

Серийные DC/DC-преобразователи с повышенной радиационной стойкостью для аппаратуры низкоорбитальных космических аппаратов

Виктор ЖДАНКИН,
технический специалист,
victor@prochip.ru

Модульные DC/DC-преобразователи напряжения преобразуют входное напряжение постоянного тока в выходные напряжения с разными номинальными значениями. В космических бортовых системах узлы преобразователей напряжения обеспечивают преобразование мощности от таких первичных источников, как солнечные панели или аккумуляторные батареи в соответствующие напряжения для электронных узлов коммуникации, телеметрии и управления. В числе основных сложных задач для авиакосмических применений является сохранение безотказной работы при жестких ударных и вибрационных воздействиях во время запуска космического аппарата, при предельных температурных воздействиях на фоне давления глубокого космического вакуума и жестких радиационных воздействиях на полупроводниковые изделия на орбите.

DC/DC-преобразователи, эксплуатирующиеся в аппаратуре авиационной, ракетной и космической техники, характеризуются не только высоким качеством, но и существенной массой, стоимостью и временем разработки, особенно если они сконструированы в соответствии с требованиями заказчика и созданы для особых применений. Несмотря на существующие сложные проблемы при разработке DC/DC-преобразователей, предназначенных для применения в бортовой космической аппаратуре, компания VPT Inc. преодолела многие ограничения. Эта компания, являющаяся мировым лидером в области решений по преобразованию энергии для применения в военной технике, авиационном электронном оборудовании, космической технике, разработала высоконадежные, серийно выпускаемые (Commercial Off-The-Shelf, COTS) DC/DC-преобразователи, которые позволяют значительно сократить стоимость изделия без снижения уровня эксплуатационных качеств.

Внешние воздействующие факторы и испытания

Полезные нагрузки, квалифицированные для применения в составе аппаратуры космической техники, должны быть разработаны и испытаны для сохранения безотказности при воздействии нескольких дестабилизирующих факторов окружающей обстановки, которые могут быть вероятными при эксплуатации полезной нагрузки. К этим дестабилизирующим факторам относятся:

- **Вибрация/акустический шум.** Во время старта полезная нагрузка подвергается воздействию акустического шума и вибрации, вызванных шумом двигателей, а также вибрации конструкции носителя, особенно когда он подвергается воздействию максимального аэродинамического давления. Космическая аппаратура квалифицируется для этих воздействующих факторов посредством

испытаний изделий на электродинамических вибростендах или испытаний систем в акустических камерах.

- **Развертывание на орбите/ударные нагрузки.** Ступени ракеты-носителя отделяются, когда заканчивается их снабжение топливом и в конечном счете полезная нагрузка выводится на заданную орбиту. Для разъединения, отделения и отстреливания ступеней средств выведения на орбиту от полезной нагрузки часто используются пиротехнические устройства, которые осуществляют кратковременное ударное воздействие высокого уровня на полезную нагрузку, что может вызвать повреждение чувствительной аппаратуры. Ударные нагрузки от пиротехники можно сымитировать электродинамическими виброустановками или сбрасыванием грузов на панель с установленной полезной нагрузкой.
- **Тепловые воздействия/глубокий вакуум.** Полезная нагрузка на орбите подвергается воздействию широких перепадов температуры из-за воздействия теплового излучения от Солнца и Земли, а также тепловому излучению в дальнем космосе. Поскольку из-за давления глубокого космического вакуума эти тепловые нагрузки не рассеиваются благодаря конвекции, полезные нагрузки должны быть квалифицированы для тепловых воздействий на орбите испытаниями в термобарокамерах.
- **Ионизирующее излучение.** При нахождении полезной нагрузки на орбите она подвергается воздействию интенсивных потоков излучений – рентгеновских лучей и гамма-лучей от Солнца, Земли и других небесных тел. Следовательно, необходимо применять экранирование (в том числе локальное) и использовать радиационно-стойкие компоненты, а иногда и то, и другое. Эффективность законченной конструкции оценивается воздействием на полезную нагрузку искусственно индуцированных радиационных воздействий имитационным моделированием дозовых эффектов и радиационных эффектов от отдельных ядерных

частиц лазерными и рентгеновскими источниками имитирующих воздействий. Оценка радиационной стойкости также проводится по результатам испытаний на моделирующих установках – ускорителях и изотопных источниках ионов, электронов, протонов.

Квалификация изделий

Устройства, подобные DC/DC-преобразователям напряжения, сертифицируются для применения в аппаратуре космической техники в соответствии с требованиями нескольких документов, к которым относятся спецификация MIL-PRF-38534 Hybrid Microcircuits, General Specification For и MIL-STD-883 Test Methods and Procedures for Microelectronics для компонентов уровней качества Class H (уровень качества Military) и Class K (уровень качества Space). Спецификация MIL-PRF-38534 устанавливает требования к рабочим характеристикам, верификации и приемочным испытаниям для гибридных микросхем, многокристальных модулей и других подобных устройств. Стандарт MIL-STD-883 устанавливает единые методы контроля и методики для испытаний микроэлектронных устройств, предназначенных для применения в военных и авиационно-космических электронных системах. Эти документы обеспечивают унифицированный уровень качества и надежности, соответствующий намеченным применениям этих устройств.

Дополнительно к указанным выше испытаниям, к преобразователям обычно предъявляются требования соответствия стандарту MIL-STD-461 в части обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) с другими узлами. Электромагнитная совместимость имеет тенденцию быть все большей проблемой на системном уровне и поэтому это важно обеспечить на входе DC/DC-преобразователей соответствующую фильтрацию, используя модули фильтров электромагнитных помех, а также грамотные методы компоновки для ограничения напряжения излучаемых помех и устойчивости к воздействию помех.

Существенной проблемой при создании новых конструкций для аппаратуры, таких как DC/DC-преобразователи является то, что они должны быть изготовленными по специальным требованиям и подвергаться многочисленным дорогостоящим и трудоемким испытаниям, прежде чем они могут быть квалифицированными и допущенными для применения в бортовой космической аппаратуре. Исследовав эту проблему компания VPT разработала серийные высоконадежные коммерческие – COTS (Commercial-Off-The Shelf) – DC/DC-преобразователи, которые значительно сокращают затраты и время на разработку без подверганию риску технические характеристики.

Технологии производства DC/DC-преобразователей

Предлагаются стандартные DC/DC-преобразователи, созданные с использованием трех разных технологий. Эти преобразователи отбираются исходя из класса, стоимости и критичности космической программы.

