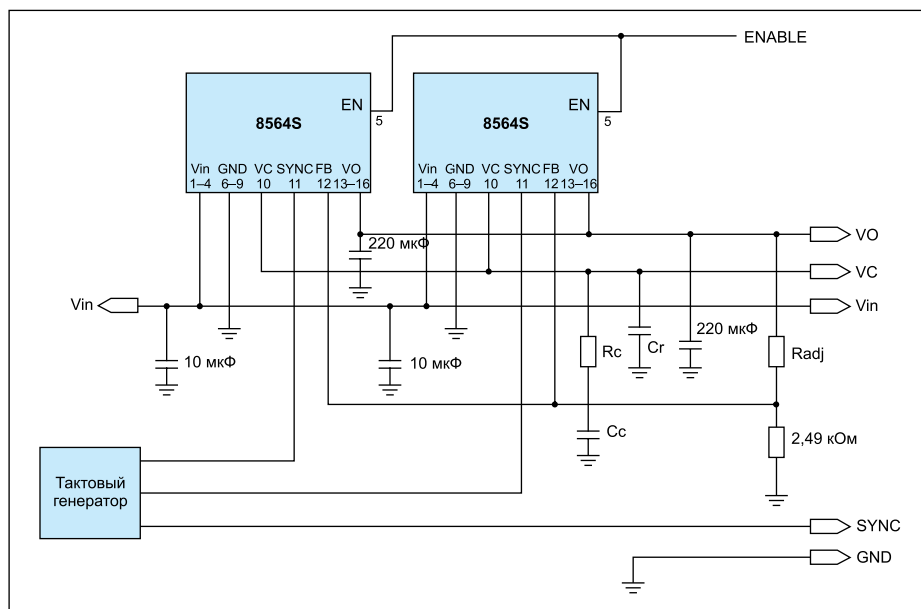


Рис. 4. Параллельное соединение двух модулей MHP8564S

- Режим контроля тока.
- Защита от перегрузки и короткого замыкания.
- Использование малогабаритных корпусов.

На рис. 2 показана внутренняя структура и стандартная схема подключения преобразователя MHP8564A с регулируемым выходным напряжением. При $R_{ADJ} = 2670 \text{ Ом}$ выходное напряжение составляет 2,5 В [5].

Рекомендованная емкость внешнего входного конденсатора лежит в пределах от 10 до 50 мкФ. Для улучшения стабильности напряжения выходные конденсаторы должны обладать малым эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) от 50 до 200 мОм (например, подойдут танталовые CWR29FC227). При помощи вывода Enable осуществляется дистанционное включение/выключение модуля. В том случае, когда на выводе присутствует напряжение более

2,5 и менее 7 В, осуществляется нормальное преобразование напряжения. Соединение этого вывода с «землей» блокирует преобразование напряжения, что приводит к отсутствию выходного напряжения и значительно снижает потребление тока. Подключением внешнего резистора к выводу V_{REF} задается требуемое выходное напряжение, которое лежит в диапазоне 1,21–4 В и рассчитывается по формуле $V_{OUT} = 1,21(1 + R_{ADJ}/2490)$. Для получения более низких значений напряжения (до 1 В) схему подключения необходимо модернизировать так, как изображено на рис. 3.

Измерительный вход обратной связи Sense у преобразователя MHP8564R предназначен для компенсации падения напряжения на проводах или дорожках между выходом источника и нагрузкой и поддержания предварительно установленного выходного напряжения. Функция внешней

синхронизации частоты преобразования является важнейшим свойством для конструкций с низким уровнем помех. Внешняя синхронизация осуществляется путем подачи сигнала тактового генератора с частотой от 580 до 1000 кГц на вход SYNC. Для увеличения выходного тока применяется параллельное включение отдельных модулей (рис. 4). Синхронизированная работа DC/DC-преобразователей при параллельном включении резко уменьшает суммарный уровень высокочастотных помех (на 50%) и ширину их спектра, что значительно облегчает фильтрацию нежелательных спектральных составляющих.

