



# ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ФИРМЫ INTERPOINT

Виктор Жданкин

Источники вторичного электропитания (ИВЭП) по своей физической сущности являются преобразователями вида и качества электрической энергии. Не всегда удается осуществить питание всех устройств непосредственно от первичного источника электроэнергии, то есть от преобразователя неэлектрической энергии в электрическую (химические, топливные, механические или ядерные первичные источники электропитания). В большинстве случаев первичный источник или стандартная сеть по частоте, стабильности или напряжению оказываются непригодными для питания электронных устройств. Поэтому возникает необходимость преобразования электрической энергии.

Особые требования предъявляются к средствам силовой электроники, применяемым на автономных объектах, к которым относятся, в частности, наземные транспортные средства, корабли, летательные аппараты, беспилотные и пилотируемые космические аппараты, автоматические зонды, радиомаяки, телеуправляемые подвижные роботы, различные системы военного назначения и т. п.

К таким требованиям можно отнести:

- минимальные габариты и массу;
- максимальный коэффициент полезного действия (кпд);
- способность работать в жестких условиях эксплуатации (широкий температурный диапазон, повышенные уровни влажности, экстремальные механические воздействия, перепады давления, воздействие ионизирующих излучений и т. п.);

- высокую надёжность;
- стабильность характеристик в условиях отсутствия регламентных регулировок и настроек в течение длительного времени;
- соответствие жестким условиям по электромагнитной совместимости;
- целый ряд других требований, предъявляемых к необслуживаемой аппаратуре.

Одной из зарубежных фирм, которой удалось разрешить конструкторско-технологические, системные и организационные проблемы, связанные с миниатюризацией силовых устройств, является компания Interpoint (США). Преобразователи постоянного напряжения, выпускаемые этой фирмой, имеют отличные показатели по удельной мощности, экономичности, надёжности и некоторым другим параметрам, причём скачкообразного повышения эффективности удалось достичь благодаря разработке методов расчёта, моделирования и оптимизации силовой электроники.

Акционерное общество Interpoint основано в 1969 году и является в настоящее время поставщиком высоконадёжных изделий силовой электроники для военных, авиационно-космических, промышленных и других применений, где надёжная работа — решающая составляющая в успехе проекта. Корпорация является лидером в области разработки преобразователей постоянного напряжения, владея, в частности, патентами на

технологии асимметричной передачи энергии (Asymmetrical Power Transfer, АРТ), удвоения фазы/фазового сдвига (Dual Phase/Phase-Shifting, DPPS), см. врезку.

Основное производственное и конструкторское оборудование соответствует стандарту качества ISO 9001, а также аттестовано Центром по снабжению электронным оборудованием Министерства Обороны США (Defense Electronics Supply Center, DESC) на соответствие стандарту MIL-STD-1772.



Таблица 1. Преобразователи военного и авиационно-космического назначения

Серия	Выходная мощность, Вт	Диапазон входных напряжений, В	Число выходных каналов	Выходные напряжения, В	КПД, %	Габаритные размеры, мм
Преобразователи военного и авиационно-космического класса						
МК200	До 200	16...40; 19...40	Один, два	+5; +12; +15; ±12; ±15	До 90	61х58х12
MOR	До 120	16...40	Один, два	+3,3; +5; +6,3; +9,5; 12; 15; 28; ±5; ±6,3; ±9,5; ±12; ±15	До 87	76х38х10 (стандартный корпус)
MFLHP	До 100	19...40	Один, два	+5; +12; +15; ±5; ±12; ±15	До 87	76х38х10
MHP270	До 65	160...400	Один, два	5; 12; 15; 28; ±12; ±15	До 85	76х38х10
MFL28	До 65	16...40	Один, два	2,2; 3,3; 5; 12; 15; ±5; ±12; ±15; 28;	До 87	76х38х10
MTR	До 30	16...40	Один, два, три	5; 12; 15; ±5; ±12; ±15; +5 и ±12; +5 и ±15	До 84	73х14х18
MHV	До 15	16...50	Один, два, три	+5 и ±12; +5 и ±15; 3,3; +5; 12; 15; ±5; ±12; ±15	До 80	69х17х11
MHD	До 20	16...40	Один, два	5; 12; 15; ±5; ±12; ±15	До 84	65х14х11
MHF+	До 15	16...48	Один, два, три	5; 12; 15; 28; ±5; ±12; ±15; +5 и ±12	До 84	51х29х8
MSA	До 5	16...40	Один, два	5; 12; 15; ±12; ±15	До 76	27х27х67
MCH	До 1,5	12...50	Один, два	5; 12; 15; ±5; ±12; ±15	До 79	25х20х7
Преобразователи первого поколения военного и авиационно-космического класса						
MFW	До 70	19...40	Один, два, три	3,3; 5; +12; +15; ±12; ±15; +5 и ±12; +5 и ±15	До 83	63х61х15
MTW	До 30	18...40	Один, два	+5; +12; +15; ±12; ±15	До 86	69х34х13
MHL	До 15	4...8	Два	±12; ±15	До 80	69х34х13
MHE/MLP	До 20	16...40 или 10...16	Один, два	5; 12; 15; ±12; ±15	До 83	74х28х13; 74х28х10 (для MLP)
MRH	До 15	16...40	Один, два, три	+5; +12; +15; ±12; ±15; +5 и ±12; +5 и ±15	До 80	59х17х1
MTO	До 15	16...36	Три	+5 и ±12; +5 и ±15	79	50х34х13
MSR	До 4	16...32	Один, два, три	+5; ±12; ±15; +5 и ±12; +5 и ±15	До 70	27х27х9
MDR	До 3	10,8...13 20...26 24...30	Два	12 и 15	58	27х27х9
DCH	До 3	5 12 28	Один, два	5; 12; ±12; ±15; 28; ±28	До 75	25х20х9
Преобразователи для применения в космических условиях						
SMHP	До 65	80...160	Один, два	5; 12; 15; 28; ±12; ±15	74	76х38х11
SSP	До 30	20...40	Один, два	±3,3; ±5; ±12; ±15	74	76х38х11
SMHF	До 15	16...40	Один, два	3,3; 5; 12; 15; ±12; ±15	74	37х29х8
SMSA	До 5	16...40	Один, два	5; 12; 15; ±12; ±15	74	27х27х7
Все преобразователи указанных серий имеют следующие общие характеристики:						
<ul style="list-style-type: none"> <li>● защита от короткого замыкания по выходу;</li> <li>● автоматическое выключение преобразователей при чрезмерном понижении входного напряжения;</li> <li>● «мягкий» запуск при включении и восстановлении после короткого замыкания;</li> <li>● возможность дистанционного включения/выключения преобразователя с помощью ТТЛ совместимых сигналов;</li> <li>● возможность внешней синхронизации рабочей частоты преобразования;</li> <li>● рабочий диапазон температур -55...+125°C (кроме преобразователей серии MFHLP: -55...+100°C).</li> </ul>						

Interpoint предлагает полный ряд стандартных изделий, которые соответствуют требованиям действующего в США стандарта MIL-STD-883. Этот стандарт устанавливает единые методы проверки, технологические процессы во время проектирования, идентификации и сертификации микросистемных устройств, предназначенных для применения в военных и авиационно-космических электронных системах, включая основные испытания на устойчивость к воздействиям различных факторов окружающей среды.