1. *Гибридно-пленочная интегральная микросхема.* В конструкции используются кристаллы и проводники на керамической подложке, установленной в металлический корпус герметизированный приваркой крышки к корпусу в инертной среде. Эта технология обеспечивает высокую плотность упаковки компонентов бескорпусного исполнения, максимальную согласованность температурных коэффициентов расширения всех узлов сборки, минимальное сопротивление теплопередачи от всех теплонагруженных элементов конструкции к поверхности теплоотвода, наивысшую степень герметичности. Эти свойства позволяют изделиям работать без снижения мощности в широком диапазоне температур –55...125°C. Гибридно-пленочные модули предлагаются как стандартные изделия для военных и авиационных применений, а также в исполнении с предельным уровнем радиационной стойкости и квалифицируются по уровню качества Space. Одним из важных

преимуществ гибридно-пленочных микросхем уровня качества Space является то, что отсутствует проблема с избыточным размером или весом, так как герметичная защита полупроводниковых кристаллов осуществляется корпусом преобразователя. Гибридно-пленочная технология производства является наиболее надежной, но характеризуется максимальной стоимостью производства.

2. *Конструкции уровня качества Space на основе плат с печатным монтажом.* В этих конструкциях применяется печатная плата, на которую установлены корпусные полупроводниковые элементы – мощные транзисторы, диоды, маломощные диоды, транзисторы и микросхемы – резистивные и конденсаторные чипы, точные элементы. Печатная плата помещается в корпус, а каждый полупроводниковый элемент индивидуально смонтирован в тяжелом и громоздком герметичном металлокерамическом корпусе. Эта технология конструирования является самой громоздкой при одном и том же уровне мощности, так как каждому полупроводниковому элементу требуется герметизация.
3. *Высоконадежные коммерческие стандартные модули (Hi-Rel COTS).* Эти преобразователи были разработаны как вариант с наименьшей стоимостью для военной и авиационной техники. Для производства используются обычные многослойные печатные платы с установленными методом поверхностного монтажа элементами в пластиковых (композитных) корпусах. Готовое изделие герметизируется высокотеплопроводящим эпоксидным компаундом, обеспечивающим механическую прочность и хороший отвод тепла на поверхность корпуса. Несогласованность температурных коэффициентов расширения печатной платы и установленных на ней компонентов ограничивает допустимую повышенную температуру корпуса. Изделия COTS работают в диапазоне –55...105°C.

Модули DC/DC-преобразователей серии VSC

Модули серии VSC разработаны в соответствии с требованиями космических программ с более короткими сроками активного функционирования и низкой стоимостью, что и у программ NASA Class D и других низкоорбитальных программ. Обычно программы NASA class D используются на космических объектах для сбора данных, которые расширяют научные исследования, но не являются критичными для успешного исследования. Кроме того, программы NASA class D имеют более низкий приоритет над программами class A–C и обычно длятся менее двух лет.

К модулям серии VSC, выпускаемым с выходной мощностью 5–100 Вт, относятся одно- и двухканальные модели, формирующие выходные напряжения 3,3; 5; 12; 15; ±12; ±15 В.

Модули разработаны для продолжительной надежной работы в диапазоне температур –55...100°C. Рабочая температура определяется на основании корпуса или верхней плоскости. Отвод тепла осуществляется за счет теплопроводности через основание корпуса или верхнюю плоскость на радиатор, шасси, печатную плату или другую теплоотводящую плоскость. Все преобразователи серии VSC имеют те же защитные функции, которыми оснащены гибридно-пленочные изделия уровня качества Space, включая защиту от пониженного входного напряжения, перегрузки по току и короткого замыкания. Эти преобразователи обеспечивают плавное нарастание выходного напряжения при ограничении пускового тока. В настоящее время наиболее мощными доступными моделями являются 100-Вт модули ряда VSC100.

Преобразователи серии VSC и их внутренние полупроводниковые компоненты не герметизированы – используется комбинация конформных покрытий, а также герметизация эпоксидным компаундом, которая защищает преобразователь от воздействий вибрации и механических ударов, а также уменьшает риск роста оловянных нитевидных кристаллов. Эта технология производства позволяет уменьшить габариты и вес, а также снизить общие затраты. Конструкции преобразователей серии VSC подвергаются квалификационной процедуре, подобной процедуре для гибридно-пленочных преобразователей,

Таблица 1. Испытания на радиационную стойкость и уровни факторов

Радиационная среда		Приемочные радиационные испытания (RLAT) полупроводниковых элементов	Определение параметров стойкости на уровне модуля
Суммарная поглощенная доза	Высокая мощность дозы	30 крад (вид полупроводника – Si)	30 крад (Si)
Суммарная поглощенная доза	Низкоинтенсивное облучение	–	30 крад (Si)
Одиночные эффекты (SEE)	Катастрофические отказы (SEB, SEGR, SEL)	Не применяется	≥ 42 МэВ·см ² /мг
	Обратимые отказы (SET, SEU, SEF)	Не применяется	≥ 30 МэВ·см ² /мг

Таблица 2. Краткое изложение программа обеспечения радиационной стойкости (RHA)

Процедура испытания	Программа RHA для изолированных DC/DC-преобразователей серии VSC
Суммарная поглощенная доза	Чувствительные полупроводниковые компоненты подвергаются испытаниям на стойкость к эффекту полной накопленной дозы до 40 крад (Si) согласно разделу Method 1019.6 Ionizing Radiation (Total Dose) Test Procedure стандарта MIL-STD-883F. Преобразователи квалифицированы до 30 крад (Si)
Длительное воздействие низкой мощности дозы (ELDRS)	Преобразователи испытывались при мощности дозы 50 мрад (Si)/с до величины 30 крад (Si)
Одиночные эффекты (SEE)	Преобразователи квалифицированы до ЛПЭ ≥ 42 МэВ·см ² /мг для катастрофических одиночных эффектов (SEL, SEB, SEGR) и для ЛПЭ ≥ 30 МэВ·см ² /мг для переходных ионизационных реакций (SET) и одиночного эффекта функционального прерывания (SEFI) при воздействии ТЗЧ
Испытание на стойкость к радиации партии компонентов (RLAT)	Все партии чувствительных полупроводниковых элементов подвергаются выборочным испытаниям по стойкости к суммарной поглощенной дозе при большой мощности дозы

включая термоциклирование (10 циклов), испытания на стойкость к широкополосной случайной вибрации, механическому удару и ресурсные испытания (кратковременные испытания на безотказность). Для соответствия требованиям применения в аппаратуре космической техники применяется также краска и этикетки с низким газовыделением при вакуумно-тепловом воздействии.