Отдельного внимания заслуживают четырехканальные регуляторы MHP8566A и MHP8567A. Эти модули состоят из четырех независимых POL-преобразователей, полностью эквивалентных модулю MHP8564S. Каждый из выходов MHP8566A характеризуется регулируемым напряжением от 1 до 4 В, при этом общий максимальный ток достигает значения 18 А. В отличие от MHP8566A, оптимизированного для входного напряжения 5 В, преобразователь MHP8567A использует 12-В шину питания, а выход регулируется в пределах от 1 до 10 В. Возможность параллельного соединения каждой из четырех частей в произвольной комбинации позволяет использовать MHP8566A и MHP8567A для питания одной или нескольких нагрузок.

Новые серии радиационно-стойких гальванически изолированных DC/DC-преобразователей SA50-120 и SA50-28 предназначены для применения в космических аппаратах. Они характеризуются высокой выходной мощностью (до 50 Вт) и КПД свыше 86%. В настоящее время для разработчиков доступны несколько модификаций, которые отличаются входными напряжениями, адаптированными для шин питания 28 и 100 В, а также различными комбинациями выходного напряжения и тока. Изготовленные в унифицированном корпусе, DC/DC-преобразователи имеют от одного до трех выходных каналов со значениями +3,3/+5 В (4/6 А), $\pm 12/\pm 15$ В (1/1,25 А). Эти устройства оптимальны для работы в составе распределенных и сосредоточенных систем электропитания. Низкий уровень шумов обеспечивается встроенными фильтрами на входе и выходе. Как и ранее описанные преобразователи, SA50-120 и SA50-28 имеют функции защиты от перегрузки по току и короткого замыкания, дистанционного включения/выключения, внешней синхронизации, а также выключения при пониженном входном напряжении. Радиационная стойкость по общей накопленной дозе (свыше 100 крад), а также широкий диапазон рабочих температур (от -55 до $+125$ °C) позволяют достичь среднего времени наработки на отказ в 5 млн часов.

Унифицированное корпусное исполнение, технические характеристики, определяемые

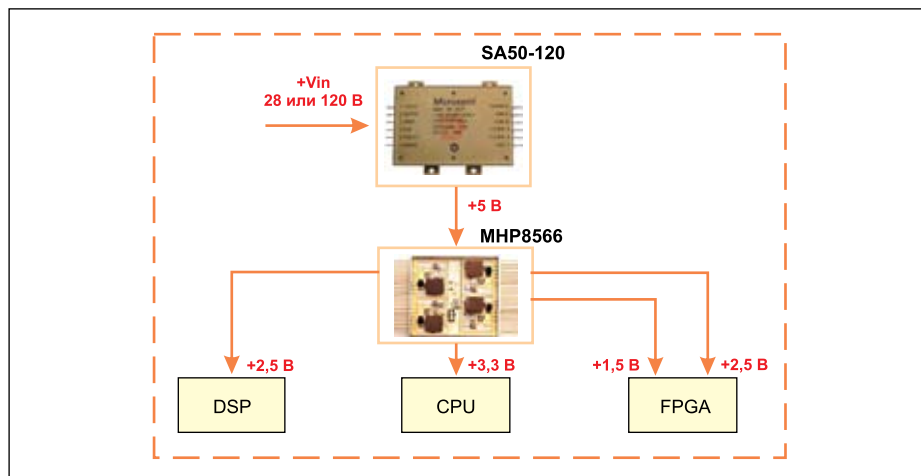


Рис. 5. Упрощенная структура системы питания на основе DC/DC-модулей Microsemi

специальными стандартами, облегчают взаимозаменяемость составляющих источников питания в зависимости от поставленной задачи. Реализация модульного принципа построения систем электропитания приводит к значительному уменьшению их габаритов, придает гибкость в отношении конструкции, набора номиналов и функций, а также влечет за собой сокращение затрат, так как разработчики высоконадежных изделий получают возможность приобретать и применять только необходимые модули, не допуская тем самым аппаратной избыточности. Зачастую при этом предпочтение отдается компонентам одного производителя, так как они разрабатываются с учетом возможного совместного применения, изготавливаются на одних и тех же производственных линиях и тестируются на соответствие требуемым стандартам. Кроме того, в этом случае гарантируется удобная техническая поддержка проектов.