В настоящее время Interpoint предлагает более 500 моделей преобразователей постоянного напряжения, помехозащитных фильтров и специальных изделий для ответственных приложений.

В таблицах 1, 2, 3, 4 приведены основные характеристики продукции фирмы Interpoint.

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВОЕННОГО И АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОГО КЛАССА

Преобразователи постоянного напряжения этого класса созданы с использованием передовых технологий высокочастотного преобразования энергии. Герметичные блоки обеспечивают полную мощность в температурном диапазоне -55...+125°C (за исключением моделей MFLHP).

#### Преобразователи серии МК200

Новые преобразователи серии МК200 мощностью до 200 Вт первыми преодо-

лели барьер удельной мощности 5000 Вт/дм<sup>3</sup>. Пять преобразователей с одним выходом могут быть соединены параллельно для получения выходной мощности 900 Вт.

Преобразователи сочетают патентованную технологию удвоения фазы/сдвига фазы (DPPS) с топологией однотактного преобразователя с прямым включением выпрямительного диода (см. врезку).



Преобразователь постоянного напряжения МК200, созданный с применением технологии удвоения фазы/фазового сдвига

Таблица 2. Преобразователи для промышленного применения

Серия	Выходная мощность, Вт	Диапазон входных напряжений, В	Число выходных каналов	Выходные напряжения, В	КПД, %	Габаритные размеры, мм
Преобразователи серии VP в прочных металлических корпусах, склеенных эпоксидной смолой						
VPA	6...10 7,5	18...36 20...60	Один	3,3; 5; 12; 15 5	До 86	51x16x11
VPB	13...21 13...21	18...36 36...72	Один	3,3; 5; 12; 15 3,3; 5; 12; 15	До 86	51x51x11
VPC	20...45	20...27	Один	3,3; 5; 12; 15	До 81	77x66x21
VPD	8,5...10 8...10	11...32 18...72	Два	±5; ±12; ±15 ±5; ±12; ±15	До 83	51x26x11
VPE	15	20...72	Два	±12; ±15	До 82	51x41x14
VPF	17...21 17...21	18...36 36...72	Два	±5; ±12; ±15 ±5; ±12; ±15	До 85	51x51x11
VPG	20 20	18...36 36...72	Три	+5 и ±12; +5 и ±15 +5 и ±12; +5 и ±15	До 84	51x51x11
Преобразователи серии HR в герметизированных металлических корпусах						
HR700	60...70	19...40	Один, два, три	5; 12; 15; ±12; ±15; +5 и ±12; +5 и ±15	До 83	81x62x15
HR300	30	19...36	Один	5	До 86	69x34x13
HR150	15...20	4...8 10...16 18...36	Два Два, три Один, два, три	±12; ±15 5; 12; 15; ±12; ±15 5; 12; 15; ±12; ±15	До 83	54x29x13 50x34x13
HR120	10...12	16...36 16...40 16...40	Один, два Один, два Один, два	15; ±15 5; ±12; ±15 15; ±15	До 83	37x29x8
HR40	3,2...4	16...32	Один, два, три	5; ±12; ±15	До 75	27x27x9

Таблица 3. Помехоподавляющие фильтры

Модель	Входное напряжение, В	Максимальный ток, А	Минимальное вносимое затухание	Совместимы с преобразователями
FMD28-461	40...40	7,0	60 дБ 500 кГц...50 МГц	MCH, MSA, MHF, MHF+, MHE, MLP, MTO, MHL, MHD, MRH, MTR, MFL28, MFLHP
FMD270-461	400...400	0,7	30 дБ, 500 кГц...50 МГц	MHP270
FME28-461	40...40	15,0	60 дБ, 500 кГц...50 МГц	MCH, MSA, MHF, MHF+, MHE, MLP, MTO, MHL, MHD, MRH, MTR, MFL28, MFLHP
FME270-461	400...400	1,5	30 дБ, 500 кГц...1 МГц	MHP270
FMC-461	0...40	2,7	40 дБ, 200 кГц...50 МГц	MHE, MTO, MHL, MTW, MRH, MHF, MTR, MHF+, MCH, MSA, MHD, MLP
FMH-461	0...40	1,5	40 дБ, 200 кГц...50 МГц	MHE, MLP, MTO, MHL, MRH, MHF, MFL, MSA, MHF+, MHD, MCH
FMSA-461	16...40	0,8	40 дБ	MSA, MHF, MHF+, MHD, DCH, MHE, MLP, MDR, MCH
Фильтры для применения с преобразователями для космических применений				
SFMC28-461	0...40	2,7	55 дБ @ 580 кГц, 60 дБ @ 1 МГц	SMHF, SMSA
SFCS	0...50	5	60 дБ, 400 кГц...50 МГц	SMHF, SMSA
SFME120	0...160	1	60 дБ, 400 кГц...50 МГц	SMHP

Таблица 4. Специальные изделия

Модель	Входное напряжение, В	Выходное напряжение @ максимальный ток		КПД (%)	Максимальная мощность, Вт
		В	А		
LCM-120	10...80	23...37	5	80...90	120
HUM-40	12...40	39...40	1	80...90	40
HUM-70	12...40	39...40	1,75	80...90	70
MQO28512Q	16...36	+5 -5 ±12	2000 -350 ±208	64	16,5
MQO28515Q	16...36	+5 -5 ±15	2000 350 ±167	64	16,5

Для исключения влияния падения напряжения на соединительных линиях в преобразователях применяют способ регулирования, при котором

обратная связь для стабилизации берет непосредственно со входных контактов потребителя. Все модели имеют возможность регулировки вы-

ходного напряжения в пределах от 60 % до 110 % от номинального.

Контакты дистанционного включения/выключения и синхронизации могут быть использованы для наиболее эффективного применения преобразователей в составе системы.

**Преобразователи серии MOR**

Преобразователи серии MOR обеспечивают большую мощность и лучшие эксплуатационные характеристики, чем какие-либо другие преобразователи, размещенные в промышленных стандартных корпусах. Преобразователи серии MOR могут быть заказаны в стандартном исполнении или с добавочными отбраковочными испытаниями

ми. Доступны также преобразователи, квалифицированные согласно MIL-PRF-38534 категория Н (для военных применений) и категория К (для космических применений).

Внешний вид конструкции преобразователей серии MOR



Схемотехника модулей серии MOR аналогична схематехнике, применяемой в модулях серии MFLHP.

Пять преобразователей могут быть соединены параллельно для получения суммарной выходной мощности свыше 500 Вт. Для обеспечения высокой надёжности системы возможно N+1 резервирование.