DC/DC-преобразователи серии VSC разработаны для обеспечения приемлемого уровня радиационной устойчивости при меньшей стоимости высоконадежных COTS-преобразователей. Модуль считается аттестованным для применения в бортовой космической аппаратуре, если он устойчив к воздействию полей ионизирующих излучений космического пространства. Естественные радиационные пояса Земли вне ее атмосферы состоят из ионизирующего электромагнитного излучения, а также заряженных частиц, которые преимущественно излучаются Солнцем и захватываются магнитным полем Земли. Радиационные характеристики DC/DC-преобразователя основаны на стойкости к эффекту полной накопленной дозы, стойкости к эффектам структурных повреждений и стойкости к одиночным эффектам.

Преобразователи серии VSC характеризуются уровнем стойкости к эффекту полной накопленной дозы 30 крад (Si) и уровнем стойкости к одиночным эффектам при воздействии заряженных частиц с пороговыми линейными потерями энергии (ЛПЭ) иона 30 МэВ·см²/мг. Эти радиационные характеристики подтверждены сочетанием испытаний преобразователей для определения уровней стойкости к дозовым и одиночным эффектам, выбора полупроводниковых компонентов, соответствующих требованиям по стойкости к дозовым эффектам, и проведения радиационной разбраковки по уровню накопленной дозы. Для экономии средств компоненты не приобретаются с детальной прослеживаемостью партии в соответствии со стандартом MIL-PRF-38534. Вместо этого, крупные партии каждого чувствительного к радиации полупроводникового изделия приобретаются в одно и тоже время, и образцы подвергаются радиационным испытаниям на стойкость к дозовым эффектам. Партии компонентов, аттестованные по результатам испытаний, отбираются для использования в преобразователях серии VSC.

Для гарантии эксплуатационных характеристик изделий в условиях воздействия ионизирующих излучений космического пространства применяется консервативный подход к радиационным испытаниям, который успешно использовался при разработке экономичных гибридно-пленочных DC/DC-преобразователей [1]. Внутренняя программа гарантирования радиационной стойкости COTS-изделий для космической аппаратуры документирует технологические процессы и методы по гарантированию технических характеристик COTS-

изделий для бортовой космической аппаратуры при влиянии разных факторов окружающей среды космического пространства, включая стойкость к эффекту полной накопленной дозы и одиночным эффектам. Кроме того, преобразователи испытывались облучением низкой интенсивности 50 мрад (Si)/с до накопленной дозы 30 крад (Si) для определения эффекта восприимчивости к длительному воздействию низкой мощности дозы (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS). Радиационная стойкость подтверждалась сочетанием определения параметра на уровне модуля и тестирования образцов под воздействием облучения большой мощности отдельных партий всех чувствительных полупроводниковых элементов, используемых в модуле.

В табл. 1–2 кратко представлены процедуры испытаний полупроводниковых элементов, модулей и изложена суть программы гарантирования радиационной стойкости модулей серии VSC. Для детального ознакомления с программой гарантирования радиационной стойкости DC/DC-преобразователей серии VSC см. [2].

5-, 15- и 30-Вт DC/DC-преобразователи серии VSC

Эти преобразователи состоят из одно- и двухканальных моделей, которые обеспечивают на выходе номинальные напряжения 3,3; 5; 12; 15; ± 12 ; ± 15 В и предназначены для работы в широком диапазоне входного напряжения 15–50 В, могут выдерживать переходное отклонение по входу до 50 В в течение 1 с. DC/DC-преобразователи выполнены по схеме обратноходового преобразователя с регулированием выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции с высокой постоянной рабочей частотой 425–550 кГц (типичное значение: 500 кГц) с двумя контурами регулирования: основной контур служит для стабилизации выходного напряжения в зависимости от уровня выходного напряжения, а внутренний контур используется для прямого регулирования амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки. Все модули выполнены по одной схеме; упрощенная структурная схема одноканальной версии представлена на рис. 1, а схема двухканального исполнения – на рис. 2.

Токовое управление позволяет увеличить рабочую частоту преобразователя без потери устойчивости и значительно улучшить его переходную характеристику при резких изменениях нагрузки или входного напряжения. Еще одним положительным свойством этого режима является автоматическое обеспечение защиты от короткого замыкания в нагрузке. В контуре обратной связи применяется запатентованная трансформаторная развязка.

В настоящее время для существенного повышения КПД в обратноходовых преобразователях, как правило, используются активные

