Силовые модули выбирают сварку ультразвуком

Вадим Дроздов, технический специалист по силовой электронике компании «ПетроИнТрейд» (перевод)
vadim.drozdov@petrointrade.ru

Современное построение силовых модулей направлено на достижение более высокой плотности мощности и расширение диапазона рабочих температур. Для этого необходима устойчивая и весьма надежная технология контактных соединений. Многообещающим решением является ультразвуковая сварка металлов, которая недавно была применена компанией Infineon в конструкциях новых силовых модулей, таких как PrimePACK™ и EconoPACK™4. В этой статье мы рассматриваем проблемы электрической и термической эффективности, а также надежности, в сравнении с общепринятыми методами пайки проволочных соединений припоем. Такие эксперименты, как испытания на тепловой удар и вибрационную нагрузку, оценены с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и измерения контактного сопротивления, а также числовыми расчетами с целью подтверждения технологических преимуществ, присущих указанным модулям. Статья демонстрирует, что в результате применения ультразвуковой сварки срок службы силовых модулей теперь не ограничивается надежностью контактных соединений.

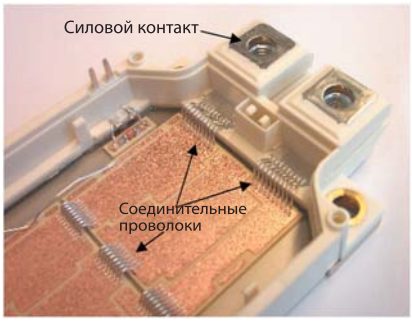

Рис. 2. Термокомпрессионные проволочные соединения между двумя токопроводящими слоями подложки (непосредственное соединение медных проводов) и от подложки к силовому выводу

Постоянное стремление к компактности и повышению тока нагрузки заставляет инженеров искать новые методы создания внутренних электрических соединений. Другой задачей в проектировании современных силовых модулей является расширение рабочих температур без сокращения срока службы.

Первое промышленное решение обеспечения соединений, рассчитанных на большие токи в модулях, базировалось на технологии прижимных контактов. Так, тиристорные и диодные диски (соединяются только за счет внешнего механического прижима. Внешнее крепление миниатюризировано и встроено в корпус модуля. С учетом сравнения соединительных технологий, упомянутых выше, с точки зрения массового производства и экономичности прижимные контакты далее в данной статье не рассматриваются.

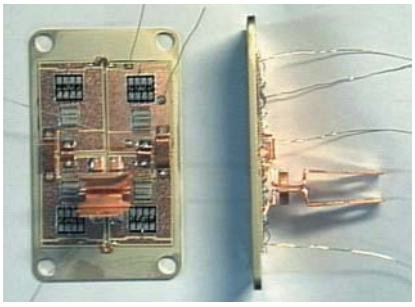

Рис. 1. Внутренняя конструкция одиночного коммутационного модуля 62 мм, изготовленного в 1998 году. Все соединения выполнены пайкой мягким припоем

Наиболее часто используемая технология — пайка мягким припоем, которая является одним из первых изобретений человечества в области соединений металла. Она использовалась с 5000 г. до н. э. до недавних технологических усовершенствований в части пайки без использования свинца. Для силовых модулей пайка мягким припоем и связанные с этим процессы постоянно совершенствовались, начиная, приблизительно, с 1975 года. Хорошо известным представителем этой до настоящего времени передовой технологии сборки является стандартный промышленный модуль 62 мм (рис. 1). Силовые и вспомогательные выводы, а также внутренние соединения выполнены пайкой мягким припоем.

В 1962 г. ультразвуковая энергия была использована основателями компании Orthodyne Electronic для термокомпрессионного формирования внутренних соединений с помощью проволочных перемычек. С тех пор такой метод широко используется для обеспечения контакта между кремниевыми кристаллами и силовыми выводами. Аналогично пайке мягким припоем, термокомпрессионное соединение требует дополнительных материалов (например, припоя или проволоки), через которые ток проходит к силовому соединению, ведущему к внешней поверхности корпуса. Одним из представителей такого технического решения является силовой модуль EconoDUAL™3 (рис. 2).