Преобразователи серии MOR имеют превосходные динамические характеристики и низкие значения шумов. Характерной особенностью является наличие всевозможных защит: защита от перенапряжения, неограниченная защита от короткого замыкания, выключение преобразователя при понижении входного напряжения до 15,5 В. Все модели имеют цепи плавного запуска, цепи дистанционного включения/выключения, универсальную схему синхронизации, широкий диапазон регулировки выходного напряжения (60 %...110 % номинального значения).

Высокая удельная мощность (свыше 5000 Вт/дм<sup>3</sup>) обеспечивает максимальную выходную мощность при минимальных требованиях к размерам платы.

Применение помехозащитного фильтра FME 28-461 является обязательным, когда предъявляются требования по электромагнитной совместимости в соответствии с MIL-STD-461C. В частности, для авиационных и космических условий эксплуатации требования к кондуктивным излучениям, согласно MIL-STD-461C параграф CE03, определяют ограничения на широкополосные и узкополосные шумы в частотном диапазоне от 15 кГц до 50 МГц.

### Преобразователи серии MFLHP

Модули серии MFLHP обеспечивают предельную удельную мощность до 4280 Вт/дм<sup>3</sup> (70 Вт/дюйм<sup>3</sup>). В моделях с

двумя выходными каналами до 70% номинальной выходной мощности может быть использовано с канала отрицательного или положительного напряжения. Токовое распределение позволяет соединять преобразователи параллельно и получать общую мощность до 270 Вт.

Модули серии MFLHP являются ключевыми преобразователями, выполненными по схеме однотактного преобразователя с прямым включением выпрямительного диода с постоянной рабочей частотой 600 кГц. Высоких показателей удалось достичь, применив патентованный способ асимметричной передачи энергии, усовершенствованную конструкцию трансформатора и обратную связь по току дросселя (см. врезку).

Преобразователи серии MFLHP имеют два TTL совместимых входа, которые дают возможность дистанционно управлять включением/выключением преобразователя. Это обеспечивает возможность программного включения отдельных преобразователей в соответствии с необходимым алгоритмом функционирования аппаратуры.

Среднее время наработки на отказ (MTBF) составляет 200000 часов (85°C, A<sub>IT</sub> — эксплуатация в грузовом отсеке самолета).

### Преобразователи серии MHP270

Преобразователи серии MHP270 работают от первичного номинального напряжения 270 В, длительное функционирование возможно в диапазоне входных напряжений от 160 В до 400 В с импульсами напряжения до 450 В. Параллельное соединение осуществляется без дополнительных компонентов. До пяти преобразователей с одним выходным каналом могут быть соединены параллельно на одну нагрузку. Устройства в этой конфигурации имеют 90% точность токового распределения во всём диапазоне нагрузок и обеспечивают N+1 резервирование.

Преобразователи MHP характеризуются гибкой схемой синхронизации, в которой они могут быть засинхронизированы от внешнего генератора или один от другого с использованием входных и выходных контактов синхронизации.

Введение обратной связи со входных контактов потребителя обеспечивает автоматическую компенсацию падения напряжения на выходных линиях в модулях с одним каналом.

### Преобразователи серии SMHF

Преобразователи серии SMHF выполнены по схеме однотактного преобра-

зователя с прямым включением выпрямительного диода, с постоянной рабочей частотой 550 кГц. Преобразователи поставляются в следующих вариантах исполнения:

- стандартный – испытания на устойчивость к воздействующим факторам внешней среды, категория Н, категория К (см. врезку);
- варианты отбора по устойчивости к воздействию радиации:
  - О – не радиационно стойкие;
  - Л – устойчивые к интегральной дозе до 50 крад (Si);

Р – устойчивые к интегральной дозе до 100 крад (Si) и допускающие единичные нарушения при потоках тяжёлых ионов 1×10<sup>7</sup> частиц/см<sup>2</sup> (SEU).

Для соответствия строгим требованиям категории К и уровням по допустимым дозам радиации L и R для космоса в преобразователях SMHF применяются радиационно стойкие элементы, МОП-транзисторы и логические устройства, танталовые конденсаторы.



Внешний вид конструкции преобразователя серии SMHF

Отбор элементов включает в себя следующие процедуры: партии входных конденсаторов отбираются сканирующей лазерной акустической микроскопией SLAM™, транзисторы и ИС берутся из партий, проверенных системой электронной микроскопии SEM, резисторы и конденсаторы подвергаются дополнительному тестированию.

Преобразователи имеют схему защиты от короткого замыкания и цепи внешней синхронизации. Обеспечивается возможность дистанционного включения/выключения преобразователя с помощью TTL совместимых сигналов.

### Преобразователи серии MFL

Модели MFL2802S и MFL2803R3S с одним выходным каналом 2,2 В и 3,3 В соответственно предназначены для применения в системах, где требуются низкие уровни напряжения. Для работы сервомоторов и пускателей модели MFL2808S вырабатывают выходное напряжение 8 В и способны отдавать в на-



Конструкция преобразователей серии MFL

грузку до 55 Вт. Эти модели работают при температурах -55...+100°C с кпд 84%. Работа при +125°C возможна при пониженной выходной мощности.

Модель MFL2828S вырабатывает 28 В, обеспечивая выходную мощность 65 Вт при кпд 86%. Рабочий температурный диапазон составляет от -55 до +125°C.

**Преобразователи серии MTR**

Преобразователи выполнены по схеме однотактного преобразователя с прямым включением выпрямительного диода, с постоянной рабочей частотой 625 кГц. Хорошие показатели нестабильности выходного напряжения (5 мВ) обеспечиваются широкополосной сильной магнитной связью обмоток в цепи обратной связи, а в одноканальных преобразователях исключением влияния падения напряжения на питающих линиях.

Преобразователи серии MTR способны отдавать в нагрузку максимальную мощность в диапазоне значений входного напряжения 16...40 В. Работа при значениях входного напряжения ниже 16 В, включая аварийные условия по MIL-STD-704D, возможна при пониженной мощности. При низком входном напряжении (ниже 9 В) обеспечивается выключение преобразователя.

Введение дополнительных звеньев коррекции обеспечивает формирование частотной характеристики преобразователя таким образом, что она соответствует характеристике некоторого эквивалентного фильтра 2-го порядка, что позволяет достичь хороших показателей по стабильности и подавлению входных пульсаций при одновременном обеспечении устойчивости режима. Подавление частот звукового диапазона достигает значения 50 дБ. При кратковременном изменении

входного напряжения от минимального значения до максимального отклик составляет менее 4%.

Возможна поставка преобразователей с добавочными отбраковочными испытаниями в соответствии с MIL-STD-883. Нарботка на отказ (MTBF) – 456 000 часов (85°C, A<sub>IT</sub>).

**Преобразователи серии MHV**

Преобразователи серии MHV имеют наилучшие показатели по пульсациям выходного напряжения постоянного тока. Значение двойной амплитуды пульсации выходного напряжения ниже 5 мВ. Чрезвычайно широкий диапазон входного напряжения 16...50 В и набор моделей с семью различными конфигурациями выходных каналов обеспечивают простую системную интеграцию.

