

## Некоторые проблемы при проектировании систем распределенного электропитания

**В статье рассмотрены проблемы, возникающие при проектировании систем распределенного электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры на основе модульных полнофункциональных DC/DC-преобразователей. К ним относятся обеспечение безопасных тепловых режимов преобразователей напряжения и снижение электромагнитных помех (появляющихся при работе импульсных преобразователей напряжения) для поддержания электромагнитной совместимости этих устройств с другой аппаратурой. Изложенные в статье принципы являются универсальными. Материал был подготовлен на основе рекомендаций компании Crane Aerospace & Electronics для ее продукции, поставляемой под торговой маркой Interpoint [1].**

Виктор ЖДАНКИН

Одной из революций в сфере проектирования систем вторичного электропитания 80-х годов прошлого века было стремительное развитие архитектуры распределенного электропитания в широком ряду комплексных электронных систем, в которых питание осуществляется от сетей постоянного напряжения. Архитектуры распределенного электропитания заменяют многочисленные источники централизованного электропитания единым мощным крупногабаритным источником, чье напряжение превращается в окончательные напряжения DC/DC-преобразователями, размещаемыми в непосредственной близости от питаемого функционального узла. Развитие этого принципа проектирования подтверждается постоянным увеличением реализации DC/DC-преобразователей: к 2020 году объем продаж на мировом рынке источников питания стандартных преобразователей постоянного напряжения превысит \$35 млрд.

Первое крупномасштабное использование распределенного электропитания произошло в авиационной промышленности, где подобная технология обеспечивает уменьшение объема, массы, улучшение работы с аккумуляторными батареями и более эффективную изоляцию подсистем и резервирование. Когда в авиационном оборудовании заменили гидравлические приводы систем управления полетом самолета более сложным электронным оборудованием, требования к различным напряжениям и уровням мощности быстро возросли. Одним из положений концепции «полностью электрифицированного самолета» (All Electric Aircraft) является переход на новую систему электропитания воздушного судна, рассчитанную

на передачу большой мощности повышенного напряжения постоянного тока с напряжением 270 (540) В, что увеличивает энергетическую эффективность электрической системы электроснабжения за счет повышения напряжения питания и сокращения потерь в электрических проводах [2].

Системы распределенного электропитания предоставили возможность обеспечить электропитанием особо важных потребителей от одной 28/27-В сети постоянного напряжения и центральной батареи аккумуляторов. Это предпочтительней, нежели протягивание через корпус самолета задублированной электрической проводки для каждого уровня напряжения. Кроме экономии массы и объема, данная архитектура упрощает разработку и модернизацию отдельных подсистем, без крупномасштабных изменений в общей проводке системы. Использование модулей преобразователей постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня позволяет также упростить контроль качества электропитания. К тому же модули DC/DC-преобразователей поддерживают очень точную стабилизацию выходных напряжений, несмотря на колебания входного напряжения и нагрузки, а это важный параметр для многих чувствительных подсистем.

Еще одним существенным преимуществом, которое распределенное электропитание принесло в системы электропитания промышленного и специального назначения, является электрическая изоляция. Поскольку в импульсных преобразователях постоянно напряжения в процессе преобразования используются трансформаторы, они обеспечивают электрическую изоляцию, что делает более простым резервирование и за-

щиту всех систем от воздействий отдельных повреждений. Хотя силовые интегральные микросхемы способны выполнять некоторые задачи преобразования и стабилизации, но не могут обеспечить идентичные уровни электрической изоляции, то в дальнейшем архитектуры распределенного электропитания, вероятно, будут зависеть от модульных DC/DC-преобразователей.

Распределение электропитания широко используется в авиационных проектах. Например, компания Crane Aerospace & Electronics одной из первых начала специализироваться в разработке и производстве преобразователей постоянного напряжения для ответственных объектов, поставляя модульные DC/DC-преобразователи практически для каждого самолета компаний Boeing, McDonnell Douglas и Airbus Industries, космических челноков, бомбардировщиков Stealth, истребителей F-14, F-16, F-18 и Mirage, а также вертолетов и ракетных систем. Радиационно-стойкие преобразователи напряжения и преобразователи напряжения категории Military этой компании применяются и в российской аппаратуре ракетно-космической техники.

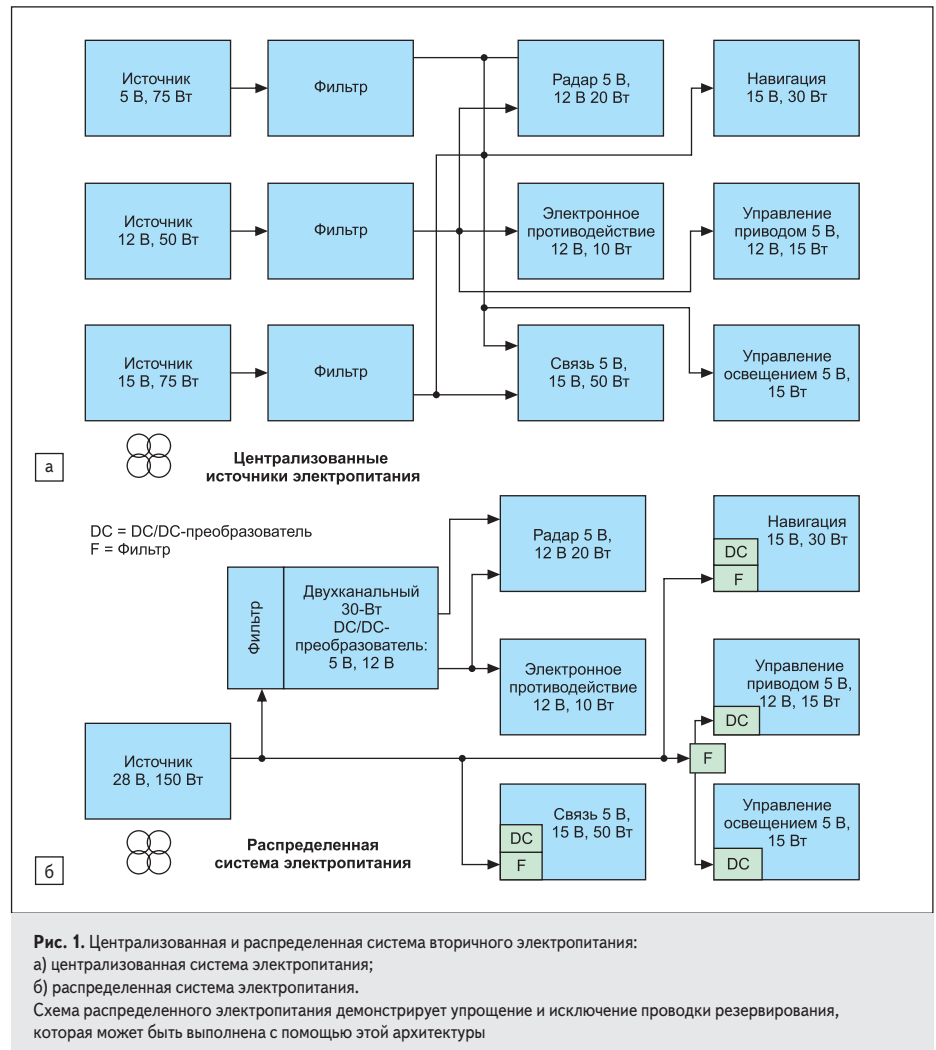
Преимущества концепции распределенного электропитания содействовали ее распространению в системах управления производственными процессами, в автомобильных применениях, компьютерных системах, медицинском электронном оборудовании, телекоммуникации и других применениях, где используются сложные системы с требованиями к разнообразным уровням мощностей и напряжений, небольшой массе или резервному батарейному питанию.

