

Преимущества бескорпусных преобразователей постоянного тока

Виктор Жданкин

Введение

Обычно для обеспечения механической прочности и защиты от климатических воздействий модули электропитания постоянного тока (DC/DC конвертеры) малой и средней мощности в процессе изготовления подвергаются корпусированию, а для обеспечения оптимального теплового режима функциональных элементов и устройства в целом корпуса герметизируются компаундом.

В настоящее время фирма Artesyn Technologies разработала и предлагает ряд изделий в бескорпусном исполнении, которые имеют ряд преимуществ перед традиционными корпусированными изделиями подобного класса. Естественно, такой нетрадиционный подход к конструированию конверторных модулей вызывает некоторые опасения у потребителей. Целью этой статьи является освещение некоторых результатов исследований, полученных в процессе разработки модулей электропитания серий СХА10 и ЕХА40.

Корпусированные DC/DC конвертеры

Для обеспечения устойчивости конвертеров к неблагоприятным воздействиям окружающей среды, таким как влажность, вибрация, удары, высокие температуры, электромагнитные поля и т. д., огромное внимание уделяется правильной разработке конструкции.

Корпусированные преобразователи имеют несколько вариантов конструктивного оформления, но в основном они могут быть разделены на два вида: герметизированные и негерметизированные. Корпусированные герметизированные модули обычно имеют корпус в виде прямоугольного параллелепипеда, заполняемый во время производства жидким компаундом, который впоследствии затвердевает. В некоторых случаях герметизация осуществляется легковскрываемым паяным швом и последующим заполнением сухим азотом под избыточным давлением. Конструкция может быть выполнена из пластмассы, металла или быть комбинацией обоих материалов. Часто материал печатной платы модуля образует одну из шести сторон конструкции.

Корпусированные негерметизированные модули также имеют прямоугольную форму (с тем или иным коэффициентом планарности), но при производстве не применяется компаунд. Металлический или пластмассовый корпус в этом случае может иметь вентиляционные отверстия или щели.

Конверторные модули корпусируются по нескольким причинам. Вот некоторые из наиболее очевидных.

Механическая прочность. Низкий уровень производственного процесса: незакрепленные проводники трансформаторов, выполненных с применением кольцевых (тороидальных) магнитопроводов, ручная пайка соединений и небрежно установленные компоненты требуют применения компаунда для надежной фиксации компонентов. Применение компаунда, в свою очередь, требует применения оболочки для его надежного сохранения.

Косметические. Опять же результаты низкого уровня технологического процесса и изъяны конструкции должны быть тщательно скрыты под оболочкой для того, чтобы сделать изделие более презентабельным.

Соответствие стандартам безопасности. Довольно часто значения путей утечек по поверхности и электрические зазоры, требуемые стандартами безопасности, в изолирующих преобразователях достигаются благодаря применению компаунда.

Тепловые. В большинстве случаев компаунд применяется для отвода тепла с рассеивающих тепло компонентов и переноса тепла в окружающую среду. Процесс переноса через компаунд имеет негативные последствия: нагреваются и все другие компоненты модуля.

Борьба с электромагнитными помехами. Существует общее неправильное представление о том, что электрически герметичный металлический экран значительно ослабляет электромагнитные поля помех. Теоретически это верно, но фактически эффект экранирования может быть незначительным, а в некоторых случаях применение экрана может даже ухудшать эксплуатационные параметры модуля.

Бескорпусные DC/DC конвертеры

Современные методы конструирования, в частности, использование техники поверхностного монтажа компонентов, позволяют создавать бескорпусные преобразователи постоянного напряжения. Основным элементом конструкции бескорпусного преобразователя является подложка (печатная плата) без применения компаунда и кожуха.

На рис. 1 показан внешний вид бескорпусного 40 Вт преобразователя с высоким кпд, который производится фирмой Artesyn Technologies.

На рис. 2 показан внешний вид бескорпусного 10 Вт преобразователя.