Упрощенная структура системы питания низковольтного оборудования на основе модулей Microsemi представлена на рис. 5.

Гибридные преобразователи

Гибридные преобразователи характеризуются малыми габаритными размерами и массой. Ряд достоинств определяет широкие эксплуатационные возможности преобразователей напряжения данного типа в различных областях применения. Наиболее значимые среди них — высокая плотность упаковки компонентов, минимальное количество внутрисхемных электрических соединений, минимальное сопротивление теплопередачи от всех теплонагруженных элементов конструкции к поверхности теплоотвода и наивысшая степень герметичности изделий.

Гибридные преобразователи серий MHL117X/MHL127X отвечают требованиям космических применений с наивысшим уровнем безотказности и изготавливаются в виде герметизированных модулей в малогабаритных планарных корпусах D2 (MHL117X) и TO-254 (MHL127X). Компоненты этих серий

представляют собой линейные стабилизаторы напряжения, сертифицированные на основе стандарта MIL-PRF-38534 (класс K) для применения в аппаратуре космических аппаратов и военном оборудовании и отличающиеся повышенной радиационной стойкостью [6]. Минимальная накопленная доза, при которой начинают проявляться радиационные эффекты, составляет не менее 300 крад. Кроме того, гарантирована высокая стойкость к возникновению одиночных событий: отсутствие однократных восстанавливаемых отказов (SET) при ЛПД до 15 МэВ·см²/мг и тиристорных эффектов (SEL), вызванных ионизацией, до 87,4 МэВ·см²/мг.

Серия MHL117X с максимальным выходным током 1,5 А отличается широким диапазоном входных напряжений (до 40 В). Регулировка выходного напряжения в пределах от 1,25 до 37 В осуществляется при помощи двух внешних резисторов, при этом погрешность его установки не превышает 1%. Стабилизаторы с фиксированным выходом не требуют использования внешних компонентов.

Серия MHL127X — это двоярные линейные стабилизаторы положительного и отрицательного напряжения, предназначенные

для применения совместно с операционными и логарифмическими усилителями общего назначения, требующими двухполярного питания [7]. Максимальный выходной ток 1 А обеспечивается на всем диапазоне входных напряжений от +4,25 до +35 В и от -3,25 до -25 В. Превосходная температурная стабильность стабилизаторов MHL117X/MHL127X во всем рабочем диапазоне от -55 до +125 °С, наличие защиты от превышения температуры и схемы ограничения выходного тока гарантируют безопасное функционирование питаемого оборудования.

При разработке конструкции анализировались результаты электрического и температурного воздействия, показатели надежности изделия, а также эксплуатационные характеристики преобразователей при воздействии наихудшего сочетания внешних факторов. Все внутренние компоненты тщательно отобраны, и их параметры зафиксированы для гарантии надежной работы при заданных условиях окружающей среды. Их следует выбирать для устройств, где требуются высокая радиационная стойкость и стабильное выходное напряжение с малым уровнем шума.

Линейные стабилизаторы напряжения со сверхмалым падением напряжения

Как было отмечено ранее, в бортовой аппаратуре космических аппаратов широко применяются высокопроизводительные процессоры и ПЛИС с низким напряжением питания и большим током потребления. Для их питания, как правило, используются высокоэффективные импульсные преобразователи. Однако для устройств, требовательных к уровню шумов, предпочтение зачастую отдается линейным стабилизаторам напряжения с малым падением напряжения. Основное требование, предъявляемое к стабилизаторам этого типа — высокая точность выходного напряжения, сохраняющаяся в условиях воздействия переменной температуры, радиации и других дестабилизирующих факторов.