В погоне за увеличением плотности мощности кремниевых кристаллов в сочетании с увеличивающейся рабочей температурой соединений (T_{VJOP})

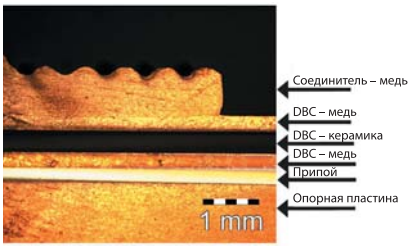

Рис. 3. Поперечное сечение контакта, сваренного ультразвуком

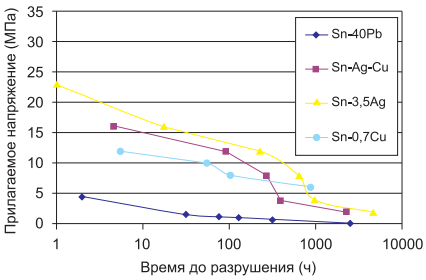

Рис. 4. Данные о текучести/разрушении для некоторых сплавов, не содержащих свинца, в сравнении с Sn-40Pb при 100 °C

инженеры вынуждены искать другие технологии соединений. В первую очередь, на пути к достижению большей плотности мощности должны быть сняты ограничения срока службы силовых контактов. Чтобы достичь этого, необходима эффективная и весьма надежная технология соединения силовых контактов. Одной из них является ультразвуковая сварка металлов.

Физические свойства

Соединение веществ

Контактирующие элементы при ультразвуковой (УЗ) сварке должны быть расположены близко друг к другу, при этом один из них должен быть жестко закреплен. Затем сварочный инструмент индуцирует ультразвуковую энергию и обеспечивает давление на подвижный соединяемый элемент. Результирующее относительное движение двух поверхностей приводит к удалению неровностей и окисных пленок. Поверхности кристаллов приводятся на атомарное расстояние по отношению друг к другу, что обеспечивает сильное притяжение атомов через границу раздела и создает надежную гальваническую связь без достижения температуры плавления соединяемых металлов. Не требуется никаких расходных материалов, таких как припой или соединительные провода. Не требуются даже покрытия или дополнительная очистка, поэтому УЗ-сварка непокрытых медных контактов является наиболее экологически благоприятной технологией соединений.

Сама технология известна с 1952 г. и широко используется для сращивания проводов в монтажных жгутах автомобиля, пружинных контактах реле, множестве других устройств и, не в последнюю очередь, для проволочных соединений.

При ультразвуковой сварке двух идентичных элементов, например из неокисленной меди с высокой электропроводимостью, получается устойчивая гальваническая связь с максимально возможной проводимостью соединения. Поскольку оба элемента имеют одинаковый коэффициент теплового расширения (КТР), расслоения самого соединения не происходит (рис. 3).

Преимущество при высоких рабочих температурах

Одним из ключевых параметров эффективности работы для оценки технологии соединений является приемлемый диапазон температур. Потребность в увеличении температур заставляет нас сфокусировать внимание на верхнем температурном пределе. Для того чтобы обсудить преимущества медных контактов, соединенных УЗ-сваркой, мы представили некоторые параметры репрезентативных материалов, использованных в трех способах соединения: пайке мягким припоем, термокомпрессионном соединении алюминиевой проволоки и УЗ-сварке меди.

Простое сравнение значений делает очевидным тот факт, что медь сама по себе превосходит конкурентов по каждому показателю почти вдвое. Мягкий припой имеет самую низкую точку плавления, в то время как алюминий демонстрирует «слабость» с точки зрения предела текучести, который важен для механической прочности. Таблица 1 подчеркивает априорную пригодность соединений меди с медью при высоких рабочих температурах.