Оба преобразователя смонтированы с применением техники поверхностного монтажа компонентов на высо-

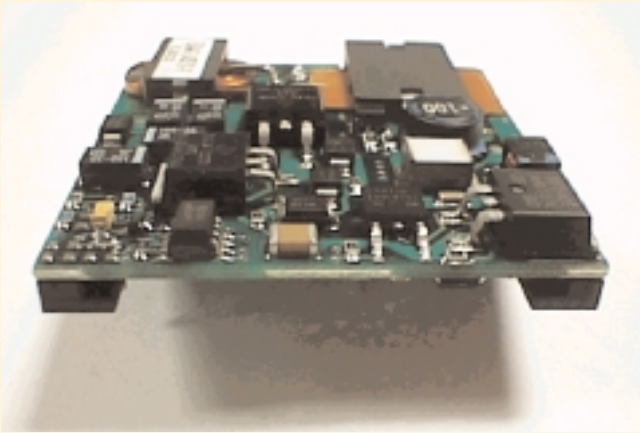


Рис. 1. Внешний вид бескорпусного преобразователя серии EHA40 с выходной мощностью 40 Вт. Габаритные размеры 55,88x45,72x8,89 мм



Рис. 2. Внешний вид бескорпусного преобразователя серии SXA10 с выходной мощностью 10 Вт. Габаритные размеры преобразователя 50,80x25,4x10 мм

к скоростному автоматизированному оборудованию. Размещение электронных компонентов на обеих сторонах печатной платы приводит к уменьшению размеров печатной платы, уменьшению длины проводников, т. е. в результате получается достаточно компактная конструкция.

Бескорпусное исполнение преобразователей постоянного напряжения имеет несколько существенных преимуществ над аналогичными изделиями в корпусном исполнении.

Стоимость

Существует значительная разница в стоимости между корпусированными и бескорпусными преобразователями. Помимо очевидных расходов на материал самого корпуса и компаунд, существуют расходы, связанные с технологическим процессом производства корпусированных моду-

лей. Расходы на техпроцесс при производстве корпусированных преобразователей значительно больше, чем просто расходы на материалы, и включают в себя следующие составляющие:

- непосредственные затраты, связанные с установкой корпуса и использованием компаунда;
- расходы, связанные со значительными потерями времени на отверждение компаунда;
- капитальные затраты на оборудование для герметизации и печи для сушки;
- стоимость забракованных изделий из-за более низкого процента выхода годных;
- после операций по корпусированию изделия необходимо подвергнуть повторному тестированию, а это является дополнительной технологической операцией, которая также увеличивает стоимость.

Надежность

Конструирование преобразователей напряжения открытого (бескорпусного) типа стало возможным, благодаря подбору компонентов, которые могут быть установлены в посадочные места автоматически. Применение автоматизированного оборудования по сборке, пайке, испытаниям позволяет исключить дефекты, вносимые в изделия при ручной сборке, и увеличить процент выхода годных за счет простоты ремонта и замены неправильно ориентированных компонентов.

Таким образом, бескорпусные преобразователи являются более надежными вследствие высокого уровня техпроцесса и его качества, так как по статистике примерно 30% отказов происходит в результате ошибок и нарушений в процессе производства.

Ранее было отмечено, что зачастую преобразователи постоянного напряжения герметизируются, для того чтобы фиксировать вместе электронные компоненты. Некоторые компаунды имеют температурный коэффициент расширения более чем $250 \text{ млн}^{-1}/^\circ\text{C}$, и это приводит к довольно сильным механическим напряжениям электронных компонентов, что, в свою очередь, приводит к снижению надежности.

Обеспечение тепловых режимов преобразователей и их элементов

Источники питания, как правило, являются наиболее теплонапряженной частью электронной аппаратуры, поэтому при их разработке уделяется большое внимание их тепловым параметрам. Конструирование бескорпусных преобразователей требует более основательных конструкторских затрат, т. к. отсутствует эффект отвода тепла компаундом. При конструировании бескорпусных преобразователей исследовалась температура всех элементов при различных сочетаниях скорости воздушного потока и температуры окружающего воздуха для того, чтобы снизить перегревы наиболее критичных элементов и тем самым снизить интенсивность отказов.