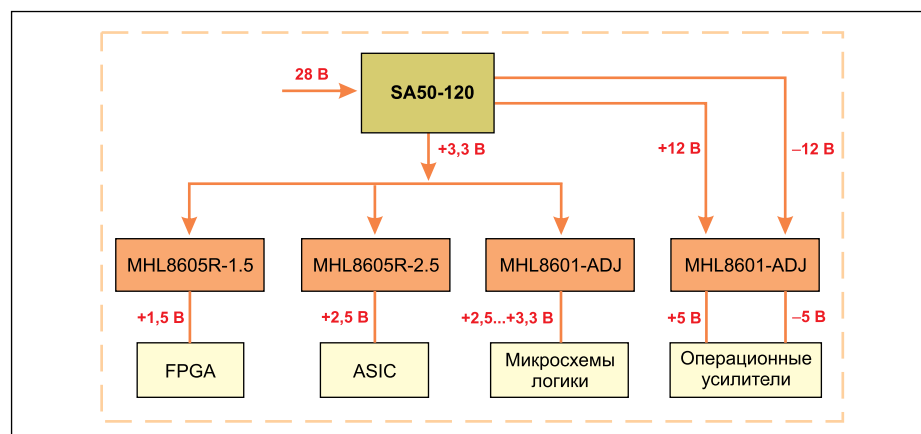


Рис. 6. Упрощенная структура системы питания с применением линейных стабилизаторов с малым падением напряжения от компании Microsemi

Линейные стабилизаторы положительного напряжения MHL860X со сверхмалым падением напряжения и радиационной стойкостью более 300 крад изготавливаются в герметичном 5-выводном корпусе МО-078 (рис. 1). Они предназначены для применения в аппаратуре космических аппаратов в качестве локализованных к нагрузке стабилизаторов, а также для дополнительной стабилизации напряжения после DC/DC-преобразователей. Компоненты этой серии сертифицированы на основе стандарта MIL-PRF-38534 (класс К) [8]. Преобразователи оптимизированы для входных напряжений +5 и +3,3 В, падение напряжения не превышает 0,3 В для 3-А версии и 0,4 В для 5-А, выходное напряжение при этом может быть фиксированным либо регулируемым в пределах от 1,265 до 5 В. Встроенные фильтрующие конденсаторы проходят испытания в соответствии с методами, изложенными в стандартах MIL-PRF-123 и MIL-PRF-55365. Возможность дистанционного отключения и защита от превышения заданной температуры обеспечивают безопасность эксплуатации.

Пример использования линейных стабилизаторов Microsemi при построении системы электропитания приведен на рис. 6.

Отбраковочные испытания готовой продукции

Вся разработанная компанией Microsemi продукция класса К, которая предназначена для применения в аппаратуре космического базирования и при эксплуатации функционирует в условиях ионизирующих излучений, проводит квалификационные испытания на воздействие радиации и одиночных ядерных частиц. Радиационно-стойкие источники питания подвергаются квалификационным испытаниям по ряду прямых и косвенных электрических признаков.

В таблице 3 приведен перечень тестов, определяемых военным стандартом MIL-STD-883 и используемых для выявления потенциально ненадежных изделий. Введение дополнительных испытаний позволяет повысить надежность продукции на порядок.

Испытания для подтверждения стойкости к суммарной накопленной дозе радиации

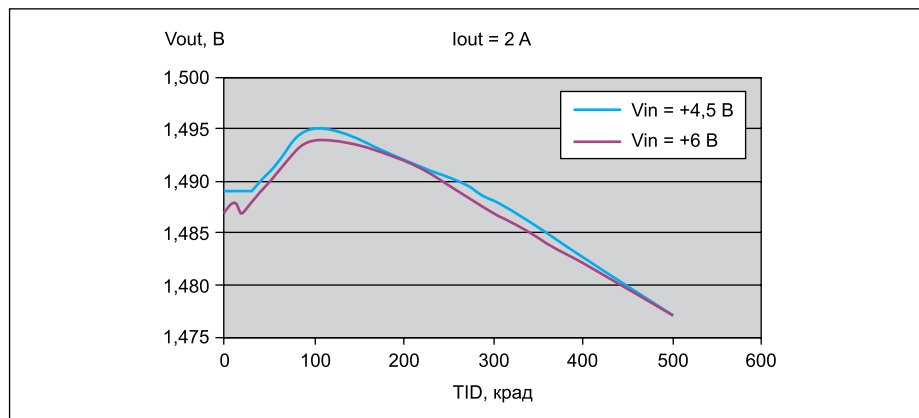


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения от суммарной поглощенной дозы для преобразователей серии MHP856X