Необходимо отметить, что в России принцип построения распределенных (децентра-

лизованных) систем вторичного электропитания начал широко распространяться с конца 1990-х годов и был признан перспективным направлением построения систем вторичного электропитания для ответственных объектов [3].

В наши дни сдвиг к распределенному питанию усилен существенными изменениями в виде компонентов, применяющихся в электронных системах. За последние десятилетия уровни интеграции интегральных микросхем увеличивались с экспоненциальными скоростями, с появлением в качестве общепринятой технологии для новых систем сверхбольших интегральных схем (СБИС) КМОП-технологии. Многие платы систем с КМОП-устройствами требуют напряжения 5, 12 и 15 В. Это означает, что необходим более чем один источник питания и он должен обеспечивать высокую мощность для большей части плат системы.

КМОП-технологии отличают электрические характеристики, которые усложняют конструкцию централизованных систем электропитания. Микросхемы КМОП используют мощность при переключении, заряжая и разряжая паразитные емкости, вызывая изменения тока нагрузки с высокими скоростями. В таком случае размещение источника питания в непосредственной близости от нагрузки предпочтительней, чем применение низковольтного централизованного источника питания: минимизируются потенциальные проблемы от распределенных индуктивностей проводников и импедансов объединительной платы и выводов соединителей. Эти проблемы стали еще более существенными с разработкой современных полупроводниковых устройств (цифровых сигнальных процессоров, специализированных интегральных схем, микросхем памяти, новых поколений микропроцессоров), которые требуют даже более низкого напряжения (1,2; 1,8; 2,5; 3,3 В) и повышенного качества питания от системы вторичного электроснабжения. С целью снижения стоимости систем электропитания для приложений с множеством разных уровней низких напряжений была предложена концепция распределенной архитектуры системы электропитания с промежуточной шиной (Intermediate Bus Architecture, IBA). Преобразователь промежуточной шины формирует напряжение на ней и обеспечивает гальваническую развязку, а неизолированный преобразователь напряжения, работающий от этой шины и размещаемый в непосредственной близости от нагрузки (Point-of-load, POL), выполняет окончательное преобразование и регулирование выходного напряжения. Системы электропитания с промежуточной шиной могут быть сравнительно недорогими, поскольку неизолированные преобразователи дешевле полнофункциональных DC/DC-преобразователей. Подробно архитектура распределенного электропитания с проме-



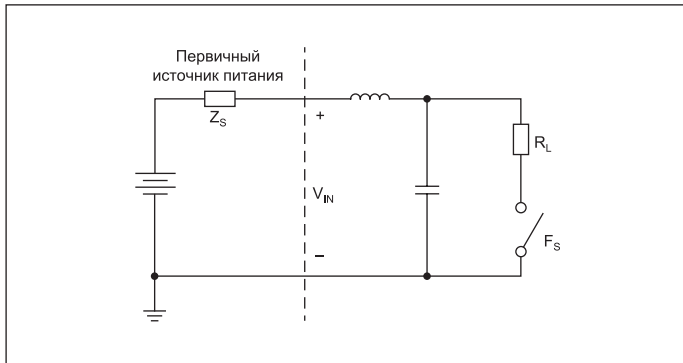
жуточной шиной представлена в ряде работ, где отмечены ее достоинства и недостатки и названы области применения [4–7].

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема типичной бортовой электронной системы в двух вариантах: одна — использующая централизованные источники питания, вторая с распределенным электропитанием. В каждой системе логические схемы распределены между шестью платами, каждая с требованием к особому уровню мощности и одному или более различным уровням напряжения.

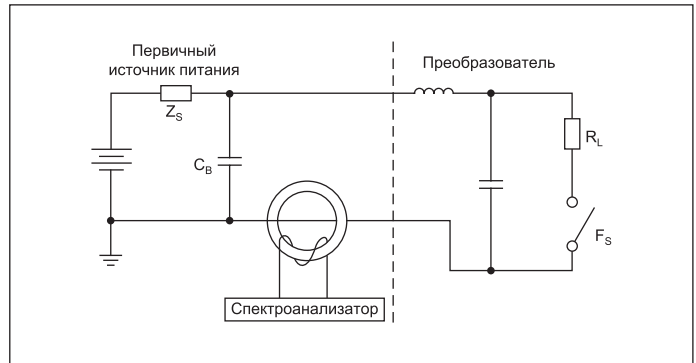
При использовании централизованных систем электропитания предусматриваются центральные источники питания с номинальными напряжениями 5, 12 и 15 В, централизованная фильтрация, система отвода тепла и электропроводка для присоединения к платам. Для варианта распределенного электропитания той же самой электронной системы предлагается один центральный (основной) мощный источник питания с номинальным выходным напряжением 28 В, а модули DC/DC-преобразователей формируют необходимые уровни мощности с соответствующими напряжениями. Когда плате требуются разнообразные напряжения, ис-

пользуются модули с двумя или тремя выходными каналами. В системе распределенного электропитания большая часть преобразователей размещена на одной плате, для которой и обеспечивается питание. Однако можно использовать единственный преобразователь с достаточной мощностью для обслуживания нескольких плат. Эти распределенные источники питания более высокого уровня выполнены в виде модулей для монтажа на плату, но при больших уровнях мощности (свыше 200 Вт) будут, скорее всего, смонтированы в каркасе. Общие принципы конструирования распределенного электропитания достаточно просты, но обязательно должны быть решены две важные проблемы, когда источники питания перемещаются с центрального места к питаемому функциональному узлу.

Первая из указанных проблем — электромагнитные помехи: когда несколько импульсных источников питания размещены в системе, кондуктивные и отраженные пульсации от самих преобразователей должны быть измерены и отрегулированы. Вторая проблема — это тепло: когда источники питания выполнены в компактных корпусах и смонтированы на платах с логическими



**Рис. 2.** Упрощенное измерение дифференциальной помехи на входе. Дифференциальная помеха на входе является током, который протекает в системе электропитания вследствие разницы напряжения между двумя входными проводниками. Для управления (контроля) такой помехой она должна быть сначала измеренной. Измерение напряжения между входными выводами преобразователя определяет входной ток пульсации умножением на эквивалентный импеданс первичного источника



**Рис. 3.** Прямое измерение дифференциальной помехи на входе. Более точное считывание дифференциальной помехи на входе может быть получено ее измерением непосредственно датчиком тока. При использовании этого метода импеданс первичного источника питания имеет незначительное влияние на измеряемый ток. Добавление шунтирующего конденсатора  $C_B$  уменьшает влияние импеданса первичного источника измерения тока еще больше

схемами, необходимо гарантировать, чтобы в процессе преобразования тепло, рассеиваемое в модуле, было отведено.