Полезной стороной отсутствия компаунда в бескорпусных преобразователях является то, что нормально охлаждаемые компоненты не нагреваются теплом, переносимым компаундом. Результатом является существенное увеличение надежности таких компонентов, как оптопары. Часто предполагалось, что изотермиче-

ская конструкция является наилучшим из возможных решений для преобразователей постоянного напряжения: нагретые зоны и процессы переноса теплоты в них рассматриваются так, как если бы они протекали между изотермическими поверхностями. Это не совсем верно. Современные полупроводниковые компоненты имеют максимальную температуру р-n перехода 150°C и даже 175°C. Большая часть оптопар имеет максимальную рабочую температуру около 100°C, тогда как некоторые типы конденсаторов могут быть применены только при температуре до 105°C. Даже с 30% ограничением допустимых значений температуры полупроводниковых переходов нагрев силовых компонентов значительно сократит срок службы других менее стойких к нагреву элементов.

Наиболее существенными для обеспечения нормального температурного режима полупроводниковых приборов являются перенос теплоты от источника тепла посредством применения местных теплоотводов и оптимальная компоновка печатной платы. На

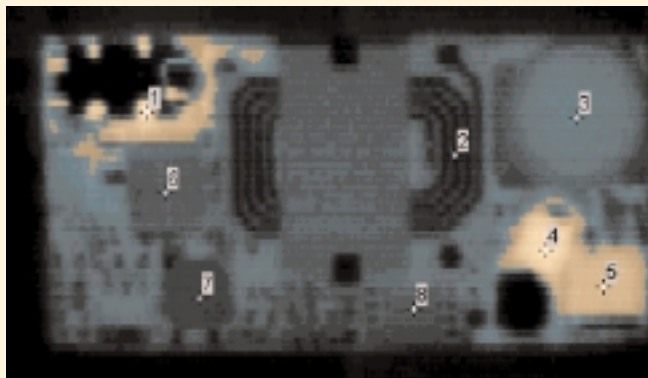


Рис. 3. Инфракрасное изображение 10 Вт преобразователя открытого типа

рис. 3 показана тепловая диаграмма 10 Вт преобразователя СХА10 с местным теплоотводом. Измерены температуры поверхностей основного силового ключа, оптопары обратной связи и пленочного конденсатора. В таблице 1 приведены результаты измерения, а также номинальные (паспортные) и максимально допустимые значения температур. Видно, что даже несмотря на то, что полупроводниковые компоненты нагреты сильнее, чем другие компоненты, они тем не менее имеют хороший запас по допустимым значениям. Чувствительные к нагреву компоненты, такие как оптопара, существенно не нагреваются основными источни-

Таблица 1. Температура основных компонентов

N точки	Температура (°C)	Паспортное значение (°C)	Запас (%)	Элемент
1	74,5	150	50,3	МДП транзистор
2	44,0	130	66	Печатная плата
3	57,5	110	47,7	Индуктивность
4	73,6	150	50,9	Диод
5	66,7	150	55	Диод
6	51,8	110	52,9	Пленочный конденсатор
7	48,9	105	53,4	Индуктивность
8	52,5	105	50	Оптопара

ками тепла. Данные были получены при окружающей температуре 35°C.

Одним из достоинств бескорпусных изделий является большая площадь поверхности, чем у шестистороннего корпуса. Большая площадь поверхности улучшает тепловую проводимость и параметры конвекции окружающего воздуха. Далее положение улучшается, благодаря турбулентности воздушного потока, возникающего из-за различия в профилях компонентов. Другим дополнительным фактором, улучшающим охлаждение, является уменьшение тепловой тени в кильватере воздушного потока над изделием, которая может быть причиной местных перегревов на краю печатной платы. На рис. 4 показаны результаты влияния тепловой тени корпусированной конструкции с размерами 50,8 мм×25,4 мм, а на рис. 5 — бескорпусной конструкции с

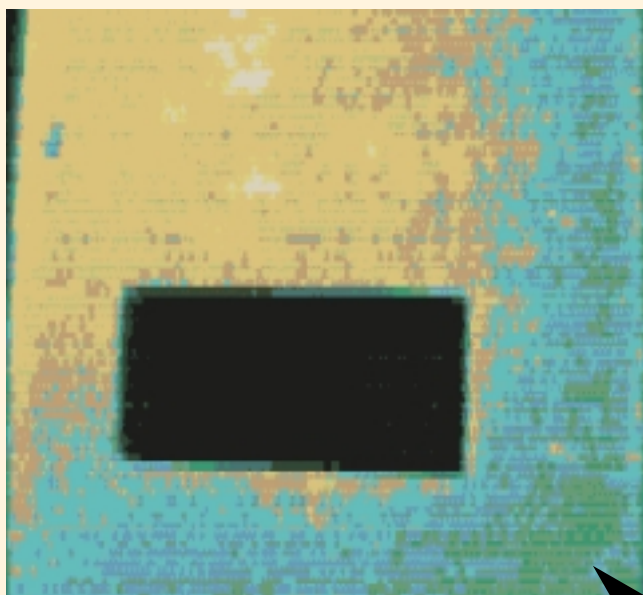


Рис. 4. Инфракрасное изображение тепловой тени в кильватере корпусированного модуля