Модули серии MHV являются ключевыми преобразователями, выполненными по схеме однотактного преобразователя с обратным включением выпрямительного диода и дополнительной обратной связью по току дросселя (ДОСТД). Конвертеры серии MHV состоят из двух преобразователей, фазы переключений которых смещены на 180° относительно друг друга. Каждый из встроенных конвертеров работает с частотой приблизительно 300 кГц. Применение этой технологии позволяет устранять перекрёстное влияние, минимизировать общую пульсацию на входе, значительно ослабить пульсацию выходного напряжения и увеличить кпд.



Варианты конструктивного оформления преобразователей серии MHV

Способности конвертеров выдерживать всплески входного напряжения до 80 В в течение 120 мс и сохранять работоспособность при переходных процессах во время настройки выходного напряжения превышают требования стандарта MIL-STD-704A.

**Преобразователи серии MHD**

По своим характеристикам преобразователи этой серии аналогичны преобразователям серии MTR.

Показатель удельной мощности равен 895 Вт/дм<sup>3</sup>. Стойкость к ионизирующим излучениям характеризуется следующими параметрами:

- общая доза поглощения 4×10<sup>4</sup> рад (Si);
- максимальный диапазон дозы поглощения:
  - функционирование и продолжение функционирования при нарушениях (восстановление в течение 10<sup>-3</sup>с) – 5×10<sup>9</sup> рад (Si)/с (мощность поглощенной дозы);
  - функционирование без нарушений 5×10<sup>8</sup> рад (Si)/с (мощность поглощенной дозы);
  - общий поток нейтронов 10<sup>11</sup> частиц/см<sup>2</sup>.

**Преобразователи серии MRH, MTO**

Преобразователи этих серий являются высоконадёжными изделиями, которые применяются в военных/авиационно-космических программах в течение более 10 лет. Преобразователи разработаны для работы в условиях с повышенными уровнями радиации, вызванных ядерной реакцией в реакторе или взрывом. Преобразователи нормально функционируют в условиях с потоком нейтронов до 10<sup>13</sup> частиц/см<sup>2</sup>, мощности поглощенной дозы 10<sup>11</sup> рад (Si)/с, общей поглощенной дозой 10<sup>5</sup> рад (Si)/с. При повышенной мощности поглощенной дозы (>10<sup>11</sup> рад (Si)/с) возможно нарушение работоспособности, вызывающее просадки напряжения. Это не приводит к выходу из строя преобразователя. Преобразователь восстанавливает работоспособность в течение 10<sup>-3</sup> с.

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО КЛАССА**

Новое семейство преобразователей постоянного напряжения VP обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики при оптимальной стоимости. 35 новых преобразователей, предназначенных для применения в промышленных, коммерческих, телекоммуникационных и полувоеенных при-

менениях сгруппированы в семь серий от VPA до VPG и функционируют в расширенном температурном диапазоне от -40 до +100°C. Защита полупроводниковых и иных элементов схемы преобразователей осуществляется встроенными устройствами защиты от короткого замыкания и превышения мощности нагрузки. Для всех серий преобразователей характерным является значение КПД 80...90%. Многие модели также обеспечивают гибкие функции регулировки выходного напряжения и особенно широкий диапазон входного напряжения. Все преобразователи серии VP конструктивно выполнены в герметизированных корпусах, экранированных медью, и склеены эпоксидным клеем для обеспечения защиты от воздействия факторов окружающей среды.

Фирма Interpoint является одним из немногих производителей, которые обеспечивают надёжность изделий промышленного класса путём дополнительных отбраковочных испытаний (табл. 5).

Таблица 5. Перечень тестовых процедур

Проверки	Метод
Ускоренные испытания (96 часов)	MIL-STD-202, метод 108 @ максимальная установленная температура
Механические удары	MIL-STD-202, метод 213, условия D
Термоциклирование	MIL-STD-202, метод 107, условия B (изменённый)
Электротермотренировка	Методика проведения теста принята Interpoint

### Преобразователи серии HR

Созданные по тонкопленочной технологии высоконадежные преобразователи серии HR предназначены для работы в суровых условиях окружающей среды. При производстве изделий серии HR применяются такие же технологические процессы и отбраковочные испытания, как и при производстве преобразователей, предназначенных для гражданских пассажирских самолётов, космических летательных аппаратов многократного использования, современных истребителей и других высоконадежных изделий. Высокий уровень герметичности корпусов допускает повышение их надёжности за счет заполнения внутреннего объёма сухим азотом.

### ПОМЕХОЗАЩИТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

При работе транзисторных ключей конвертеров вследствие резкого изменения тока в силовых цепях возникают радиопомехи в диапазоне частот  $15 \times 10^3 \dots 4 \times 10^8$  Гц. Основным путём рас-

пространения помех являются общие цепи питания. При этом радиопомехи распространяются по проводам, непосредственно связанным с источником помех. Распространение кондуктивных помех происходит по симметричному и несимметричному путям. Симметричные токи замыкаются через сопротивление нагрузки и, как правило, имеют равные и встречно направленные векторы, что, с точки зрения радиопомех, менее опасно. Так как конструкции ИВЭП в большинстве практических случаев не могут исключить возникновения высокочастотных помех во входных и выходных шинах, то довольно часто используются помехоподавляющие фильтры. Фильтры позволяют снижать кондуктивные помехи как от внешних, так и от внутренних источников. Эффективность фильтрации определяется вносимым затуханием фильтра:

$$S = 20 \lg \frac{U_1}{U_2} = 20 \lg \frac{I_1}{I_2} \text{ дБ}$$

где  $U_1, I_1$  – напряжение и ток нагрузки в исходном состоянии;  $U_2, I_2$  – напряжение и ток помех на нагрузке в цепи с фильтром.

К фильтру предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение заданной эффективности в требуемом частотном диапазоне (с учетом внутреннего сопротивления и нагрузки электрической цепи);
- ограничение допустимого падения постоянного или переменного напряжения на фильтре при максимальном токе нагрузки;

- обеспечение допустимых нелинейных искажений питающего напряжения;
- эффективность экранирования, минимальные габаритные размеры и масса, обеспечение нормального теплового режима, стойкость к механическим и климатическим воздействиям, технологичность конструкции и т. д.;
- элементы фильтра должны выдерживать номинальные токи и напряжения электрической цепи, а также сохранять работоспособность при возникающих в цепи бросках напряжений и токов, вызванных нестабильностью электрического режима и переходными процессами.

Фильтры рекомендуется применять с преобразователями военного и авиационно-космического класса для ослабления кондуктивных помех в соответствии с требованиями параграфа CE03

стандарта MIL-STD-461. Возможна поставка фильтров с дополнительными отбраковочными испытаниями в соответствии с MIL-STD-883.