Прежде чем рассматривать решение этих проблем в системах распределенного электропитания, следует напомнить, что вопросы построения оптимальной системы электропитания радиоэлектронной аппаратуры сегодня весьма актуальны, в частности, существует тенденция применения централизованно-распределенных систем электропитания бортовых электронных комплексов. Аспектам совершенствования систем электропитания ответственных объектов уделяется внимание на конференциях и в многочисленных публикациях [8–10].

### Снижение электромагнитных помех в системе электропитания

Все импульсные DC/DC-преобразователи сначала превращают входное постоянное напряжение в переменное напряжение, а затем — переменное напряжение обратно в требуемое постоянное напряжение. Преобразование в переменное напряжение предусматривает повышающие, а также понижающие функции и позволяет значительно улучшить эффективность (совокупность требований по массе, объему, потерям энергии, ресурсу, надежности) по сравнению с линейными преобразователями. Кроме того, трансформатор обеспечивает электрическую изоляцию между входными и выходными цепями.

Есть много различных схем для осуществления преобразования постоянного напряжения в переменное, но все они генерируют нежелательные сигналы, которые могут быть наведены или переданы по всей системе. Амплитуда этих сигналов определяется частотой переменного напряжения, внутренней и внешней фильтрацией, а на высоких частотах (выше 1 МГц) схемой размещения и подключения преобразователя. Они также зависят от происхождения коммутационных помех, но их изменяемые от нагрузки частоты переключения приводят к генерированию помех с широкими отклонениями частоты, что усложняет их регулирование. Тем не менее для любого типа преобразователя важно измерить и контролировать три наиболее существенных вида помех: входные дифференциальные (симметричные) помехи, входные синфазные (несимметричные) помехи и выходные помехи. В следующем разделе кратко определяется каждый вид помехи, предлагается метод измерения и методика подавления.

Следует также отметить, что для выполнения эффективной фильтрации может потребоваться подробная техническая информация о преобразователе напряжения. Производители преобразователей готовы предоставить необходимые данные и часто могут поставлять фильтры в качестве стандартных изделий, разработанных для совместной эксплуатации с их собственными преобразователями напряжения.

### Дифференциальная помеха на входе

Дифференциальная (симметричная) помеха представляет собой ток помехи, протекающий вследствие разности напряжений между двумя входными проводниками. Помеха на входе преобразователя может быть смоделирована, как показано на рис. 2. Ключевой транзистор или транзисторы преобразователя смоделированы ключом  $F_s$ , который включается и выключается с частотой переключения преобразователя. Нагрузка смоделирована переменным резистором  $R_L$ , который изменяется с нагрузкой. Индуктивность  $L$  и конденсатор  $C$  образуют входной фильтр, встроенный в преобразователь. Почти все преобразователи имеют входной конденсатор, и многие из них также обладают небольшой последовательной индуктивностью.

В испытательной установке (рис. 2) измерение напряжения производится на концах входных выводов преобразователя щупом для замера величины напряжения. Измеренная величина является током пульсации на входе, умноженным на эквивалентный импеданс первичного источника. В том случае, если первичный источник питания и испытательная установка никогда не меняются, помехи от разных преобразователей могут сравниваться непосредственно. Но для измерения действительного тока пульсаций должен быть известен импеданс источника, а импеданс первичного источника питания зависит от недостаточно контролируемых параметров компонентов на выходе источника первичного питания. На частотах выше 1 МГц даже расположение проводников на месте размещения преобразователя будет вносить значительное различие в результаты измерений. В том случае, если используется идеальный источник с нулевым импедансом (комплексным сопротивлением), напряжение измеряемых помех будет всегда нулевым, независимо от величины тока помехи. Более точные результаты испытаний можно получить с помощью испытательной схемы, представленной на рис. 3. Здесь ток помехи преобразователя определяется специальным датчиком, поэтому импеданс первичного источника питания  $Z_s$  будет незначительно влиять на измеряемый ток. Влияние  $Z_s$  дополнительно уменьшается шунтирующим конденсатором  $C_B$ , который должен быть высококачественным компонентом с небольшой эквивалентной последовательной индуктивностью и сопротивлением во всем частотном диапазоне влияния (как правило, на частоте коммутации и выше). Соединительные проводники между конденсатором  $C_B$  и преобразователем должны быть как можно короче для минимизации паразитной индуктивности и помех излучения. Если внутренний фильтр преобразователя недостаточно подавляет дифференциальную помеху до необходимых уровней в системе, на вход могут быть добавлены LC-звенья. Конденсаторы должны быть высококачественными танталовыми с низким эквивалентным последовательным сопротивлением (Equivalent Series Resistance — ESR) и эквивалентной последовательной индуктивностью (Equivalent

Series Inductance — ESL) в фильтруемой полосе частот. Для катушек индуктивности обычно используются чашечные сердечники. При высоких электромагнитных параметрах сердечники этого типа имеют наименьшую материалоемкость, повышенный экранирующий эффект при работе в сильных полях, характерных для современных источников электропитания.

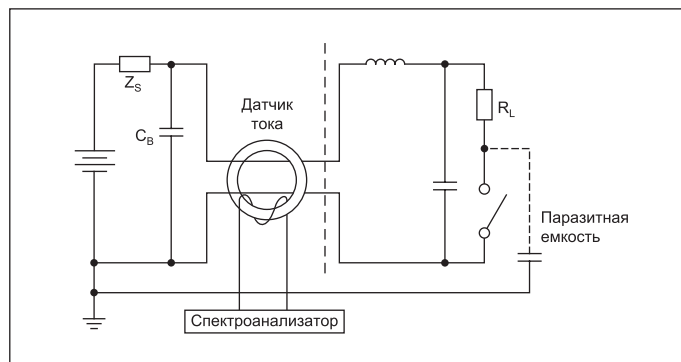
Для правильной работы фильтра импеданс на стороне фильтра преобразователя должен быть ниже, чем входной импеданс преобразователя. Это важно, поскольку все импульсные источники питания представляют собой устройства с постоянной потребляемой мощностью с отрицательным входным сопротивлением. Когда входное напряжение повышается, входной ток должен уменьшаться, чтобы сохранить входную мощность приблизительно на одном уровне. Так как входной импеданс преобразователя отрицательный, а выходной импеданс дополнительного фильтра положительный, для них возможно уменьшение значений до нуля на некоторых частотах, и система «входной фильтр – преобразователь» становится неустойчивой. Поэтому точная информация от производителя о входном импедансе преобразователя приобретает особое значение при разработке фильтра.

Расчет и измерение входного сопротивления преобразователя напряжения с помощью компьютерной методики, основанной на временном и спектральном анализе переходных и стационарных процессов импульсных преобразователей напряжения, представлены в работе [11]. Здесь же даны практические рекомендации по обеспечению устойчивости работы системы «входной фильтр – преобразователь».