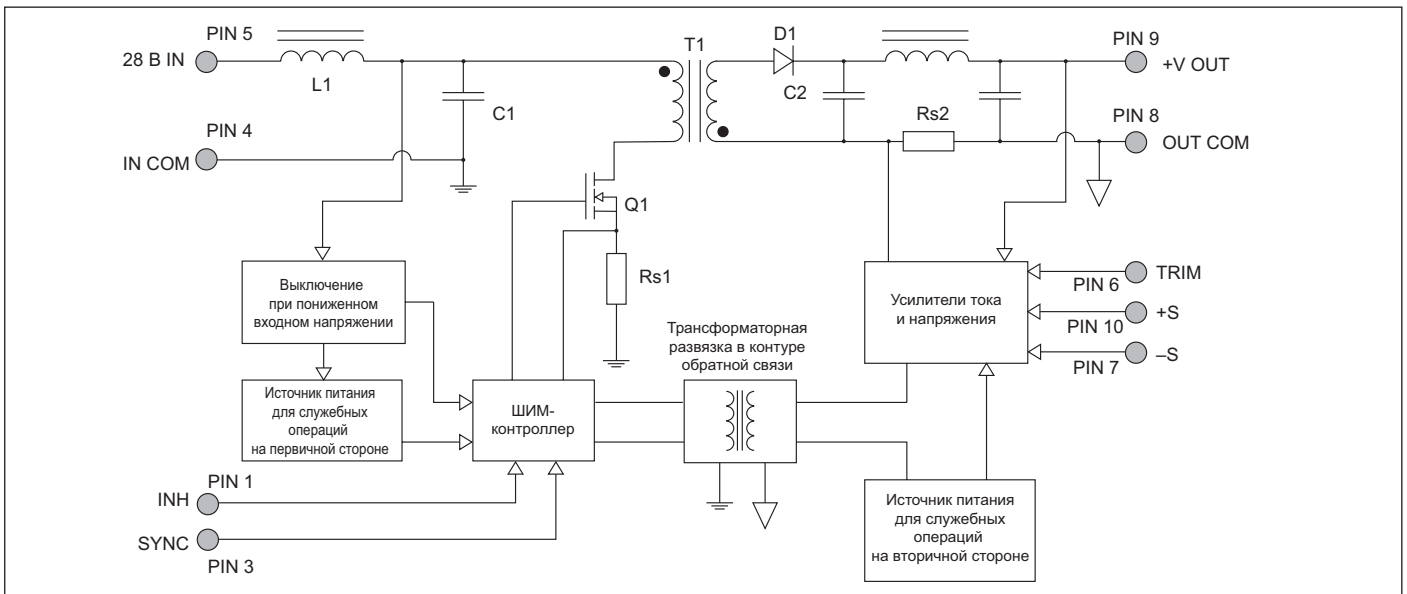


Рис. 1. Структурная схема одноканальной модели серии VSC302800S

схемы ограничения напряжения на элементах схемы. С этой целью вводится дополнительная цепь с дополнительным MOSFET и резонансным конденсатором. Однако применение дополнительного MOSFET, который является чувствительным к воздействию одиночных заряженных частиц и, открываясь при воздействии радиации, формирует короткозамкнутую цепь первичного источника напряжения с низким выходным напряжением на землю, повышает риск отказа модуля в этих условиях. Для ограничения напряжения при отключении силового ключа в рассматриваемых обратных преобразователях применяется встроенный ограничитель без потерь (на схеме не показан). Такой ограничитель позволяет существенно снизить потери на выключение силового ключа и обеспечить рекуперацию в сеть энергии, накопленной в ограничительном конденсаторе или индуктивности намагничивания трансформатора обратного преобразователя. Это решение обеспечивает довольно скромные

энергетические показатели – 30-Вт модуль с выходным напряжением 5 В VSC30-2805S характеризуется значением КПД = 81% и удельной мощностью 1941 Вт/дм³. Внешний вид конструкций преобразователей показан на рис. 3. 15- и 30-Вт модели выполнены в корпусах с вертикальным расположением выводов относительно плоскости основания для сквозного и объемного монтажа. Гладкие втулки, размещенные по двум противоположным углам корпуса, служат для дополнительного крепления модуля. Кроме того, они позволяют притянуть основание корпуса модуля к радиатору. 5-Вт модули предназначены для сквозного монтажа. Габаритные размеры 5-Вт модулей: 28,19×28,19×8,98 мм; вес: 23 г. 15-Вт модели имеют габариты 28,19×28,19×8,98 мм и вес 32 г; 30-Вт: 47,88×33,66×8,98 мм; вес: 48 г.

30-Вт модули имеют функцию синхронизации частоты преобразования внешним синхросигналом (в диапазоне 500–600 кГц). Частота синхронизации больше рабочей частоты ШИМ-контроллера (в диа-