### Помехозащитные фильтры серии SFMC28-461

Фильтры серии SFMC при использовании с преобразователями серий SMHF или SMSA ослабляют общую пульсацию входного тока минимум на 55 дБ на частоте 500 кГц и на 60 дБ на частоте 1 МГц. Фильтры серии SFMC заключены в высоконадежный герметичный корпус и не чувствительны к интегральной дозе радиации до 1 Мрад (Si). Эффективность фильтра можно оценить по графикам, приведённым на рис. 1 (а, б).



Фильтры аттестованы по категории К для космических условий и соответствуют параграфам CE01 и CE03 по MIL-STD-461C. Параграф CE01 регла-

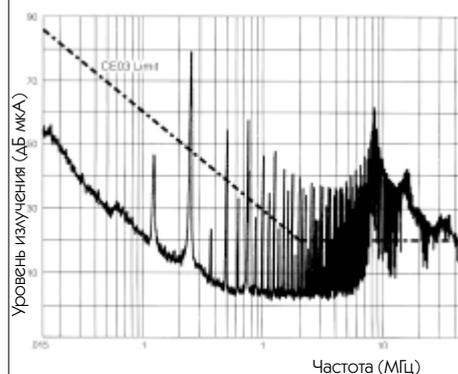


Рис. 1а. Уровень помех на входе преобразователя MHE 2805S без дополнительного фильтра

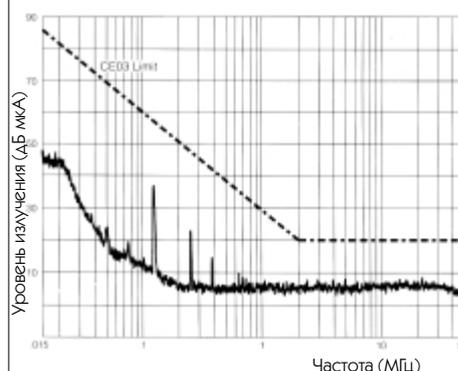


Рис. 1б. Уровень помех на входе преобразователя MHE 2805S с фильтром FMH-461

ментирует требования по кондуктивным излучениям в полосе частот от 30 Гц до 15 кГц.

#### FM-704A: модуль универсального фильтра ЭМИ и ограничителя выбросов напряжения

Модуль FM-704A обеспечивает защиту высокочастотных преобразователей от перенапряжения (MIL-STD-1725A и MIL-STD-704A) и кратковременных импульсов напряжения (параграф CS06 MIL-STD-461). Параграф CS06 определяет методику испытания изделий на устойчивость к кратковременным импульсам, при этом на силовую шину промежуточного напряжения подается импульс с амплитудой 200 В.

Для испытаний применяются импульсы длительностью 0,5 мкс и 10 мкс. Импульсы с длительностью 0,5 мкс подаются любыми преобразователями, имеющими на входе простой встроенный Г-образный LC-фильтр или внешним фильтром серии FM, подключенным к силовой шине. Единственным способом подавления импульсов длительностью 10 мкс является применение ограничителей импульсов, подобных используемым в FM-704A, которые способны выдерживать импульсы амплитудой до 400 В.

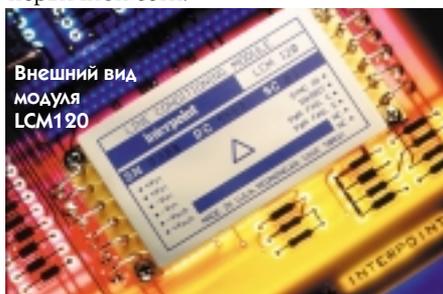
Допуск по радиации определяется общей дозой поглощения  $2 \times 10^4$  рад (Si).

#### СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Эти изделия были созданы в дополнение к стандартному ряду изделий фирмы Interpoint.

#### Модуль нормирования входного напряжения LCM120

Нормализатор входного напряжения характеризуется диапазоном входного напряжения 10...80 В и пропускной мощностью 120 Вт. Выходное напряжение лежит в диапазоне 23...37 В и зависит от входного напряжения. Нормализатор позволяет создавать системы вторичного электропитания в условиях сильной нестабильности напряжения в первичной сети.



#### Модуль задержки HUM

Модуль HUM обеспечивает работоспособность электронной системы во время просадки входного напряжения, уменьшая требования к значению ёмкости накопительного конденсатора более чем на 80%.

#### Серия MQO

Преобразователи серии MQO имеют выходную мощность 16,5 Вт в четырехканальной конфигурации. Встроенный помехозащитный фильтр и ограничитель всплесков напряжения обеспечивают соответствие по кондуктивным помехам требованиям стандарта MIL-STD-461 CE03 и CS01, CS02, CS06.

Свойство задержки обеспечивает стабильность выходного напряжения во время кратковременных просадок напряжения на входе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, рамки журнальной статьи не дают возможности подробно представить все изделия, выпускаемые фирмой Interpoint.

Изделия силовой электроники, производимые фирмой Interpoint, позволяют построить высоконадёжные распределённые (децентрализованные) системы электропитания для робототехнических комплексов, технологического оборудования, аппаратуры радиосвязи, оборудования летательных аппаратов и других подвижных объектов. ●

## МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С ростом популярности распределённых систем электропитания всё большее применение находят преобразователи постоянного тока. Особенно жесткие требования к массо-габаритным и эксплуатационным характеристикам преобразователей предъявляются при их применении в необслуживаемых и бортовых системах. Здесь мы рассмотрим некоторые решения, применяемые разработчиками при создании современных источников вторичного электропитания.

#### Асимметричная передача энергии

Суть этого метода состоит в следующем. Известно [1], [2], что при проектировании однотактных преобразователей важно обеспечить размагничивание их магнитопровода как в установившемся режиме работы, так и при выключении преобразователя, поскольку в противном случае при следующем включении преобразователя магнитопровод окажется насыщенным и произойдёт неограниченный рост стокового (коллекторного) тока транзистора, что приведет к его отказу. Для размагничивания трансформатора во время паузы применяют

размагничивающую обмотку  $W_p$ , замкнутую на источник питания через рекуперационный диод  $VD_p$  (рис. 1а). Чтобы предотвратить насыщение магнитопровода, обмотки  $W_1$  и  $W_2$  должны иметь между собой сильную магнитную связь и одинаковое количество витков. Выполнение этого условия обеспечивает уменьшение индуктивности рассеяния обмотки  $W_1$  и, как следствие этого, снижает амплитуду коммутационного импульса напряжения на стоке  $V_{TC}$  при его заперении. Для улучшения массо-габаритных характеристик трансформатора применяют различные схемотехнические решения. Уменьшение числа витков обмотки размагничивания увеличивает перенапряжения на транзисторе и диодах, требуя применения имеющих большие потери мощности высоковольтных компонентов, а также специальной демпфирующей цепи для защиты от коммутационного импульса стокового напряжения, вызванного накоплением энергии индуктивности рассеяния силового трансформатора, особенно когда используется неравное число витков основной и размагничивающей обмоток.