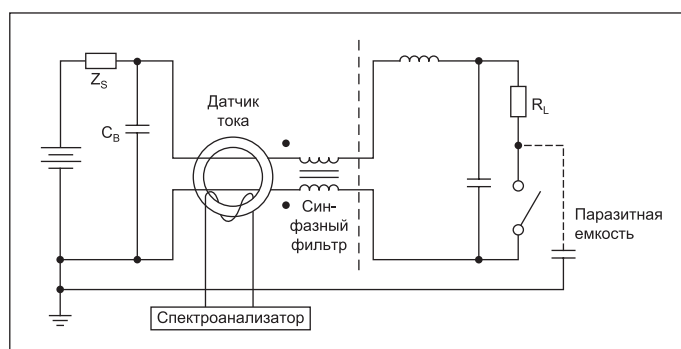
Подробная методика проектирования фильтра электромагнитных помех для преобразователей напряжения компании Crane Aerospace & Electronics с рассмотрением практического примера с использованием современных компьютерных способов моделирования и расчета параметров компонента сглаживающего фильтра представлена в работе [12].

## Синфазная помеха

На рис. 4 представлен способ измерения синфазной помехи на входе преобразователя. В DC/DC-преобразователе ключевые транзисторы обычно размещены в плотном контакте с шасси для обеспечения эффективного отвода теплоты. Для улучшения передачи тепла электрическая изоляция между коллектором или стоком ключевого транзистора выполняется настолько тонкой, насколько возможно. Это создает паразитную емкость между коллектором или стоком транзистора и шасси. Когда ключ открывается или закрывается, ток помехи протекает от ключа через паразитную емкость, через  $R_L$  и  $C$ , а затем через соединение с «землей» обратно на шасси. Такой ток помехи невелик, потому что паразитная емкость незначительна (обычно  $<10$  пФ), но LC-фильтр преобразователя бесполезен в данном случае, поскольку ток протекает вокруг фильтра, а не через него. Синфазная помеха может быть отфильтрована синфазным дросселем (рис. 5) — катушкой индуктивности с двумя обмотками, обе с одинаковым числом витков. Синфазный дроссель представляет высокое индуктивное сопротивление для синфазного тока, но практически никак не влияет на дифференциальный ток. Следует обратить внимание, что точки на синфазном дросселе расположены на входной стороне преобразователя. Это значит, что дифференциальный ток (включая ток нагрузки) втекает в точку верхней обмотки и вытекает из точки на нижней обмотке. Так как токи одинаковые, но противоположные и число витков в обеих обмотках одинаково, результирующий магнитный поток в сердечнике, созданный дифференциальным током, является нулевым, даже если ток нагрузки может быть весьма значительным. В результате, поскольку исключается постоянное подмагничивание сердечника, для синфазного дросселя может быть использован сердечник с высокой магнитной проницаемостью без воздушного зазора, который может иметь относительно высокое синфазное индуктивное сопротивление с несколькими витками. Значительно меньший ток синфазной составляющей помехи протекает главным



**Рис. 4.** Измерение синфазной составляющей помехи. Синфазная помеха вызывается коллектором или стоком ключевого транзистора. Он формирует паразитную емкость из-за близости к шасси. Помеху можно измерить датчиком тока



**Рис. 5.** Фильтрация синфазной помехи. Синфазный фильтр может применяться для фильтрации синфазной помехи. Он представляет высокое индуктивное сопротивление для синфазного тока и фактически не существует для дифференциальной помехи. Так как значительно меньший ток синфазной составляющей помехи протекает в основном через нижнюю обмотку и через обе обмотки в одинаковых направлениях, синфазный дроссель представляет высокий импеданс для токов синфазной помехи

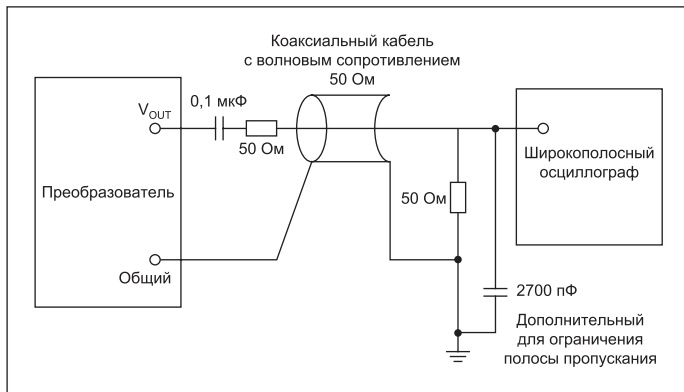
образом через нижнюю обмотку и через обе обмотки в одинаковом направлении. Таким образом, синфазный дроссель представляет высокий импеданс для токов синфазной помехи.

Практический пример разработки фильтра синфазной помехи для гибридно-пленочных преобразователей напряжения компании Crane Aerospace & Electronics рассмотрен в статье [12].

## Электромагнитные помехи на выходе преобразователей напряжения

Измерения пульсаций выходного напряжения сложно выполнить даже при наилучших условиях. В зависимости от используемого метода результаты могут варьироваться в значительной степени.

Как и для тока входной помехи, существует две составляющие пульсаций выходного напряжения: дифференциальная и синфазная. Синфазная составляющая помехи обычно представляет собой ток, протекающий через паразитные емкости шины питания в первичный источник переменного тока. Она имеет незначительное влияние в большей части конструкций системы, но действительно вызывает проблемы при измерении пульсации на выходе. Синфазная составляющая может иметь полосу пропускания несколько десятков мегагерц — область, где у большинства осциллографов наблюдается низкое подавление синфазного сигнала. В результате синфазная составляющая способна проявиться как дифференциальная составляющая. Следовательно, когда измеряется дифференциальная составляющая на выходе, самое лучшее — присоединить общие точки со стороны входа и выхода к корпусу и использовать корпус в качестве един-



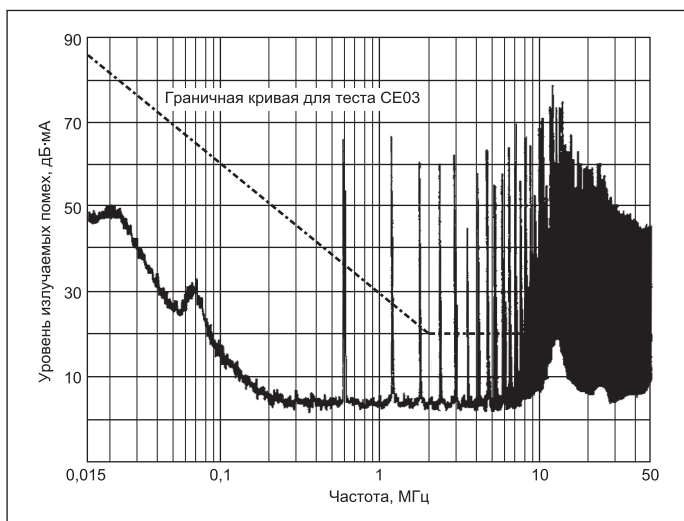
**Рис. 6.** Измерение дифференциальной составляющей пульсации на выходе преобразователя.

Измерение дифференциальной составляющей пульсации напряжения на выходе должно быть выполнено на выходных выводах преобразователя для уменьшения влияния помехи излучения. По той же причине длина проводников должна быть минимальной. Добавлением параллельной емкости на вход осциллографа можно достаточно ограничить ширину полосы пропускания, чтобы наблюдать частоту основной гармоники пульсации выходного напряжения

ственной точки заземления для всей испытательной аппаратуры, чтобы минимизировать взаимное влияние синфазной помехи.