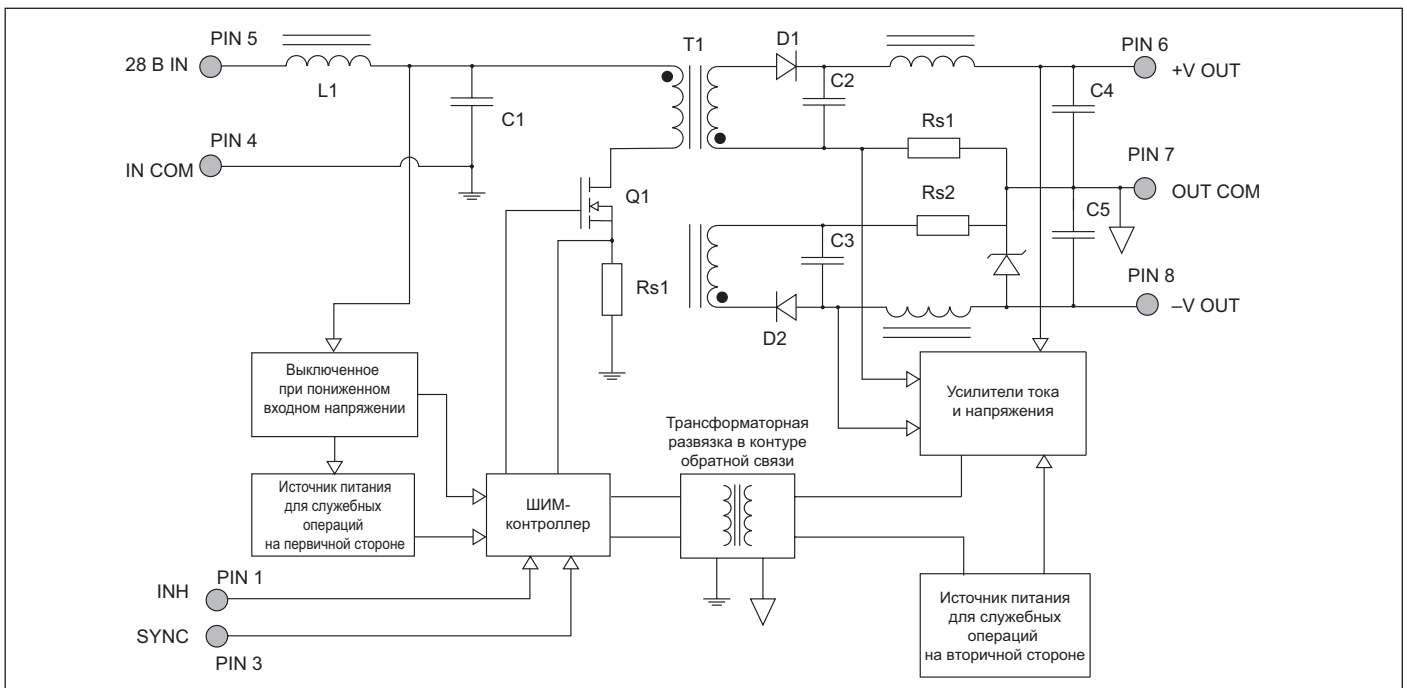


Рис. 2. Структурная схема двухканальной модели серии VSC302800D



Рис. 3. Внешний вид конструкций 5-, 15- и 30-Вт моделей

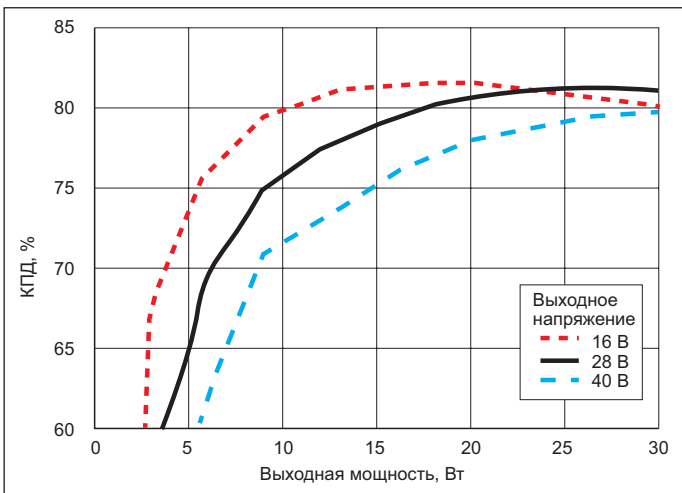


Рис. 4. Зависимость КПД от выходной мощности одноканальной модели VSC30-2855



Рис. 5. Внешний вид фильтров

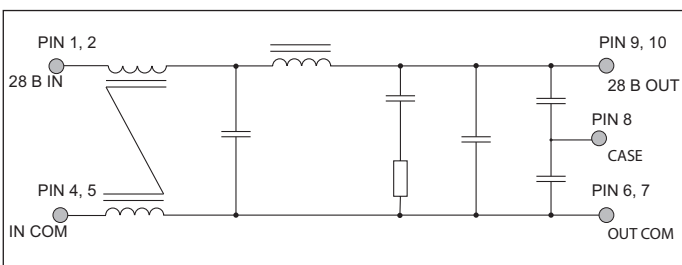


Рис. 6. Принципиальная схема фильтра

пазоне 400–550 кГц) для обеспечения устойчивой работы преобразователя. Использование измерительных входов обратной связи +SENSE и –SENSE, соединенных с нагрузкой по четырехпроводной схеме, обеспечивает требуемое напряжение непосредственно на контактах нагрузки путем регулировки выхода на величину падения напряжения на проводниках. Функция точной настройки выходного напряжения у 15- и 30-Вт моделей допускает подстройку выходного напряжения у одноканальных моделей на величину $-20\%/+10\%$ от номинального значения выхода подключением подстроечного резистора между выводом TRIM и выходным напряжением или общим проводом в зависимости от направления регулировки. Функция дистанционного управления включением/выключением 15- и 30-Вт модулей позволяет реализовать алгоритм подачи питания к отдельным узлам, что повышает гибкость применения преобразователей в аппаратуре.

Микросхема ШИМ является основным узлом преобразователей напряжения и определяет эффективность импульсного преобразователя, обеспечивает режим с обратной связью по напряжению и с дополнительной обратной связью по току дросселя. Однако ШИМ-контроллер наряду с MOSFET является узлом, который в наибольшей мере чувствителен к одиночным ионизационным эффектам. Предпочтительно применение ШИМ-контроллеров, выполненных по биполярной технологии, или реализация схемы управления на универсальных микросхемах средней уровня интеграции (компараторах, операционных усилителях), выполненных по биполярной технологии в полимерном (композитном) корпусе.

Зависимость КПД от выходной мощности одноканальной модели VSC30-2805S показана на рис. 4. Небольшое уменьшение КПД в режиме с входным напряжением 16 В при максимальной выходной мощности объясняется ростом потерь в элементах модуля при подходе к их предельным энергетическим возможностям. Типовая зависимость КПД от выходной мощности позволяет выбрать оптимальный режим работы модуля в соответствии с условиями применения.

Модули работают в большинстве приложений без использования внешних компонентов в соответствии с параметрами, приведенными в спецификации. Встроенные на входе и выходе LC-фильтры обеспечивают низкий уровень пульсаций и помех. Для дополнительного уменьшения пульсаций выходного напряжения и шумов на выходе устанавливаются небольшие керамические конденсаторы с емкостями в диапазоне 1–10 мкФ.

Для дополнительного ослабления пульсаций на входе рекомендуется применять фильтры электромагнитных помех VSC1-28, VSC3-28, VSC10-28, которые обеспечивают подавление помех на входе преобразователей с коэффициентом ослабления 55 дБ (мин.) на частоте 500 кГц. Внешний вид фильтров показан на рис. 5. Принципиальная схема фильтра представлена на рис. 6. Фильтры также обеспечивают соответствие требованиям стандарта MIL-STD-461D-F по устойчивости к наведенным помехам [3].

Поскольку преобразователи изолированные, их выход можно сконфигурировать как с положительным, так и с отрицательным напряжением. Выходы нескольких преобразователей могут соединяться последовательно для обеспечения более высоких напряжений. Когда выходы нескольких модулей соединены последовательно, они совместно используют нагрузку. Например, два преобразователя VSC30–2812S можно соединить последовательно для обеспечения напряжения 24 В при 60 Вт.

100-Вт DC/DC-преобразователи серии VSC100

Эти модели предназначены для преобразования напряжения питания бортовой сети с диапазоном изменения 16–40 В в стабилизированные напряжения 3,3; 5; 12; 15; ± 12 и ± 15 В. Для входного напряжения допустимо переходное отклонение до 50 В длительностью 1 с.

Преобразователи выполнены по прямоходовой схеме понижающего преобразователя, функционирующей в режиме ШИМ с фиксированной частотой преобразования 230–290 кГц (типичное значение:

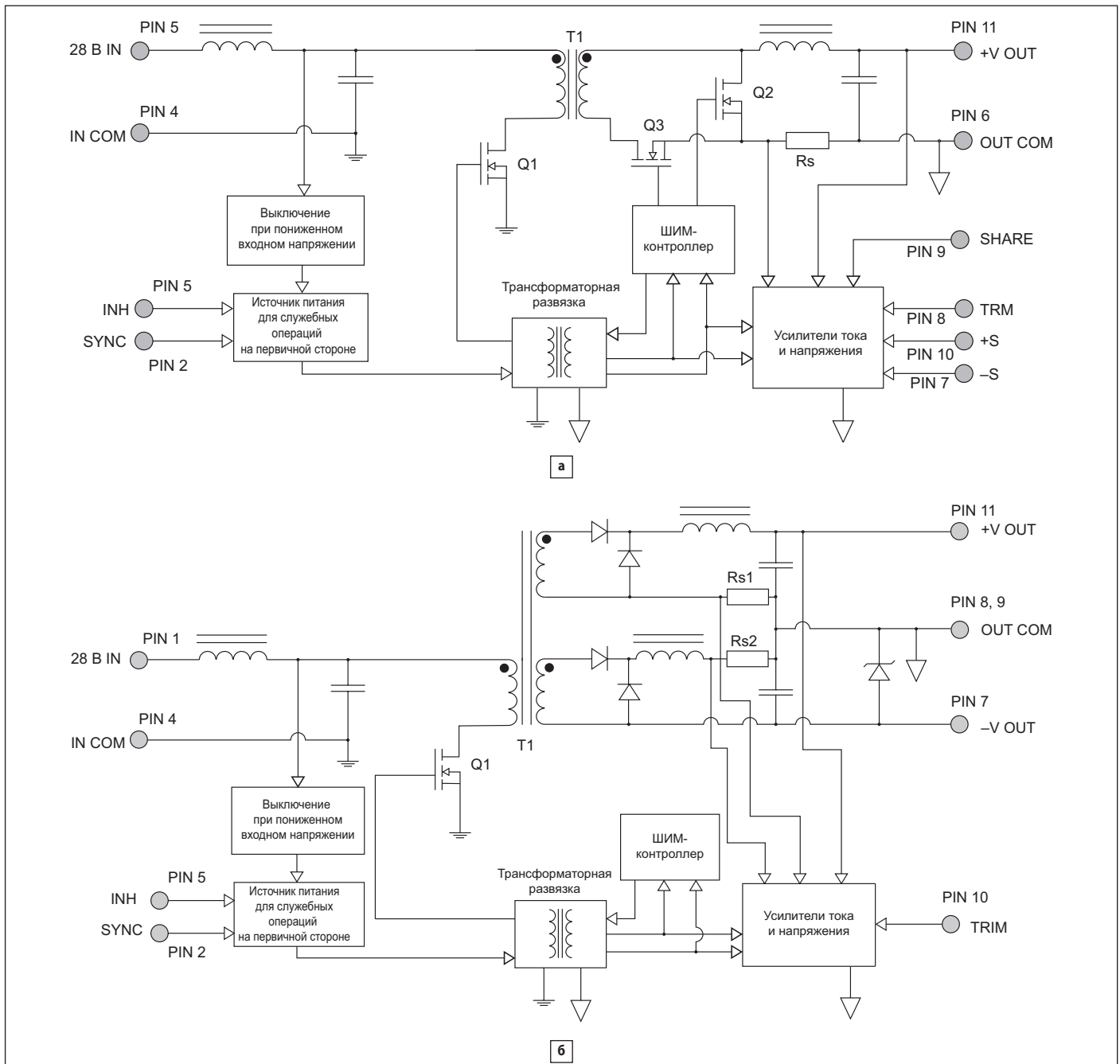


Рис. 7. Структурные схемы преобразователей: а) одноканальная модель серии VSC1002800S; б) двухканальная модель VSC100-2800D

260 кГц). Структурная схема одноканальной модели серии VSC100-2800S показана на рис. 7а, а двухканальной модели – на рис. 7б. Для повышения КПД одноканальной модели используется синхронный выпрямитель на основе MOSFET, а размагничивание сердечника трансформатора обеспечивается резонансным способом за счет паразитных параметров – индуктивности намагничивания и емкости, образованной емкостями силового ключа, первичной обмотки и всеми емкостями на вторичной стороне, приведенными к первичной стороне. Трансформатор перемагничивается строго симметрично в двух квадрантах аналогично трансформатору двухтактного преобразователя с удвоенным размахом индукции. Отсутствие обмотки размагничивания в преобразователе с резонансным размагничиванием позволяет легче выполнять трансформатор по планарной технологии, что обеспечивает уменьшение объема, массы преобразователя и повышение его КПД. Значение КПД модуля VSC100-2815S составляет 89%, а удельная мощность равна 4803 Вт/дм³.

Управление синхронным выпрямителем (транзисторы Q2 и Q3) контроллером исключает перекрытие зон открытого состояния двух ключей (при этом исключается режим короткого замыкания вторичной обмотки). Работа MOSFET синхронного выпрямителя синхронизована с работой основного ключа преобразователя.

Эти технические решения и использование современной элементной базы позволяет получить КПД до 89%. Применение активного ограничения недопустимо в этой структуре, так как при воздействии протонов и ионов возможно формирование прямого канала короткого замыкания от источника входного напряжения с низким импедансом на землю через замкнутый дополнительный MOSFET схемы активного ограничения. Микросхема ШИМ-контроллера со встроенным прецизионным источником опорного напряжения установлена на вторичной стороне преобразователя ближе к нагрузке. Этот контроллер передает через миниатюрный импульсный трансформатор ШИМ-импульсы в схему на первичной стороне. Контроллер также