проводятся в последовательности, указанной в методе 1019.5 стандарта MIL-STD-883D, при этом осуществляется непрерывный текущий контроль входных и выходных электрических параметров. Результаты испытаний, а именно значения воздействующих факторов, при которых обеспечивается радиационная защита, представлены в таблице 4. Большинство компонентов способны нормально функционировать до величины суммарной дозы ионизирующего излучения в 300 крад, с гарантированным отсутствием одиночных эффектов при воздействии протонов и ионов естественных радиационных поясов Земли, при значениях пороговых линейных потерь энергии (ЛПЭ) ионов в веществе от 55 до 87 МэВ·см²/мг. Значение выходного напряжения меняется незначительно (не более 1% от номинала) при суммарной поглощенной дозе до 300 крад, что подтверждает рис. 7 (для серии MHP856X).

Заключение

Надежность функционирования высокопроизводительного оборудования космического применения непрерывно связана с качеством источников его питания. Ряд жестких требований, определяемых сложными условиями эксплуатации, требуют непрерывного контроля на всех стадиях производства. Радиационно-стойкие преобразователи питания компании Microsemi представляют

собой разумный компромисс между качеством и стоимостью конечных изделий. Конструкция изделий отличается компактными габаритами, простотой для системной интеграции и приспособлена для условий космического полета. Она обеспечивает высокие показатели эффективности и технические характеристики, соответствующие требованиям к питанию современных цифровых нагрузок. Оптимизация технологических процессов изготовления позволила значительно снизить производственные затраты и повысить качество изделий.

Литература

1. Жданкин В. Радиационно-стойкие низковольтные DC/DC-преобразователи для распределенных систем электропитания ракетно-космической техники // Компоненты и технологии. 2011. № 7.
2. Жданкин В. Радиационно-стойкие гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи — стандартные компоненты систем электропитания КА // СТА. 2012. № 1.
3. www.microsemi.com
4. Technical Datasheet. Single and Quad Amp & 4 Amp POL Regulators. MHP Series. Rev. 11.
5. Tasker A. Application Note. Radiation Hardened Point-of-Load Regulators, MHP8564/8565/8566/8567. 2011.
6. Technical Datasheet. MHL117/MHL117A/MHL117B/MHL117Q. Rev. 9.
7. Technical Datasheet. Rad-Hard, Dual, Adjustable, Negative & Positive, Linear Voltage Regulator. MHL127A Series. Rev. 1.
8. Technical Datasheet. 3 Amp & 5 Amp ULDO Regulators. Rev. 6.

Таблица 4. Основные показатели радиационной стойкости источников питания класса К компании Microsemi

Наименование	Суммарная поглощенная доза, крад	Стойкость к одиночным эффектам при ЛПЭ, МэВ·см ² /мг
MHL8601/5	300	55
MHL117	300	87
MHL127	300	87
MHP8564/5	300	58
MHP8566/7	300	58
SA50-28 и SA50-120	100	80

Таблица 3. Перечень тестов, используемых при выходных испытаниях

Тестирование	С	Н	К	Метод стандарта MIL-STD-883D
	COTS	Согласно стандарту MIL-PRF-38534		
Оценка состояния компонентов	Не определено	Класс Н	Класс К	—
Неразрушающий контроль соединений	Не определено	Выборочно из партии	100%	2023
Визуальный внутренний осмотр	Не определено	100%	100%	2017
Термоциклирование	Не определено	100%	100%	1010
Воздействие постоянных ускорений	Не определено	100%	100%	2001
Виброиспытания	Не определено	100%	100%	2020
Термоэлектротренировка	Не определено	100%	100%	—
Технологический прогон	Не определено	100% (160 ч)	100% (320 ч)	1015
Финальный электрический контроль	100% (при +25 °С)	100%	100%	—
Проверка герметичности	100%	100%	100%	1014
Радиационные испытания	Не определено	N/A	Да	2012
Внешний визуальный осмотр	Выборочно	100%	100%	2009
Сертификация	Не определено	Да	Да	—