Кроме физических недостатков, упомянутых выше, любой тип мягкого припоя склонен к ползучести под постоянной нагрузкой. Рис. 5 демонстрирует время разрушения различных типов припоя под нагрузкой при рабочей температуре 100 °C. Поскольку мы стремимся к длительному сроку службы, становится ясно, что механическое напряжение в слоях припоя должны быть минимально. Напряжения могут быть вызваны внешними силами, а также (что еще труднее предотвратить) внутренней конструкцией модуля. Температурные циклы в комбинации с различными значениями коэффициентов теплового расширения являются основными причинами, вызывающими внутренние напряжения. Сегодня общеизвестны случаи расслоения припоя между подложкой и опорной пластиной. Чтобы предотвратить ослабление или текучесть вследствие цикличного воздействия температур или нагрузок, вызываемых в материале, в местах, где это возможно, необходимо постоянно обновлять припой.

Соединения в устройствах с большими токами

В устройствах с большими токами ограничения термокомпрессионных алюминиевых проволочных соединений становятся очевидными. Для снижения температуры необходимо запараллеливание множества проволочных перемычек (рис. 2). Чтобы продемонстрировать электротермические преимущества контактов, соединенных ультразвуковой сваркой, в сравнении с обычно используемой технологией проволочных соединений, было выполнено численное моделирование на основе параметров материалов

Таблица 1. Свойства материалов: мягкого припоя, алюминия и меди

	Точка плавления, [°C]	Модуль упругости, [ГПа]	Предел текучести (0,2% смещения), [МПа]	Предел прочности, [МПа]
Мягкий припой SnAg3,5	221	50	23	27
Алюминиевая проволока	660	68	12	47
Медный контакт, УЗ-сварка	1083	126	340	351

Таблица 2. Электротермические свойства материалов: мягкого припоя, алюминия и меди

	Удельное электрическое сопротивление, [10^{-6} Ом·см]	Теплопроводность, [Вт/мК]
Мягкий припой SnAg3,5	13,1	53
Алюминиевая проволока	4,3	240
Медный контакт, приваренный УЗ	1,9	390

в таблице 2 для силового контакта, аналогичного изображенному на рис. 2. Кроме того, учтены зависимости от температуры.

Граничные условия устанавливаются равными для каждого моделирования при 100 °C для верхнего слоя подложки и 110 °C в зоне контакта внешней шины.

Температурное равновесие при постоянном токе 400 А

Постоянный ток 400 А вызывает максимальную температуру порядка 200 °C в устройстве с алюминиевыми проволочными соединениями (рис. 5).

При моделировании устройства с контактами, соединенными УЗ-сваркой, максимальная температура снижается до 120 °C (рис. 6). Здесь площадь поперечного сечения соответствует минимально допустимым проектным условиям для штамповки. Кроме того, увеличенная площадь поперечного сечения снижает температуру.

Дополнительно было выполнено моделирование соединительной медной проволокой 500 микрон. При использовании 10 проволочных соединений максимальная температура составляет 148 °C.

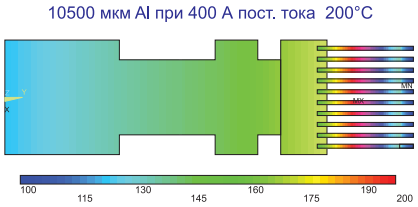

Рис. 5. Моделирование температурного равновесия с алюминиевыми проволочными соединениями

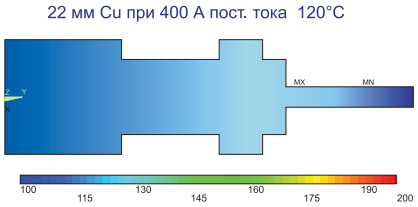

Рис. 6. Моделирование температурного равновесия с контактом, приваренным УЗ-сваркой