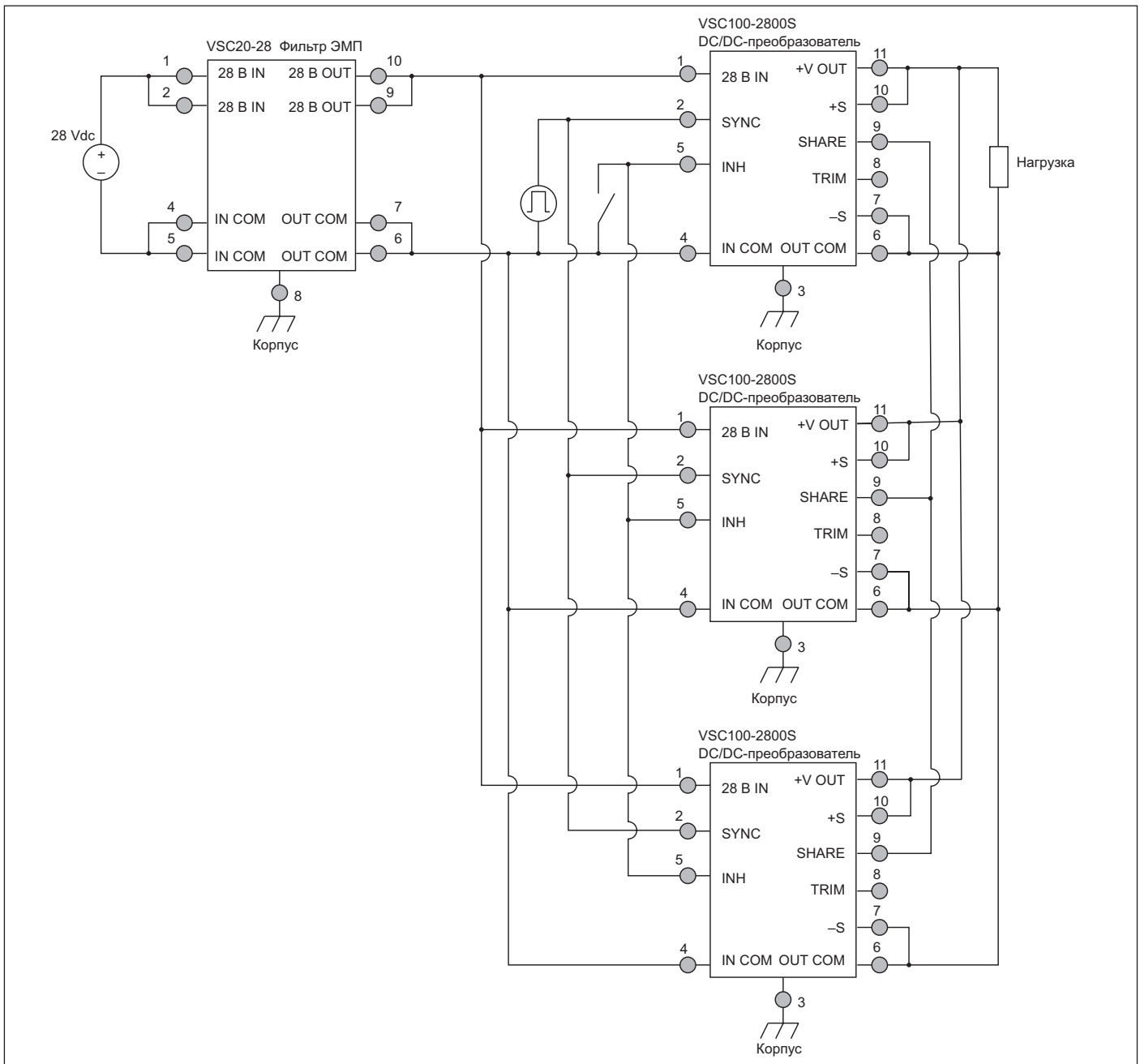


Рис. 8. Параллельное соединение нескольких модулей с равномерным распределением тока (подключение внешнего синхросигнала необязательно)

формирует импульсы управления транзисторами синхронного выпрямителя. Передача ШИМ-сигналов с выхода на вход через трансформатор не приводит к введению каких-либо полюсов или постоянных времени в цепь обратной связи контура регулирования. В результате достигается наибольшее возможное быстродействие контура регулирования, и упрощается задача обеспечения его устойчивости независимо от уровня входного напряжения, тока нагрузки, времени работы или температуры.

Модули серии VSC100 содержат полный набор сервисных и защитных функций, который необходим для эксплуатации в космической технике. Интегрирована схема защиты от пониженного напряжения на входе для обеспечения устойчивости к медленному нарастанию входного напряжения. Схема защиты от перегрузки по току и короткого замыкания снижает коэффициент заполнения для ограничения выходного тока на уровне 130% относительно номинального значения. Это свойство позволяет запускать преобразователь при любом значении выходной емкости. Поскольку длительная работа

в режиме перегрузки по току или короткого замыкания может привести к чрезмерной рассеиваемой в модуле тепловой мощности, необходимо обратить внимание на обеспечение нормальной рабочей температуры модуля в этих условиях. При температуре корпуса 105°C выходная мощность должна быть снижена в два раза относительно полной мощности, а при температуре корпуса 110°C выходная мощность должна быть уменьшена до нулевого значения. Функция плавного включения устраняет превышение выходного напряжения и ограничивает пусковой ток при включении. Дистанционное включение/выключение позволяет при необходимости снизить собственное энергопотребление модуля и организовать определенную последовательность включения модулей. Схема компенсации падения напряжения на проводах, связывающих выход преобразователя с нагрузкой, позволяет получить требуемое напряжение непосредственно на контактах нагрузки путем регулирования выхода на величину падения напряжения. Функция регулировки выходного напряжения позволяет получить нестандартное значение питающе-



Рис. 9. Внешний вид корпуса 100-Вт преобразователя напряжения серии VSC100



Рис. 10. Внешний вид модуля фильтрации VSCF20-28 – мощный фильтр с проходным током 20 А

го напряжения установкой резистора между специализированным выводом и выходом положительного напряжения или общим проводом в зависимости от направления регулирования. Максимальный диапазон регулировки выходного напряжения составляет $-20\%/+10\%$ относительно номинального значения. Этой функцией оснащены одно- и двухканальные модели. Для увеличения выходной мощности предусмотрена возможность параллельного соединения до пяти модулей с выравниванием их выходных токов с точностью 5% (рис. 8). Синхронизация частоты параллельно включенных модулей внешним синхросигналом (с частотой 300–380 кГц) позволяет уменьшить пульсации потребляемого тока и выброс в них выходного напряжения, когда выходные пульсации отдельных модулей оказываются в одной фазе. Передача входного синхросигнала через развязывающий трансформатор на вход ШИМ-контроллера позволяет уравнивать потенциал синхросигнала с «сигнальной землей» ШИМ-контроллера, исключив помехи от силовых цепей и уменьшив длительность фронтов управляющих напряжений на затворах транзисторов выпрямителя, что в еще большей мере увеличивает КПД.

Размеры корпуса с вертикальным расположением выводов относительно плоскости основания для сквозного и объемного монтажа составляют $50,8 \times 39,37 \times 10,41$ мм, а вес – 79 г. Внешний вид конструкции преобразователя серии VSC100 показан на рис. 9. Гладкие втулки на углах корпуса служат для дополнительного крепления модуля. Кроме того, они позволяют притянуть основание корпуса модуля к радиатору.

Модули способны длительно стабильно работать при рабочих температурах $-55 \dots 100^\circ\text{C}$ без понижения мощности. Среднее время наработки на отказ модулей серии VSC100-2800S, рассчитанное по воен-

ному справочнику MIL-HDBK-217F в условиях орбитального полета (Space Flight, SF) при температуре корпуса 55°C , составляет 12,2 млн ч.

Для обеспечения соответствия требованиям стандарта MIL-STD-461 к уровню излучаемых кондуктивных помех на входе преобразователей предлагаются радиационно-устойчивые пассивные фильтры электромагнитных помех VSCF10-28 и VSCF20-28 с проходными токами 10 и 20 А, обеспечивающие ослабление помех с коэффициентом 55 дБ на частоте 500 кГц. Внешний вид модуля фильтрации VSCF20-28 с проходным током 20 А показан на рис. 10.

Эффективность фильтра электромагнитных помех VSC20-28 можно оценить по графикам напряжения помех на входе одноканального модуля VSC100-2800S без фильтра (рис. 11а) и с установленным фильтром (рис. 11б). При использовании фильтра на входе преобразователя уровни помех значительно ниже нормирующей кривой во всем диапазоне частот 10 кГц...10 МГц.