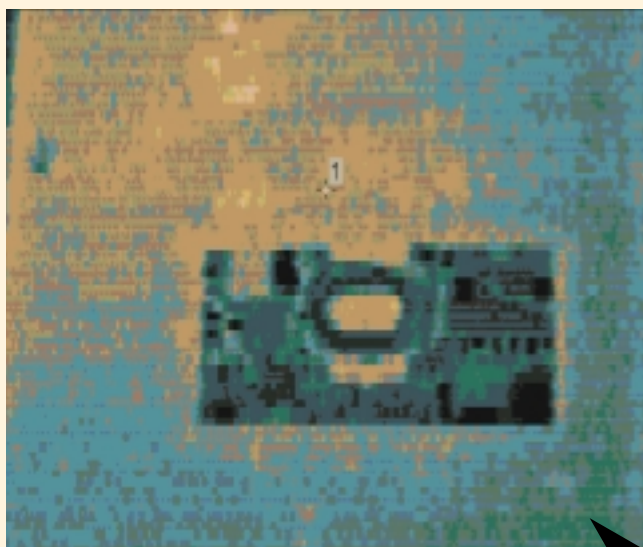


Рис. 5. Инфракрасное изображение тепловой тени в кильватере модуля открытого типа

теми же размерами. Температура поверхности в кильватере конструкции открытого типа приблизительно на 6°С ниже, чем в кильватере корпусированной конструкции. В обоих случаях зоны с более высокими температурами представлены более светлыми цветами. Направление воздушного потока показано черной стрелкой.

Производственный процесс

Ранее уже было сказано, что производство бескорпусных преобразователей значительно проще, чем производство корпусированных. Любое упрощение технологического процесса может уменьшить расходы и увеличить надежность.

Процесс производства бескорпусных конструкций легче подвергается автоматизации, чем техпроцесс корпусированных модулей. Автоматизация значительно увеличивает надежность и повторяемость, одновременно сокращая стоимость. Существующий технологический процесс герметизации с применением компаунда трудно поддается автоматизации. Этот процесс к тому же требует тщательного контроля и непрерывного отслеживания с применением статистических методов контроля, так как он подвержен изменениям. Это вынуждает изготовителей испытывать модули дважды для того, чтобы обеспечить их надежность.

Как правило, ферритовые катушки крепятся с применением сильных клейких веществ. Технология приклеивания требует стадии отверждения при повышенных температурах с усилием, приложенным к ферриту. В то время как это является приемлемым для дискретных магнитных компонентов, данный способ крепления неприемлем в конструкциях, где используются плоскостные и конструктивно объединенные магнитные компоненты. Приклеивание является отличным способом крепления сердечника, но требуемая стадия отверждения создает остановки в производственном процессе, поэтому возникают дополнительные затраты.

Применение зажимной скобы при установке ферритовых компонентов является наиболее привлекательным вариантом. Artesyn Technologies провела обширную программу испытаний на надежность, чтобы подтвердить качество фиксации при помощи зажимной скобы. Был проведен поэлементный анализ для того, чтобы подтвердить срок службы зажимной скобы при воздействии ожидаемых тепловых и магнитоstrictionных воздействий в течение всего срока службы изделий. Результаты исследований показали, что зажимные скобы не имеют следов усталости металла.

При тестировании модулей открытого типа на ударные воздействия в соответствии с процедурами, предусмотренными IEC68-2-27 тест Ea (2,5 g согласно ETSI 300-019-1) и MIL-STD-202 Метод 213 (50 g) подтвердили, что зажимные скобы не смещаются при неблагоприятных условиях во время перевозки и эксплуатации. Таким же образом были проведены вибрационные испытания в соответствии с IEC 68-2-6 тест Fc (2 g, 5 Гц до 200 Гц, согласно ETSI 300-019-2) и MIL-STD-202 Метод 204 Условие А (10 g, 5 Гц до 500 Гц).