Дифференциальная помеха на выходе является напряжением помехи и появляется между двумя выходными выводами. На рис. 6 представлен используемый компанией Crane Aerospace & Electronics способ измерения дифференциальной составляющей пульсации на выходе преобразователя. Измерение должно выполняться на выходных выводах преобразователя для снижения наведенных помех излучения. Последовательный 50-Ом резистор и 50-Ом согласующий резистор применяются для согласования 50-Ом коаксиального кабеля. Длина проводников, включая заземляющий провод, должна быть как можно короче для уменьшения наведенной помехи излучения. Дополнительный конденсатор емкостью 2700 пФ на входе осциллографа сократит ширину пропускания приблизительно до 2 МГц, что позволит наблюдать частоту основной гармоники пульсации.

В том случае, когда фильтрации внутреннего выходного сглаживающего фильтра недостаточно, чтобы довести уровни помех до пределов требований системы, на выход могут быть добавлены дополнительные LC-звенья. Аналогично входному фильтру конденсаторы



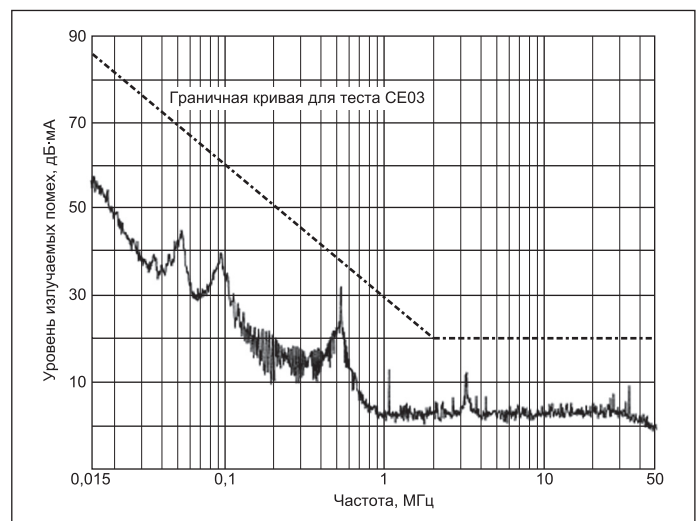
**Рис. 7.** Спектральный состав помехи на входе DC/DC-преобразователя. Без фильтрации на входе спектр помехи 15-Вт преобразователя серии MNF+ превышает допустимые нормы кондуктивных помех, устанавливаемые стандартом MIL-STD-461 (метод/требование CE03)

должны быть качественными танталовыми с низкими ESR и ESL во всем фильтруемом частотном диапазоне. Если же нужно отфильтровать только высокие частоты, достаточно применения качественного керамического конденсатора. Для выходного дросселя также обычно используются чашечные сердечники.

Если частота среза дополнительного LC-фильтра приближается к полосе пропускания внутреннего контура регулирования преобразователя (почти всегда <100 кГц), могут последовать проблемы с устойчивостью. При появлении любых сомнений необходимо обратиться к производителю преобразователя. Подробно вопросы измерения и подавления помех на выходе преобразователей рассмотрены в статьях [13, 14], там же даны рекомендации по конструированию выходных сглаживающих фильтров с оценкой устойчивости распределенной системы электропитания для гибридно-пленочных преобразователей компании Crane Aerospace & Electronics.

## Внешние фильтры

Производители преобразователей напряжения часто выпускают внешние фильтры для применения в системах, где требуется очень низкий уровень помех во входной питающей сети. В большей степени распространены входные фильтры, но иногда предлагаются и выходные фильтры. Изготовитель должен гарантировать, что в системе «входной фильтр – преобразователь» не возникнет проблем с устойчивостью, когда фильтр эксплуатируется совместно с их преобразователями. Компетентный производитель обладает специальными знаниями о методах высокочастотной компоновки, которые отсутствуют у большинства производителей систем. Применение внешних фильтров позволяет существенно улучшить шумовые параметры. Например, на рис. 7 приведен спектр помехи на входе 15-Вт преобразователя серии MNF+ (Crane Aerospace & Electronics) без дополнительного фильтра. А на рис. 8 показан уровень помех на входе этого же преобразователя с применением фильтра FM-704A. Помехи уменьшены значительно ниже жестких регламентов стандарта MIL-STD-461C (требование CE03), Conductive Emission Requirements for the Control of Electromagnetic Interference («Требования к кондуктивным излучениям для управления электромагнитными помехами»). Метод CE03 предназначен для оценки широкополосных и узкополосных помех в частотном диапазоне 15 кГц – 50 МГц и применим как для входных, так и для выходных проводников. Как правило, только проводники, по которым оборудование получает мощность, становятся проблемой, поскольку выходные проводники обычно не выходят за пределы корпуса системы.



**Рис. 8.** Спектральный состав помехи на входе DC/DC-преобразователя с входным фильтром. Применение модуля помехоподавляющего фильтра FM-704A приводит спектральный состав помехи к жестким требованиям стандарта MIL-STD-461

Дополнительно модуль фильтрации и ограничителя напряжения FM-704A также локализует высоковольтные импульсные напряжения на входе преобразователя до уровня, безопасного для прибора.

Для того чтобы обеспечить соответствие нормативам самых последних изданий стандартов MIL-STD-461C (метод/требование CE03, CS01), D, E и F (метод/требование CE102, CS101) к генерируемым кондуктивным помехам и восприимчивости к кондуктивным помехам модулей преобразователей напряжения, компания Crane Aerospace & Electronics разработала новые фильтры электромагнитных помех серии FMCE, которые полностью взаимозаменяемы с существующими фильтрами. Новинки отличаются улучшенными техническими характеристиками по сравнению с существующими фильтрами серий FME28-461, FMD28-461, FMC-461 и FMH-461, но соответствуют установленным размерам и функциям этих фильтров. В коде новых моделей первые две цифры указывают на номинальный проходной ток фильтра, а следующие цифры означают номинальное значение входного напряжения, например, фильтр FMCE-0828 имеет значение проходного тока 8 А и номинальное рабочее напряжение 28 В.