Токонесущая способность при постоянных потерях на сопротивлении

То же устройство, что и в предыдущем примере, теперь используется обратным образом для того, чтобы сравнить токонесущую способность проволочных соединений с токонесущей способностью контактов, соединенных УЗ-сваркой. Рассеяние мощности внутри устройства с проволочными соединениями (рис. 6) рассчитывается и выбирается в качестве базового значения. Промышленные приводы, ток на которые подается модулем EconoPACK™+, способны справиться с этим рассеянием мощности, поэтому и в будущем приводы, при использовании модуля с другой внутренней конструкцией, также будут на это способны. Поскольку рассеяние мощности изменяется линейно вместе с омическим сопротивлением, это заключение обосновано. Это граничное условие ведет к возможному увеличению тока на контактах на 62% при снижении температуры на контактах на 31%. Эти значения впечатляюще демонстрируют возможности металлических контактов, сваренных УЗ, вследствие сокращения потерь на сопротивление в силовых модулях с большими токами. Паяные соединения демонстрируют подобные возможности только при пренебрежимо малой толщине слоя припоя и большей площади поверхности контакта.

Устойчивость к механическим нагрузкам

В данном разделе представлены экспериментальные результаты определения механических параметров силы соединения контактов с подложкой. Мы сравниваем только контакты, сваренные УЗ, и контакты, соединенные мягким припоем.

Кривые зеленого цвета на рис. 7 представляют паяные контакты. Они демонстрируют неожиданно быстрое разрушение после небольшого смещения. В противовес этому, кривые голубого цвета, соответствующие УЗ-сварке, указывают на замедленное разрушение. Электрическая цепь не разрывается до смещений 0,5 мм.

Исследование надежности

Основы надежности и усталости

В 1860-х годах Август Волер систематически исследовал усталость осей железнодорожных вагонов. Он заключил, что диапазон циклических напряжений более важен, чем пиковые значения, и ввел понятие «предел выносливости». С тех пор усталость известна в материаловедении как прогрессирующее и локализованное структур-

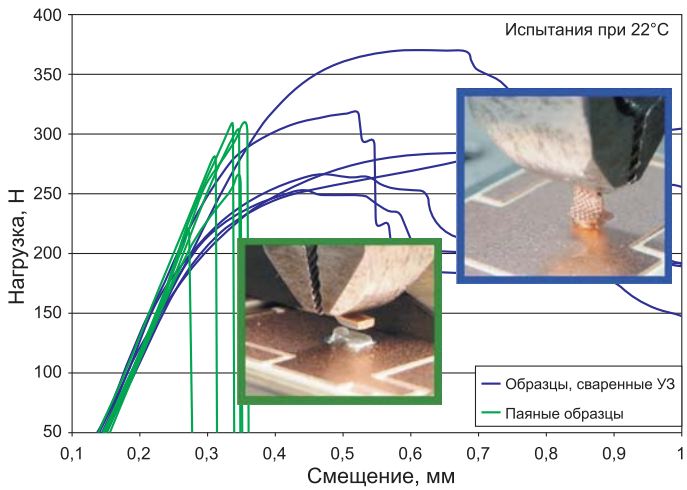

Рис. 7. Диаграмма «нагрузка–смещение», сравнивающая данные испытаний на отрыв соединений, сваренных УЗ, и паяных соединений

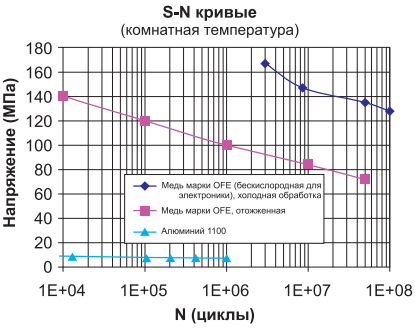

Рис. 8. Диаграмма S-N с пределами напряжений для меди марки OFE и алюминия марки 1100

ное разрушение, которое происходит, когда материал подвергается циклической нагрузке.