До настоящего времени не выявлено зажимных скоб, которые были бы повреждены во время обширных ис-

пытаний в условиях, значительно более жестких, чем те, которые придется выдерживать изделиям в действительности.

Встраивание конверторов открытого типа в конструктивы потребителей

Изделия в бескорпусном исполнении приблизительно на 30... 40% легче, чем аналогичные корпусированные изделия. Это предоставляет существенные преимущества потребителю, с точки зрения деформаций и механических напряжений платы, вызываемых вибрациями законченной системы, массы законченной системы и надежности несущей печатной платы.

Бескорпусные изделия Artesyn были всесторонне исследованы, для того чтобы гарантировать совместимость со всеми обычными технологическими операциями по сборке плат. Все механически закрепленные выводы были подвергнуты испытаниям в соответствии с процедурами стандарта «Устойчивость к пайке теплом MIL-STD-202. Метод 1010 для пайки паяльником и пайкой волной припоя».

Обычные корпусированные модули не рекомендуются подвергать воздействию потоком воды, так как процесс герметизации не гарантирует идеальной структуры компаунда, в результате чего появляются воздушные пузырьки или зоны, которые могут удерживать воду, что в конечном счете может привести к отказу модуля. Бескорпусные же преобразователи фирмы Artesyn Technologies, как бы это ни казалось на первый взгляд удивительным, могут функционировать в условиях 100% влажности.

Электромагнитные помехи

Одним из способов снижения радиопомех, генерируемых преобразователями постоянного напряжения, является экранирование. Необходимость экранирования рассматривается только после того, как полностью исчерпаны конструкторские методы оптимальной компоновки изделий.

С точки зрения излучаемых электромагнитных помех (ЭМП), эффективность экранирования тонколистовым материалом является весьма сомнительной, так как близкое размещение источника помех к экрану (ближняя зона) является типичным для традиционных корпусированных преобразователей. Результаты испытаний, проведенных независимой компанией для Artesyn Technologies, воспроизводятся в таблицах 2-4, которые показывают измеренные ЭМП для 10 Вт преобразователя, смонтированного на печатной плате при трех условиях (рис. 6а).

По результатам таблицы 4 можно сделать вывод, что экран не помогает и фактически добавляет несколько новых максимумов на частотах 130 МГц и 140 МГц. Это может

Таблица 2. Уровень помех без заземленной металлизированной поверхности и экрана

Частота (МГц)	Измеренные электромагнитные излучения (дБмкВ/м)
36,27	35,50
87,51	37,20
116,47	23,50
176,28	29,43

Таблица 3. Уровень помех с заземленной металлизированной поверхностью и без экрана

Частота (МГц)	Измеренные электромагнитные излучения (дБмкВ/м)
32,47	22,00
37,41	22,70
77,35	25,40
179,92	20,30

Таблица 4. Уровень помех с заземленной металлизированной поверхностью и медным экраном

Частота (МГц)	Измеренные электромагнитные излучения (дБмкВ/м)
32,47	19,00
77,35	25,40
110,80	19,00
143,33	24,55

быть объяснено многократными отражениями, совпадающими по фазе, в пределах экрана.

В данном случае медный экран имел толщину 0,1 мм и был полностью запаян по всем краям (электрически герметичный экран). Толщина 0,1 мм является типичной для экранов модулей преобразователей. Отражательная возможность такого экрана может быть рассчитана после определения расположения экрана в ближней или дальней зонах распространения электромагнитной энергии. Если экран расположен ближе, чем $\lambda/6$ к источнику излучения, можно считать, что он находится в ближней зоне. На частоте 100 МГц граница ближней зоны находится на расстоянии 0,5 м от источника электромагнитных помех и поэтому экран для модулей преобразователей постоянного напряжения может считаться расположенным в ближней зоне. Эффективность экранирования разительно уменьшается с приближением к источнику излучения (рис. 66). Другими словами, эффективность экрана, расположенного в ближней зоне, является сомнительной. Наиболее эффективным методом ослабления электромагнитных помех являются грамотная схемотехническая разработка и оптимальная компоновка изделия. Опыт, приобретенный при разработке и производстве бескорпусных сетевых блоков питания с высокочастотными преобразователями, может быть с успехом применен при разработке преобразователей постоянного напряжения.