Конструкции новых фильтров отличаются двумя важными улучшениями по сравнению с существующими моделями: усовершенствованное управление отводом тепла и увеличенные допустимые проходные токи. Все четыре новые модели — FMCE-1528, FMCE-0828, FMCE-0528 и FMCE-0328 — имеют повышенное значение проходного тока, причем модель FMCE-0328 отличается 100%-ным повышением проходного тока по сравнению с FMH-461. Все значения проходных токов фильтров серии FMCE линейно понижаются от 100% значения при температуре +125 °С до 80% от номинального значения при температуре +135 °С. Даже при повышенных значениях проходного тока перегрев всех магнитных компонентов снижен по сравнению с существующими изделиями. Номинальные значения проходных токов ранее выпущенных фильтров и новых фильтров следующие:

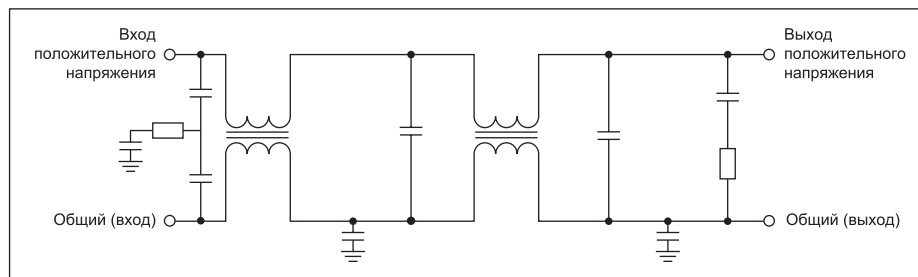


Рис. 9. Схема помехоподавляющего фильтра FMCE-0828 с демпфирующими элементами на выходе

- FMCE-1528 — до 15 А с улучшенным запасом по току (соответствует FME28-461);
- FMCE-0828 — до 8 А (соответствует модели FMD28-461 с проходным током 7 А);
- FMCE-0528 — до 5 А (соответствует модели FMC-461 с проходным током 2,7 А);
- FMCE-0328 — до 3 А (соответствует модели FMH-461 с проходным током 1,5 А).

Обеспечивается повышенная устойчивость системы «входной фильтр — преобразователь» при соединении с модулями DC/DC-преобразователей Crane Aerospace & Electronics. Высокие проходные токи фильтров FMCE-1528 и FMCE-0828 тщательно согласованы с дополнительными демпфирующими цепями на выходе для обеспечения соответствия нормам самого последнего требования CE102, устанавливающего ограничения по уровню кондуктивных помех в полосе частот 30 кГц – 10 МГц для проводов, по которым оборудование получает мощность от первичных источников электропитания. Фильтры FMCE-0528 и FMCE-0328 были разработаны таким образом, чтобы повысить устойчивость при использовании с несколькими преобразователями даже при наименьшем напряжении входной линии электропитания. Эта проблема обстоятельно рассмотрена в работе [14]. Подробно нормы и методики испытаний на электромагнитную совместимость изделий военного и аэрокосмического назначения, установленные стандартами серии MIL-STD-461, проанализированы в [15, 16]. Для соответствия требованиям стандарта MIL-STD-461 к уровню помех и восприимчивости к ним система питания должна обеспечивать

хорошее подавление помех звукового диапазона во всем спектре частот при тестировании на уровни восприимчивости к кондуктивным помехам по требованию CS101. Для этого используется дополнительное демпфирование в цепи фильтра, позволяющее уменьшить эффект усиления, неизбежно возникающий на частоте среза. Демпфирующие элементы, как правило, не оказывают влияния на рабочие характеристики фильтра в полосе низких и высоких частот, однако в полосе средних частот, где риск отказа системы наиболее высок, эти элементы играют определяющую роль. Демпфирующие элементы добавлены в схемы фильтров FMCE-1528 и FMCE-0828 (рис. 9). Более детально требования к испытанию оборудования по методу/требованию CS101 анализируются в работе [17].

Диаграммы зависимости выходного импеданса от частоты новых фильтров показывают точку резонанса и амплитуду, значительно улучшенные по сравнению с существующими фильтрами. Выходной импеданс измерялся на выходе при закороченных входных выводах. На рис. 10 приведены диаграммы зависимости выходного импеданса фильтра от частоты для фильтра FME28-461 и нового фильтра FMCE-1528.

### Управление рассеиванием тепла. Управление тепловыми режимами в силовых устройствах

Рассеивание тепла в модуле — вторая проблема, с которой должны бороться разработчики систем распределенного электропита-

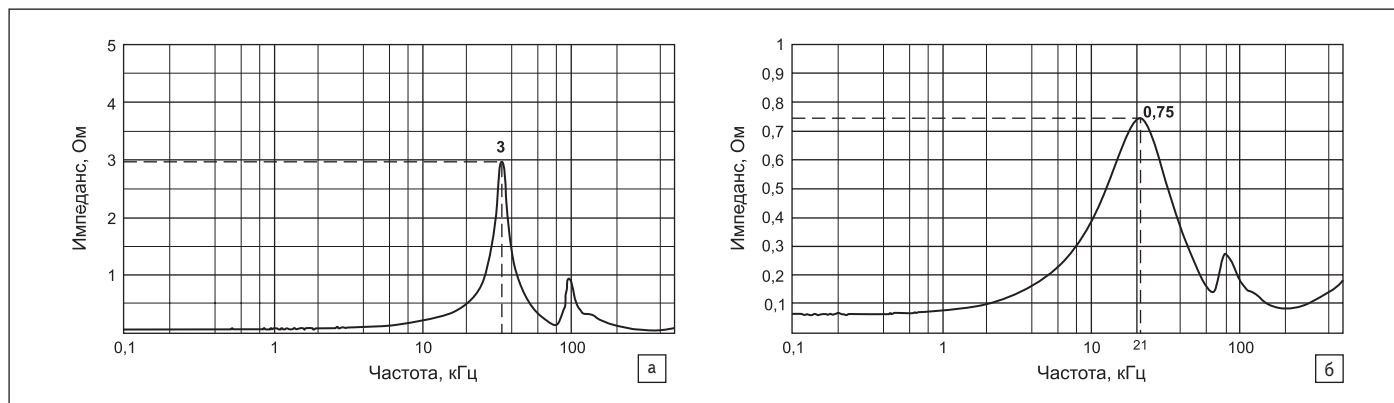


Рис. 10. Зависимость выходного импеданса фильтра от частоты: а) для ранее разработанного фильтра FME28-461; б) для нового фильтра FMCE-1528

ния. Так как DC/DC-преобразователь не имеет 100%-ного КПД, часть входной мощности выделяется в виде тепловой мощности в модуле и должна быть отведена, чтобы не допустить чрезмерных внутренних температур.

В конструкции большей части DC/DC-преобразователей выделяющие тепло компоненты размещаются в тесном контакте с металлической поверхностью, проводящей тепло, обычно это основание корпуса. Максимальная рабочая температура основания всегда указана в справочных листах и для большей части изделий коммерческого и промышленного класса может быть не ниже +70 °С, а для некоторых военных применений — и до +125 °С. Важно не превышать предельно допустимых значений (за исключением пределов снижения выходных номинальных параметров), поскольку внутренние температуры коммутирующих мощность компонентов будут существенно выше температуры корпуса. Когда компоненты подвергаются перегреву, функционирование может ухудшиться, надежность понизиться и ресурс компонентов сократится.

Для всех преобразователей необходимо предусмотреть тепловой канал, отводящий наружу рассеиваемую тепловую мощность. Для преобразователей с выходной мощностью более 5 Вт тепловой канал обычно включает конвекционный радиатор.