Механизм асимметричной передачи энергии (Asymmetrical Power Transfer, APT) был разра-

ботан при изучении инженерами-разработчиками возможности использования паразитных емкостей и индуктивностей как монтажа, так и компонентов преобразователей для размагничивания магнитопровода. Идея состояла в том, чтобы передать энергию обратного такта в нагрузку без применения размагничивающей обмотки. Соотнеся параметры паразитных индуктивностей и емкостей с требованиями размагничивания магнитопровода, разработчики добились автоматической и отлично сбалансированной схемы размагничивания магнитопровода преобразователя, получив при этом коэффициент заполнения импульсов 0,67 (максимальный коэффициент заполнения импульсов при равенстве числа витков размагничивающей и рабочей обмоток достигает 0,5). В то же самое время перенапряжения на взаимодействующих полупроводниковых элементах были снижены. Следствием является исключение размагничивающей обмотки, что предоставляет большую площадь для силовой обмотки и делает возможным применение силовых МОП-транзисторов с более низким сопротивлением во включенном состоянии, что уменьшает потери на переключение, и низковольтные выпрямительные диоды.

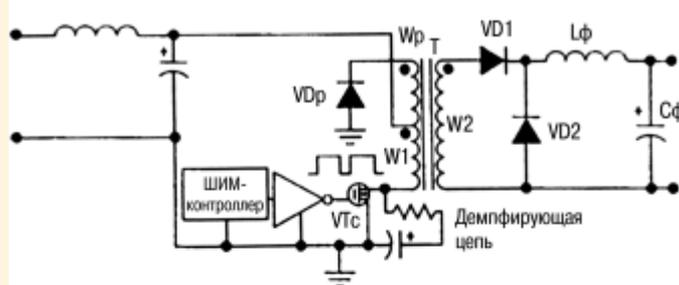


Рис. 1а. Преобразователь с размагничивающей обмоткой

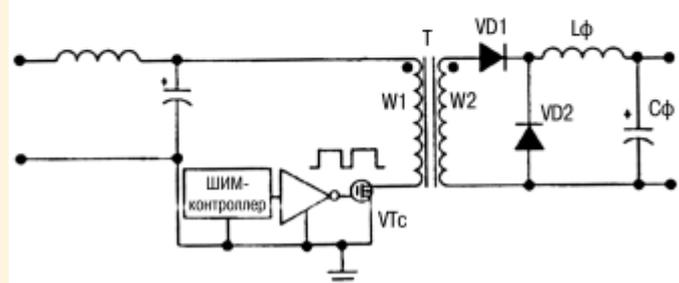


Рис. 1б. Преобразователь с АРТ

При этом обеспечивается эффективное демпфирование коммутационного импульса напряжения стока и снижение его до требуемых норм без применения дополнительных элементов и цепей протекания коммутируемого тока. Эти обстоятельства делают возможным использование всей площади магнитопровода трансформатора для передачи энергии первичного источника в нагрузку и не позволяют терять часть поверхности для размагничивающей обмотки. Функциональная схема преобразователя напряжения постоянного тока, выполненного с применением АРТ, приведена на рис. 1б.

Следствием применения АРТ является впечатляющее увеличение эффективности передачи энергии ( $\eta_{\text{кд}}=87\%$ ).

### Усовершенствование конструкции трансформатора

Для достижения высокой удельной мощности потребовалось также улучшение конструкции трансформатора, которое увеличило до предела полезную площадь меди, используемую для передачи энергии. Применение новых типов магнитных материалов для производства сердечников трансформаторов довело до минимума объём феррита и длину витка (число витков в катушке). Конструкция трансформатора является прямоугольной, а её высота примерно в два раза меньше, чем у трансформаторов, выполненных с применением стандартных ферритов. Применение бескаркасных обмоток с плоскостным медным проводом устранило промежуточные круглые проводки, и увеличил коэффициент заполнения медью до 80% (стандартный круглый провод, намотанный на каркас, имеет типовой коэффициент заполнения около 50%). Плоскостные проводники так-

же уменьшают потери, так как имеют минимальное сопротивление для высокочастотной составляющей переменного тока. Результатом является уменьшение силы скин-эффекта, межвитковой ёмкости, индуктивности рассеяния и потерь на гистерезис. Для лучшего отвода тепла от обмотки трансформатора для его пропитки применяется специальный высокотеплопроводящий компаунд. Компаунд подбирается, исходя из его антистатических свойств, высокой удельной теплопроводности и хорошей тепловой совместимости с ферритовым материалом.

Критическим параметром, влияющим на значение удельной мощности, является высота магнитопровода. Так как магнитопроводы являются самыми габаритными компонентами источника питания, то уменьшение их высоты служит весьма существенным фактором для уменьшения общего объёма источника. Применение низкопрофильных магнитопроводов в преобразователях уменьшает их высоту до 10 мм и менее. Эта величина является важной в двух отношениях.

Обычно источники питания являются наиболее высокими элементами на печатной плате, поэтому уменьшение их высоты даёт возможность сократить пространство между платами и сократить общий объём системы.

Небольшая высота преобразователей способствует также лучшему отводу тепла. Наиболее эффективен отвод тепла через элементы конструкции аппаратуры (через стенки корпуса, через печатную плату, через радиатор). Большая площадь поверхности обеспечивает лучшие условия для отвода тепла кондукцией (теплопроводностью). Небольшая высота модуля увеличивает площадь поверхности для данного объёма. Преобразователи с одинаковой

удельной мощностью и различающиеся по высоте имеют разную площадь для отвода тепла. Например, преобразователь с высотой 12,7 мм имеет на 24% меньшую поверхность для отвода тепла, чем преобразователь с высотой 9,7 мм [3].

### Дополнительная обратная связь по току дросселя

Применение наряду с методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой и обратной связью по напряжению дополнительной обратной связи по току дросселя (ДОСТА) даёт многочисленные улучшения различных характеристик, особенно при рабочей частоте выше 500 кГц. Для организации ДОСТА в модулях MFLNР фирмы Interpoint применяются высокоскоростной компаратор LM119, двойной операционный усилитель МС34073, а в качестве силового ключа используется МОП-транзистор Hex-3. Драйвер TSC 4429 обеспечивает заряд паразитной входной ёмкости силового ключа (1000 пФ) на мощном МОП-транзисторе типа Hex-3 до 12 В за

время менее 300 нс. Функциональная схема, поясняющая принцип действия ДОСТА, приведена на рис. 2. При регулировании с использованием ШИМ-модуляции и дополнительной обратной связи по току дросселя ключ выключается при достижении током дросселя некоторого порогового значения. Порог задается выходным сигналом усилителя ошибки и величиной напряжения на токоизмерительном резисторе. Режим с ДОСТА обеспечивает параметрическую компенсацию отклонений входного напряжения, поцикловое (то есть в каждом рабочем цикле) ограничение тока. Кроме того, происходит компенсация одного из двух полюсов передаточной характеристики контура регулирования, что обеспечивает собственную устойчивость системы. Упрощается частотная коррекция всего контура обратной связи и уменьшается время реакции контура как при малых, так и при больших изменениях тока нагрузки. Параметрическая компенсация отклонений входного напряжения позволяет мгновенно корректировать (без использования динамического диапазона усилителя сигнала ошибки) режим работы источников питания при произвольных изменениях входного напряжения. Благодаря этому нестабильность по сети получается очень малой, а режим работы усилителя сигнала ошибки меняется только при изменениях тока нагрузки.