Нормы безопасности

Бескорпусные преобразователи фирмы Artesyn Technologies спроектированы и испытаны в соответствии с требованиями стандартов EN60950, UL1950 и CSA22.2-234/950 без необходимости корпусирования. В этой связи можно сделать интересное замечание: большинство преобразователей переменного напряжения выполнены в бескорпусном варианте (имеют конструкцию открытого типа).

Для типичного преобразователя постоянного напряжения с номинальным значением входного напряжения 48 В и диапазоном отклонений входного напряжения 36-75 В

указанные стандарты требуют значений пути утечки по поверхности 1,4 мм и воздушного зазора 0,7 мм. Наличие металлического корпуса или экрана означает, что он должен либо никуда не подключаться, либо подключаться к шине входной или выходной земли.

В любой конфигурации должны быть сохранены путь утечки по поверхности и зазор между первичной и вторичной частями. Это достигается либо применением изоляции на внутренней стороне металлической крышки, что увеличивает стоимость и сложность, а также требует сертификации, либо сохранением путей утечек и зазоров, которые требуют дополнительного пространства печатной платы и увеличивают габариты.

В некоторых более ранних конструкциях компаунд использовался в качестве клея для крепления тороидальных

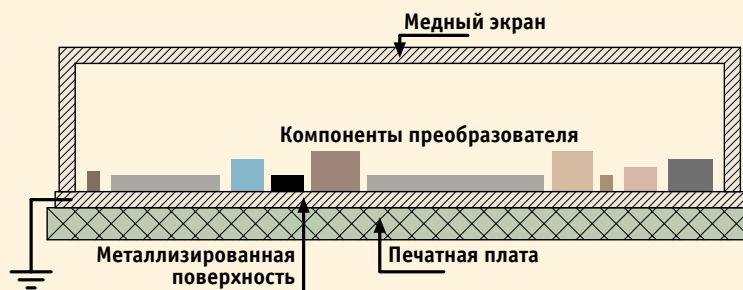


Рис. 6а. Иллюстрация к измерению электромагнитных помех испускаемых DC/DC конвертером

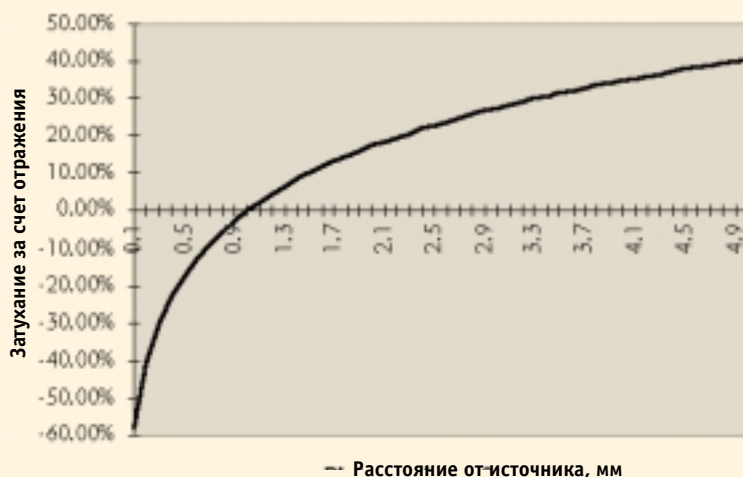


Рис. 6б. Зависимость эффективности медного экрана от расстояния до источника излучения

трансформаторов на одной половине печатной платы и обеспечения изоляции. Эта практика является сомнительной и наиболее опасной.

Электрические характеристики

Герметизация, как это известно, влияет на некоторые характеристики преобразователей, такие как пульсации выходного напряжения и коэффициент полезного действия. В ранних конструкциях изменение характеристик происходило из-за смещения подводящих проводников

тороидальных трансформаторов и дросселей относительно чувствительных компонентов схемы. В новейших разработках причиной подобных изменений является увеличение зазоров ферритовых сердечников Е-типа в результате воздействия растягивающих сил во время процесса герметизации.