Первый шаг в проектировании теплоотвода или системы управления теплом — определение мощности, рассеиваемой в преобразователе (это не та же мощность, которая подается на нагрузку). Ее значение определяется вычитанием мощности, подаваемой на нагрузку, из суммарной мощности, подаваемой на вход преобразователя. Вся мощность, которая не передается в нагрузку, выделяется в виде тепла в преобразователе и должна контролироваться, а если необходимо — и отводиться. Значение этой мощности может быть вычислено следующим образом:

$$P_{diss} = (P_{out}/\text{КПД}) - P_{out}$$

Производители преобразователей предоставляют минимальные значения КПД в информационных листах изделия обычно для режима полной нагрузки. Более точные вычисления возможны с графиками, показывающими зависимость КПД от выходной мощности (нагрузки). Тем не менее, даже когда КПД уменьшается при снижении нагрузки, наихудший (наибольший) случай рассеивания, как правило, имеет место при полной нагрузке. Если известна рассеиваемая мощность  $P_{diss}$  можно использовать технические характеристики компонента, представленные в справочном листке производителя, и, следуя формулам, вычислить требования к теплоотводу для заданной выходной мощности и окружающей температуры, максимальную безопасную мощность для задан-

ного теплового сопротивления теплоотвода (на участке поверхность устройства – окружающая среда) и окружающей температуры. Необходимо отметить, что не все рекомендации по рассеиванию тепла могут быть точными в каждом случае. Всегда должны быть учтены особые условия применения.

Тепловое сопротивление радиатора  $Q_{SA}$  определяется следующим образом:

$$Q_{SA} = (T_C - T_A) / P_{diss}$$

где

$$T_C = T_{OP} - (T_{OP} - T_{fp}) (P_{diss} / P_{dmax})$$

и

$$P_{dmax} = (P_{outmax} / \text{КПД}) - P_{outmax}$$

где  $T_C$  — максимальная температура корпуса устройства;  $T_A$  — максимальная температура окружающей среды;  $P_{diss}$  — максимальная рассеиваемая в устройстве мощность;  $T_{OP}$  — температура, при которой устройство имеет мощность 0 Вт (максимальная граничная рабочая температура);  $T_{fp}$  — максимальная температура корпуса при полной расчетной мощности;  $P_{dmax}$  — максимальная допустимая рассеиваемая мощность при максимальной температуре корпуса или ниже  $T_{fp}$ ;  $P_{outmax}$  — максимальная расчетная выходная мощность устройства; КПД — минимальное значение КПД при максимальной выходной мощности;  $P_{out}$  — требуемая выходная мощность.

Формула для определения максимальной безопасной выходной мощности  $P_{out}$  имеет следующий вид:

$$P_{out} = P_{dt} \text{КПД} / (1 - \text{КПД}),$$

где

$$P_{dt} = P_{dmax} (T_{OP} - T_A) / (Q_{SA} P_{dmax} + (T_{OP} - T_{fp})),$$

где  $P_{dt}$  — максимальная безопасная рассеиваемая мощность в устройстве при температуре выше  $T_{fp}$ .

Возьмем, например, одноканальный модуль преобразователя напряжения серии MFW, преобразующий входное напряжение 28 В в выходное напряжение 12 В. Он рассчитан для работы с полной выходной мощностью (до 70 Вт) при температуре корпуса +85 °С, с понижением выходной мощности до нуля при температуре +125 °С. Минимальное значение КПД = 81%.

Для вычисления необходимого теплового сопротивления радиатора для максимальной выходной нагрузки при напряжении 12 В и токе 4 А при максимальной температуре окружающей среды +50 °С необходимо:

1. Вычислить рассеиваемую в модуле мощность:

$$P_{out} = (12 \text{ В})(4 \text{ А}) = 48 \text{ Вт},$$

$P_{diss} = (48/0,81) - 48 = 11 \text{ Вт}$  максимальная рассеиваемая в модуле мощность.

2. Определить максимальную допустимую рассеиваемую мощность при температуре +85 °С или ниже:

$$P_{dmax} = (70/0,81) - 70 = 16 \text{ Вт}.$$

3. Определить максимальную допустимую температуру корпуса:

$$T_C = 125 - (125 - 85)(11/16) = 98 \text{ °С}.$$

4. Вычислить  $Q_{SA}$ , требуемое тепловое сопротивление радиатора:

$$Q_{SA} = (98 - 50) / 11 = 4,4 \text{ °С/Вт}$$

или меньше.

В этом применении потребуется радиатор с тепловым сопротивлением 4,4 °С/Вт или менее. Тепловое сопротивление является параметром, характеризующим теплопередающие свойства радиатора, и показывает изменение температуры устройства при рассеивании на нем мощности в 1 Вт.

Для определения максимальной безопасной выходной мощности для радиатора с тепловым сопротивлением 3 °С/Вт при максимальной температуре окружающей среды +70 °С опять определяем по справочному листку модуля минимальное значение КПД (81%) и используем то же самое значение для  $P_{dmax}$  (16 Вт). Далее вычисляем максимальную безопасную рассеиваемую мощность в модуле:

1.  $P_{dt} = 16 (125 - 70) / (3(16) + (125 - 85)) = 10 \text{ Вт}$ .

2. Максимальная безопасная выходная мощность  $P_{out} = 10 (0,81) / (1 - 0,81) = 43 \text{ Вт}$ .

Доступно несколько вариантов выбора для реального радиатора. Во всех случаях необходимо обеспечить надежный тепловой контакт между радиатором и источником тепла для максимальной передачи теплоты. Когда основание платы является источником тепла, наилучшим образом работает П-образный теплоотвод, хотя радиаторы могут быть прикручены и непосредственно к монтажным фланцам. Кроме того, рекомендуется, чтобы между корпусом преобразователя и радиатором использовался электроизолирующий материал с хорошей теплопроводностью. Он будет заполнять неровности, уменьшая тепловое сопротивление на участке основание корпуса преобразователя — радиатор. В качестве дополнительного оборудования компания Crane Aerospace & Electronics предлагает теплопроводящие прокладки Thermal Mounting Pad (TMP). Прокладки вырублены в форме, соответствующей термодетальным поверхностям модулей преобразователей напряжения, и изготовлены из теплопроводящего материала Sil-Pad 2000 (производитель — компания Bergquist) на стекловолоконной основе, заполненной силиконовым каучуком, имеют удельную проводимость, среднюю между медью и воздухом, и почти в 100 раз лучше, чем воздух.

Материал поставляется в листах толщиной 0,254 мм. Прокладки используются для заполнения воздушных зазоров между теплоотводящей поверхностью преобразователя мощности и радиатором или другой поверхностью (например, металлическим элементом шасси). Теплопроводящие прокладки Sil-Pad 2000 характеризуются низким газовыделением, что позволяет применять их в космической аппаратуре. Теплопроводящая паста является другой альтернативой теплопроводящим прокладкам семейства Sil-Pad. Более подробно эластичные теплопроводящие прокладки и другие материалы, применяемые для обеспечения оптимальных тепловых режимов силовых полупроводниковых приборов, представлены в [18, 19]. В таблице приведены заказные номера теплопроводящих и электроизолирующих прокладок TMP и серии DC/DC-преобразователей компании Crane Aerospace & Electronics, с которыми их рекомендуется применять.

В качестве альтернативы импортным теплопроводящим материалам предлагаются российские керамико-полимерные теплопроводящие диэлектрические материалы НОМАКОН. Материалы изготавливаются на основе микропорошков высокоочищенной оксидной керамики или нитридной керамики, спеченной по уникальной технологии. Материалы не токсичны, не выделяют вредных веществ в процессе монтажа и эксплуатации.