Модули предназначены для работы в аппаратуре космических аппаратов, расположенных на низких круговых орбитах с короткими сроками активного функционирования (≤ 5 лет).

Выводы

В России до последнего времени сохраняется практика комплектации бортового оборудования космических аппаратов для систем связи на низких орбитах электронными компонентами промышленного уровня качества или с военной приемкой общего назначения и проведения отбраковочных и сертификационных испытаний, затраты на которые во много раз превышают стоимость самих компонентов. Особенно это касается испытаний на устойчивость к воздействию

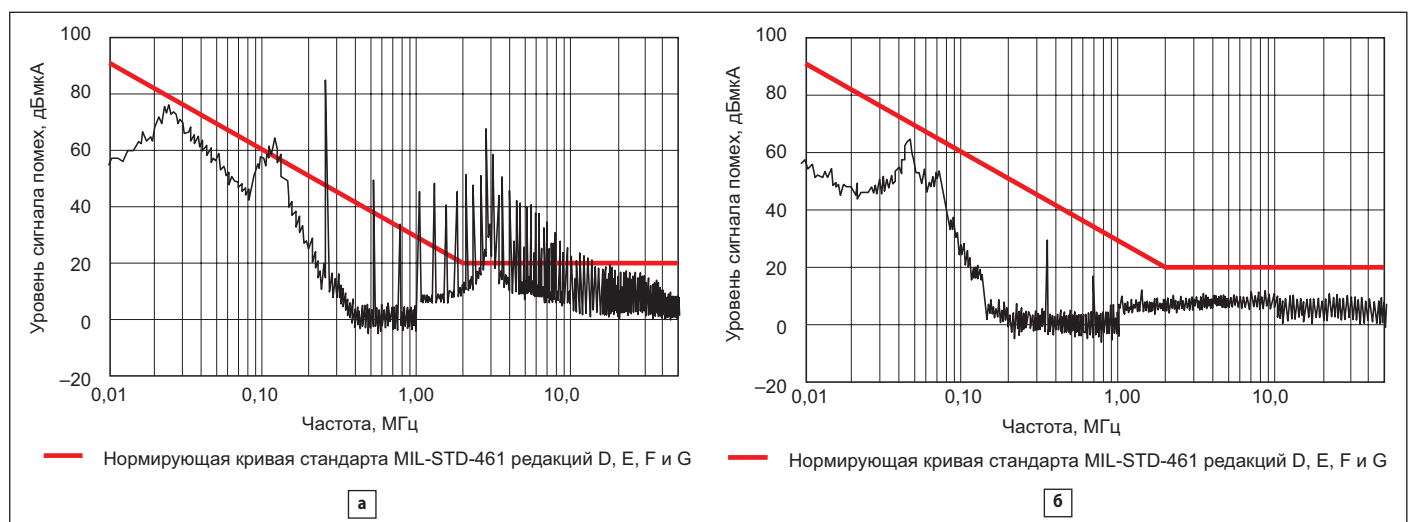


Рис. 11. График напряжения помех на входе преобразователя напряжения VSC100-2800S: а) без входного фильтра; б) с установленным на входе модулем фильтрации

ионизирующих излучений космического пространства – по дозовым и единичным эффектам.

При этом приобретение новых партий требует новых сертификационных испытаний. В результате всей такой работы лишь несколько снижается вероятность отказа компонентов из выбранной партии, что подтверждается опытом эксплуатации КА на орбите. Отказов в аппаратуре, укомплектованной прошедшими отбор элементами, более чем достаточно. Применение многократного резервирования повышает надежность аппаратуры, но снижает удельные характеристики космического аппарата.

Российские предприятия производят широкую номенклатуру радиационно-стойких преобразователей напряжения с предельным уровнем радиационной стойкости с использованием радиационно-стойкой элементной базы (транзисторы MOSFET, микросхемы ШИМ-контроллеров, операционные усилители и др.), что существенно влияет на стоимость преобразователя и сроки изготовления. Изготавливаются модули по гибридно-пленочной технологии, по технологии «кристалл на печатной плате» с заполнением внутреннего объема инертной средой (азотом), на печатной плате с установленными микросхемами и транзисторами в миниатюрных пластиковых корпусах, размещенной в металлическом корпусе герметизируемом компаундом.

Применение элементной базы, обладающей повышенной стойкостью к специальным факторам космического пространства, повышает время наработки на отказ, но и значительно увеличивает стоимость конечного изделия.

Одним из планируемых направлений развития космической деятельности в России до 2030 г. является наращивание группировки спутников связи. Спутникам предстоит работать на низкой круговой орбите высотой 750 км. Спутниковая группировка должна включать несколько сот космических аппаратов. Применение полупроводниковых элементов с повышенным уровнем радиационной стойкости в сочетании с высокой функциональностью, созданных специализированными отечественными предприятиями на основе изложенных

выше аналогичных процедур, несомненно, позволит значительно сократить затраты и время на разработку не в ущерб качеству и надежности конечного изделия.

Такая богатейшая страна мира, как США, считает необходимым на правительственном уровне решать вопрос об использовании *коммерческих* источников питания в аппаратуре космической техники с целью снижения затрат на разработку и конечного изделия.

Структуры серийных преобразователей напряжения общего назначения, выпускаемых рядом отечественных предприятий, пригодны для изготовления их в сценарии с повышенным уровнем радиационной стойкости для применения в перспективных спутниковых системах связи на базе космических аппаратов на низких круговых орбитах.

На одной из конференций, посвященной обеспечению предприятий радиоэлектронной отрасли электронной компонентной базой для снижения стоимости космической аппаратуры, было предложено в обоснованных случаях применять ЭКБ с категорией качества «ОТК» – необходимо только наладить совместную работу с электронной промышленностью в части выстраивания кооперации, проведения испытаний ЭКБ и расширения ее применения [4].

Литература

1. Сэйбл Д., Скэтт Г., Лесли Л., Рэйнутор С. Экономичные DC/DC-преобразователи. Характеристики устойчивости к радиационному воздействию. Компоненты и технологии. 2012. №7.
2. Witcher B. Radiation Hardness Assurance: VPT's Approach to NewSpace DC-DC Converter Reliability. White Paper.
3. Ситон К. Применение фильтров ЭМП отвечающих требованию стандарта MIL-STD-461F. Электронные компоненты. 2014. №7.
4. Ковалевский Ю. Вопросы обеспечения предприятий радиоэлектронной отрасли электронной компонентной базой. XI Всероссийская научно-техническая конференция «ЭКБ-2022». Электроника: НТБ. 2022. №9.