Это приводит к необходимости производить вторичное испытание после того, как устройство было загерметизировано. В случае обнаружения каких-либо отказов на этой стадии технологического процесса изделия обычно отбраковываются, так как они не могут быть отремонтированы. Анализ этих отказов к тому же затруднителен и требует много времени. Несмотря на то, что доля брака здесь обычно небольшая, она вносит вклад в общую стоимость отгруженных изделий.

Это также справедливо при анализе причин отказов возвращенных изделий. Процесс разгерметизации весьма утомителен и требует много времени, к тому же, при этом изделие может быть испорчено.

Давление, прикладываемое во время герметизации, как известно, повреждает чувствительные компоненты, такие как стеклянные диоды и некоторые типы конденсаторов. Это приводит к изменению электрических характеристик компонентов. Наиболее эффективным методом, позволяющим избежать этого, является предварительное покрытие чувствительных компонентов силиконом, который в дальнейшем выполняет роль демпфера.

Косметические соображения

Корпусирование модулей зачастую производилось для того, чтобы обеспечить фиксацию компонентов и скрыть плохую сборку от заказчика.

Artesyn Technologies всегда максимально полно использовала возможности и достижения микроэлектроники с целью существенного уменьшения массы и объема изделий, снижения тепловых потерь, увеличения ресурса работы, минимизации эксплуатационных расходов. Одним из современных направлений является технология поверхностного монтажа компонентов. Широкая доступность в настоящее время компонентов для поверхностного монтажа по умеренным ценам позволяет конструировать и производить высококачественные преобразователи постоянного напряжения бескорпусного типа.

Вопросы охраны окружающей среды

Вопросам охраны окружающей среды сейчас уделяется огромное внимание, так как это касается каждого из живущих на нашей планете.

И в этом бескорпусные преобразователи имеют некоторые достоинства: отсутствуют затраты на сырье для компаундов и корпусов, уменьшение массы изделий ведет к сокращению транспортных расходов и т. д.

В конце срока службы изделия могут легко демонтироваться для повторного использования. Например, пластиковые стойки, входные и выходные штыри, хомуты маг-

Таблица 5. Основные характеристики бескорпусных DC/DC конвертеров фирмы Artesyn Technologies

Температура окружающей среды (в рабочем режиме), °С	-40...+70
Температура хранения, °С	-55...+105
Относительная влажность (с конденсацией влаги), %	10...100
Вибрация	2...9 Гц, смещение 3 мм 9...200 Гц 1 g
Удар	MIL-STD-202F Метод 213В усл. А
Коэффициент полезного действия, %	78...83 (для СХА10) 84...91 (для ЕХА40)
Параметры гальванической развязки, В (постоянного тока) между входом и выходом	1500
Рабочая частота, кГц	300 (ЕХА40), 400 (СХА10)
Вес, г	25 (ЕХА40), 12 (СХА10)
Среднее значение времени наработки на отказ, час, рассчитанное по MIL-HDBK-217F	250 000 (ЕХА40) 456 621 (СХА10)
Предельные значения отклонения напряжения питающей сети, В	36...37 (СХА10) 18...36 (ЕХА40) 36...75
Номинальные значения выходного питающего напряжения, В	3,3; 5; 12; ±5; ±12 (СХА10) 1,8; 2,75; 3,3; 5 (ЕХА40)

нитных компонентов и ферритовые материалы могут быть легко удалены и повторно использованы. Все пластмассовые компоненты, используемые в бескорпусных изделиях фирмы Artesyn, промаркированы цифровым кодом, что позволяет их идентифицировать при демонтаже изделия и утилизации.

Отсутствие компаундов, которые, как правило, используют силикон, означает, что изделия могут быть легко утилизированы в различных мусоросжигательных печах.

И, наконец, необходимо отметить, что компаунды, используемые для герметизации, нужно тщательно контролировать при хранении и в процессе герметизации, для того чтобы гарантировать безопасные уровни выделяемых газов.

Выводы

Бескорпусные преобразователи становятся объективной реальностью. Их преимущества в стоимости, надежности, трудоемкости изготовления, энергетических показателях, удобстве конструкции постепенно преодолевают консерватизм потребителей. Для примера в таблице 5 приведены основные характеристики упоминавшихся в данной статье преобразователей ЕХА40 и СХА10, производимых фирмой Artesyn Technologies. Достигнутые параметры говорят сами за себя. ●