В том случае, когда DC/DC-преобразователь будет подвергаться воздействию нагнетаемого или свободно перемещаемого воздуха, можно использовать конвекционный отвод для переноса тепла от корпуса преобразователя в окружающую атмосферу. Но предпочтительным методом отвода тепла для модулей Crane Aerospace & Electronics является кондуктивный теплоотвод, который осуществляется переносом тепла, рассеиваемого в модуле, только за счет теплопроводности к более холодному материалу через прямой контакт. Поскольку он не зависит от перемещения воздуха около устройства, применения, требующие герметичного корпуса, возможны, пока непрерывный путь с низким тепловым сопротивлением обеспечивает перенос тепла к поверхности корпуса. По поводу температурных параметров конкретных радиаторов в неподвижном и перемещающемся воздухе разработчик должен всегда обращаться к производителю радиатора.

Существуют также альтернативы стандартным радиаторам, при которых необходимо самостоятельно определять тепловые сопротивления. Для малых преобразователей (с мощностью ниже 10 Вт) большие поверхности металлизации печатной платы из теплопроводного материала под преобразователем могут служить для переноса выделяющейся тепловой энергии от поверхности устройства. Для более мощных преобразователей напряжения отводить тепло от устройства способна пластина, выполненная из материала с хорошей теплопроводностью и установленная под преобразователем. В идеале эта пластина должна быть расширена до края монтажной платы, где тепло затем может быть передано на боковую стенку корпуса конструкции аппаратуры. Примеры применений этих методов отвода теплоты для гибридно-пленочных преобразователей напряжения компании Crane Aerospace & Electronics подробно представлены в работе [20].

## Заключение

Построение систем распределения электропитания на основе модулей DC/DC-преобразователей предоставляет преимущества в массе, объеме и качестве электропитания для сложных электронных систем при питании от сетей постоянного напряжения. К тому же это предоставляет более эффективную общую методику для проектирования и модернизации электронной аппаратуры с требованиями к разнообразным напряжениям и мощностям, чем способны предложить централизованные источники напряжения. Проблемы с помехами и управление отводом тепла всегда должны решаться системными разработчиками, независимо от того, какой вид системы электропитания применяется. Отдельные виды проблем с помехами и отводом тепла, которые возникают в системах распре-

**Таблица.**

Перекрестная ссылка между DC/DC-преобразователями Crane Aerospace & Electronics и рекомендуемыми для совместного применения теплопроводящими прокладками TMP

Применение	Серия DC/DC-преобразователей	Тип корпуса	TMP1xx
Высоконадёжное	Двухканальные серии MFK (включая 28S)	G6	114
Высоконадёжное	Одноканальные серии MFK (за исключением S28)	G5	108
Высоконадёжное	MFL	U	101
Космическая аппаратура	MFP с выводами для монтажа в отверстия с монтажными фланцами	C5	111
Высоконадёжное	MFX	J7	109
Высоконадёжное	MHF+ одно- и двухканальные модели	G1	105
Высоконадёжное	MHF+ трехканальные модели	G2	105
Высоконадёжное	MHP270	U	101
Высоконадёжное	MHV одно- и двухканальные модели	K3	103
Высоконадёжное	MHV трехканальные модели	J1	102
Высоконадёжное	MOR	U2	101
Высоконадёжное	MOR	W, Y, Z	107
Высоконадёжное	MTR одно- и двухканальные модели	K5	103
Высоконадёжное	MTR трехканальные модели	J1	102
Высоконадёжное	MWR	J1	102
Космическая аппаратура	SMFL	U	101
Космическая аппаратура	SMFLHP	U	101
Космическая аппаратура	SMHF	G1	105
Космическая аппаратура	SMRT	S	110
Космическая аппаратура	SMTR	H2	103

ленного электропитания, могут быть, несомненно, решены даже разработчиками, не очень хорошо знакомыми с методом. А ответственные производители качественных силовых изделий, поддерживающие распределение электропитания, предлагают детальные услуги по поддержке применений, которые могут эффективно содействовать в решении проблем при разработке.

## Литература

1. Questad P. Designing with a Distributed Power Architecture. Crane Aerospace & Electronics Power Solutions. [www.interpoint.com/product\\_documents/DC\\_DC\\_Converters\\_Designing\\_with\\_a\\_Distributed.pdf](http://www.interpoint.com/product_documents/DC_DC_Converters_Designing_with_a_Distributed.pdf)
2. Волокитина Е. В., Головинин С. Б. Полностью электрифицированный самолет — от концепции до реализации // Электроника и электрооборудование транспорта. 2007. № 1.
3. Заика П. Н., Исаев В. М., Колосов В. А., Майоров С. И., Орлов В. А., Чекалин В. Б. Совершенствование систем вторичного электропитания ответственных объектов // Электропитание. 2009. № 1.
4. Козенков Д. Выбор архитектуры источника питания // Электронные компоненты. 2004. № 6.
5. Чанов Л. Микросхемы силовой электроники // Электронные компоненты. 2006. № 6.
6. Марчетти Р. Архитектуры распределенного электропитания // Электронные компоненты. 2011. № 2.
7. Лукин А. В. Новые направления развития преобразователей напряжения // Электропитание. 2011. № 2.
8. Дмитриков В. Ф., Исаев В. М., Колосов В. А., Смольников Л. Е. Основные пути развития принципов построения современных систем электропитания промышленного и специального назначения // Электропитание. 2009. № 3.
9. Колосов В. А., Либенко Ю. Н. Вопросы организации СВЭП, влияющие на создание силовых электронных модулей // Электропитание. 2010. № 1.
10. Макаренко А. Н., Смоляр А. П. Централизованно-распределенная система электропитания корабля // Электропитание. 2010. № 2.
11. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Устойчивость систем электропитания // Электропитание. 2012. № 2.
12. Жданкин В. К. Подавление электромагнитных помех во входных цепях преобразователей постоянного напряжения // Компоненты и технологии. 2016. № 11.
13. Жданкин В. К. Измерение и фильтрация помех на выходе DC/DC-преобразователей. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2017. № 2.
14. Жданкин В. К. Измерение и фильтрация помех на выходе DC/DC-преобразователей. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2017. № 3.



15. Петит Г. Что нужно знать об испытаниях на выполнение требований ЭМС для изделий военного и аэрокосмического назначения // Компоненты и технологии. 2017. № 8.
16. Смирнов А., Басалаев К. Развитие требований к характеристикам электромагнитной совместимости общепромышленной и оборонной продукции и современные технические средства для их оценки // Компоненты и технологии. 2015. № 2.
17. Ситон К., Лесли Л. Применение фильтров ЭМП, отвечающих требованию стандарта MIL-STD-461D-F // Электронные компоненты. 2014. № 7.
18. Коснырев В. Теплопроводные материалы компании Bergquist // Силовая электроника. 2008. № 2.
19. Исламгазина Л. Применение различных материалов, обеспечивающих оптимальные тепловые режимы силовых полупроводниковых приборов, в том числе модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. 2005. № 3.
20. Жданкин В. К. Обеспечение оптимальных тепловых режимов гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей // Компоненты и технологии. 2016. № 7.