Упрощается также процесс параллельного распределения тока. Несколько преобразователей могут быть соединены параллельно без внешних компонентов и любой из них может быть ведущим или ведомым в схеме распределения тока. Кроме того, механизм обратной связи и независимость преобразователей позволяют реализовать несколько различных схем синхронизации. Преобразователи могут быть

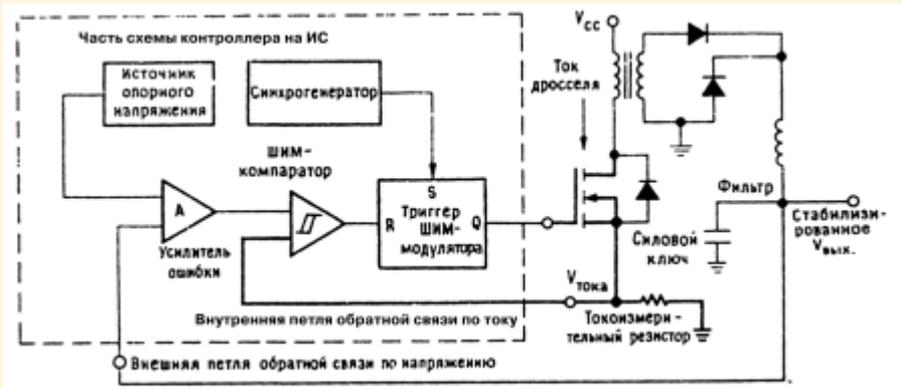


Рис. 2. При регулировании с использованием ШИМ-модуляции и дополнительной обратной связи по току дросселя (ДОСТА) ключ выключается при достижении током дросселя некоторого порогового значения. Порог задается выходным сигналом усилителя ошибки и величиной напряжения на токоизмерительном резисторе

засинхронизированы общим генератором или работают без внешней синхронизации. К тому же, они могут быть засинхронизированы друг от друга и объединены с системным генератором или работать в свободном режиме (без синхронизации). Это свойство предоставляет широкую свободу при регулировании входных и выходных излучений. Общая синхронизация применяется в тех случаях, когда цифровые сигналы или аналоговые сигналы не подвергаются влиянию радиопомех, генерируемых преобразователями. В свободном режиме максимумы спектра не являются аддитивными, но разные частоты преобразования могут приводить к бинам частот.

**ТЕХНОЛОГИЯ УДВОЕНИЯ ФАЗЫ/СДВИГА ФАЗЫ (DPPS)**

Эта технология применяется в преобразователе МК200 и некоторых других преобразователях фирмы Interpoint. Функциональная схема преобразователя МК200 приведена на рис. 3. Технология DPPS способствует форсированию выходной мощности без значительного увеличения габаритных размеров. DPPS фактически устраняет шумы на выходе при впечатляющем росте таких важнейших показателей качества преобразователей электрической энергии, как удельная мощность и КПД.

Наилучшим образом содержание этой технологии определяется при анализе двух составляющих понятия «удвоение фазы/сдвиг фазы». Удвоение фазы служит признаком того, что в одном корпусе размещаются два преобразователя. Сдвиг фазы означает, что фазы двух параллельных силовых контуров, работающих на одной частоте, сдвинуты относительно друг друга на некоторый угол (как правило, 180°).

Идея удвоения фазы требует, чтобы каждый из двух преобразователей, помещенных внутри герметизированного корпуса, делал одинаковый вклад в суммарный ток. Например, если преобразовате-

ли, встроенные в один корпус, производят каждый по 100 Вт, то суммарная выходная мощность модуля равна 200 Вт. Для этого применяется топология токового распределения для балансировки токов в нагрузке от каждого выходного канала.

Пути сдвига двух фаз достигаются различными уровнями сокращения общей пульсации, зависящей от рабочего цикла преобразователей.

Характерной особенностью преобразователей МК200 с DPPS является 75% значение максимального рабочего цикла в диапазоне входных напряжений от 16 В до 50 В.

Преимуществом 75% максимального значения рабочего цикла является абсолютное подавление пульсации при номинальных режимах на входе преобразователя и минимизация общей пульсации при низком и высоком значении напряжения на входе преобразователя. Пульсация на выходе преобразователей фактически не превышает 10 мВ (двойная амплитуда) (в значительной степени пульсация обусловлена переходными процессами, вызванными работой силового транзистора преобразователя, которая полностью не устраняется).

Преобразователи с фазовым смещением обеспечивают также благоприятные условия для подавления пульсации входного тока. Зачастую фильтрация по входу является более сложной проблемой, так как очень трудно подобрать высоковольтные конденсаторы, способные выдерживать высокую пульсацию тока и пусковой импульс напряжения. Как и в случае с пульсацией выходного напряжения, значение пульсации входного тока находится около нуля, если обе фазы работают при 50% рабочем цикле. Так как обе фазы смещены на 180°, равноценный рабочий цикл равен почти 100%. Это приводит к впечатляющему ослаблению пульсации тока на входе и уменьшению почти в два раза номинала входного конденсатора.

Вместе со значительным подавлением выходной пульсации уменьшается и число конденсаторов, необходимых для подавления пульсации. Вдобавок ко всему отпадает требование к необходимости применять конденсаторы с низким значением эквивалентного последовательного сопротивления. После магнитопроводов конденсаторы являются наиболее габаритными компонентами преобразователей, поэтому уменьшение количества конденсаторов делает возможным разместить два преобразователя, вырабатывающих выходную мощность 200 Вт, в герметизированном корпусе, немногим больше, чем корпус обычного преобразователя. В конструкции преобразователя с удвоением фазы для получения необходимой выходной мощности используются два небольших магнитных элемента вместо одного большого магнитопровода, что позволяет уменьшить длину обмотки и паразитные явления. Более эффективные магнитопроводы с небольшими размерами способствуют увеличению КПД до 90% [4].

**ВОЕННАЯ ПРИЕМКА И СПЕЦТОБОР КОМПОНЕНТОВ**

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы аппаратуры в космических условиях играет стойкость элементов и ма-

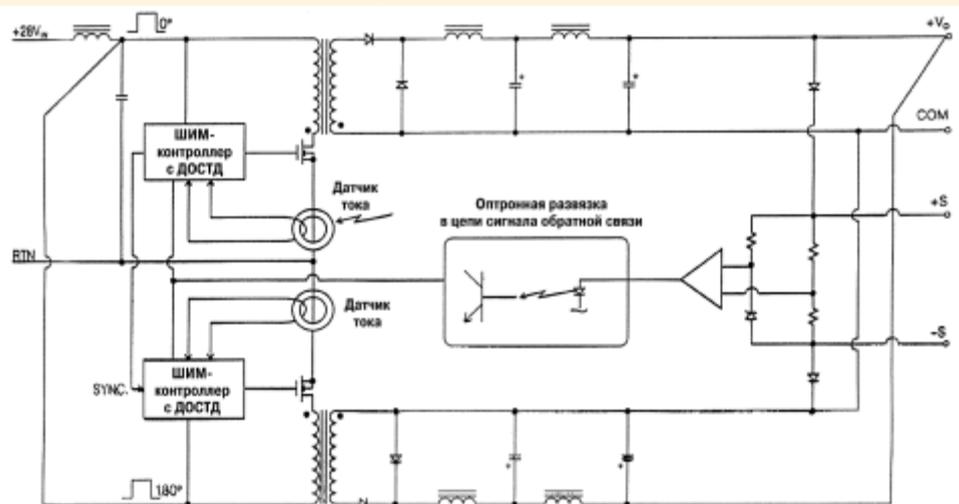


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя МК200

Таблица 6. Перечень тестовых процедур

Приёмочные испытания, метод и условия (согласно MIL-STD-883)	Стандартный отбор (О)	Отбор по уровням	Отбор по уровням
		категории Н (Н)	категории К (К)
Проверка качества соединений проводников, метод 2023	-	-	x
Визуальный внутренний контроль (перед герметизацией), метод 2017, 2032	x	x	x
Термоциклы, метод 1010, усл. С	x	x	x
Центрифуга (постоянное ускорение), метод 2001, усл. А	x	x	x
PIND тест, метод 2020, усл. В	-	-	x
Электротермотренировка, метод 1015 при 125°C			
96 ч	x	-	-
160 ч	-	x	-
2x160 ч	-	-	x
Окончательный контроль по электрическим параметрам MIL-PRF-38534, группа А	x	x	x
Герметичность, тонкие течи, метод 1014, усл. А	x	x	x
Герметичность, грубые течи, метод 1014, усл. С	x	x	x
Рентгеновский радиографический контроль, метод 2012	-	-	x
Окончательный внешний осмотр, метод 2009	x	x	x

териалов ее конструкции к воздействиям факторов космической среды.

Космические условия характеризуются совокупностью воздействий космической среды, к которым относятся глубокий вакуум, невесомость, температура, электромагнитные и корпускулярные излучения, наличие метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд и т. д. [5].

Фирма Interpoint начала производство нового стандартного ряда преобразователей постоянного напряжения и помехозащитных фильтров, устойчивых к воздействию радиации и полностью соответствующих MIL-PRF-38534 категория К. Категория К является наивысшим уровнем надёжности, который признаётся Центром снабжения Министерства Обороны США и превышает по уровню отбора категорию Н. Требования категории К нормируют разработку, отбор компонентов, процесс производства, обучение персонала и отбраковочные испытания изделий для применения в космических условиях.

ваны с применением компонентов с соответствующими уровнями проверки, зависящими от уровней отбраковочных испытаний на устойчивость к воздействующим факторам внешней среды и действию радиации (табл. 6 и 7).

Из совокупности элементов, используемых в преобразователях напряжения, наименьшей радиационной стойкостью по сравнению с трансформаторами, дросселями, конденсаторами и резисторами обладают полупроводниковые приборы, поэтому они являются наиболее критичными к радиационному излучению. Поглощенная доза излучения в таблице 7 указана для полупроводниковых элементов. Напомню, что уровни воздействия радиоактивных (фоновых) излучений определяются их дозой поглощения и скоростью потока эквивалентных нейтронов на один квадратный сантиметр. Доза поглощения есть энергия любого вида излучения, поглощаемая единицей массы облучаемого вещества и измеряемая в радах ( $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 100 \text{ эрг/г}$ ),  $D = E_{\Delta} / \Delta m$ , где  $E_{\Delta}$  – энергия любого вида из-

Таблица 7. Испытания на воздействие радиации

Допустимая доза радиации	Коды уровней испытаний на воздействие факторов внешней среды		
	Стандартный уровень отбора (О)	Уровни отбора по категории Н (Н)	Уровни отбора по категории К (К)
О – радиационная стойкость не гарантируется.			
Электрические, механические параметры изделий эквивалентны уровням Н, К, L и R	ОО	НО	Не осуществляется
L – радиационно стойкие; проверенные партии; интегральная доза до 50 крад (Si); допускается SEU (единичные нарушения, возникающие вследствие влияния потоков тяжелых ионов) с последующим восстановлением	Не осуществляется	HL	KL
R – радиационно стойкие; проверенные партии; интегральная доза до 100 крад (Si); отсутствие SEU гарантируется	Не осуществляется	HR	KR

Преобразователи и фильтры для использования в космических условиях сконструированы

лучения, переданная некоторой массе  $\Delta m$  облучаемого вещества. Существует также доза интегральная (общее количество энергии, поглощенной всей массой материала, г-рад) [6].

Радиационная стойкость материалов и электрорадиоэлементов характеризуется следующими уровнями доз облучения: металлы и сплавы –  $10^{10} \dots 10^{12}$  рад, керамика, кварц, стекло, ситалл –  $10^7 \dots 10^8$  рад, пластмассы и эластомеры –  $10^5 \dots 10^6$  рад, полупроводниковые приборы и интегральные схемы –  $10^2$  рад.

Все изделия для применения в космических условиях созданы с применением надёжных компонентов QML-производителей (Qualified Manufacturers List, QML – это американский аналог нашей военной приёмки). В изделиях категории Н и категории К применяются компоненты, которые подвергаются добавочным отбраковочным испытаниям. Все преобразователи и фильтры конструктивно сопоставимы, независимо от уровня отбраковки. Это позволяет применять для опытного образца изделия уровня ОО, а в реальной системе использовать изделия, устойчивые к радиации и допускающие единичные нарушения при потоках тяжелых ионов  $1 \times 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> (изделия KR). ●

## Литература

- Бас А.А., Миловзоров В.П., Мусолин А.К. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. – М.: Радио и связь, 1987.–160 с.: ил.
- Сергеев Б.С. Схемотехника узлов источников вторичного электропитания: Справочник. – М.: Радио и связь, 1992.–224 с.: ил.
- David Maliniak. 100-W DC-DC Converter Sports 70 W/IN<sup>3</sup>.Density// ELECTRONIC DESIGN.
- Jay Kuehny, Michelle Manson. New Phase Technology Boosts dc/dc// Electronic Engineering Times. – August 14, 1995.
- Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей среды/ А.В. Козлов и др. – М.: Машиностроение, 1971.–382 с.
- Конструирование радиоэлектронных средств/ В.Ф. Борисов, О.П. Лавренов, А.С. Назаров, А.Н. Чекмарёв; под ред. А.С. Назарова. – М.: Изд-во МАИ, 1996.–380 с.: ил.