При фокусировании внимания на проблемах срока службы, также известных как эффект многоцикловой усталости, свойства материала обычно характеризуются кривой S-N (кривая Волера). Это график зависимости амплитуды циклического напряжения (S) от логарифмической шкалы циклов до разрушения (N).

В сравнении со сталью для сплавов алюминия и меди нет предела выносливости. В конечном итоге, эти материалы разрушаются вследствие повторяющейся нагрузки. Для того чтобы определить «эквивалентный» предел выносливости, проектанты обычно используют значение усталостной прочности при 10^8 циклах. Диаграмма на рис. 8 показывает значительно большую сопротивляемость усталости меди в сравнении с алюминием.

Основными факторами, влияющими на усталостную долговечность, являются амплитуда напряжений (геометрия конструкции), подготовка поверхности, размер зерна материала и рабочая температура. Благодаря тому, что усталостная прочность меди в десять раз выше, конструкции модулей может быть придана еще большая механическая прочность.

Испытание вибрационной нагрузкой

Надежность под воздействием вибрационной нагрузки все в большей степени попадает в фокус внимания, и не только в отношении устройств, применяемых в транспортных средствах. Так, вибрации внутри инвертора могут происходить из-за места и условий монтажа.

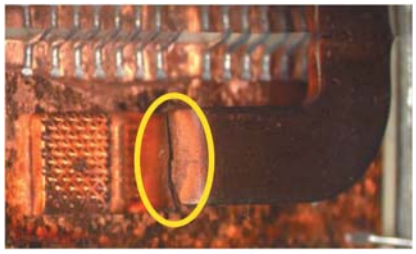

Рис. 9. Разрушение контакта при ускоренном испытании с приложением случайной вибронагрузки

Кроме других тестов, больше связанных с применением устройств, были выполнены ускоренные испытания циклического ресурса в соответствии со стандартом IEC 60068-2-64 для соединений меди с медью, выполненных УЗ-сваркой, с целью определения способности выдерживать конкретные тяжелые условия работы со случайными вибрациями в широком диапазоне частот. Стандарт изначально распространяется на образцы, которые могут подвергаться воздействию вибрации стохастической природы при перевозке или вследствие производственной среды, например на самолете, космическом аппарате или наземном транспорте. Ускоренный профиль тестирования обеспечивает случайную вибрацию в течение 94 часов в диапазоне между 10 и 2000 Гц при среднеквадратичных значениях ускорения 177 м/с, что в 18 раз больше ускорения силы тяжести и вдвое превышает ускорение запуска пилотируемого космического аппарата.

Испытания закончились образованием трещины в одном контакте, но не в соединении, выполненном УЗ-сваркой (рис. 9). Качество всех 24 соединений изучено с помощью РЭМ, и не было выявлено никаких видимых повреждений.

Испытание на тепловой удар

Особое внимание обращено на нагрузки при тепловом ударе, как на второй важный фактор, ограничивающий срок службы. Выполнены сравнительные испытания срока службы при тепловом ударе (ИТУ) конструкций, сваренных УЗ, и паяных. Температура изменялась от –40 до +125 °C. В левой части рис. 10 показаны испытываемые изделия, которые были построены одинаково, за исключением технологии соединений. Рисунок слева вверху показывает образцы, сваренные УЗ, а слева внизу – паяные образцы. Ультразвуковая микроскопия (УЗМ) использована для оценки качества технологии соединения до и после испытаний. Две черно-белые фотографии отображают УЗМ-анализ после 100 циклов. В верхнем правом углу не видно изменений в сравнении с исходной картиной. Напротив, паяные соединения, показанные в правом нижнем углу, претерпели расслоение между подложкой и медными проводниками вокруг зоны соединения. Зона расслоения — ярко-белая.

Данные образцы вместе с другими были также оценены с точки зрения корреляции сопротивления контакта (относительно прямого напряжения диода). Изменений в сопротивлении контакта не наблюдалось.

Вывод по результатам всех испытаний следующий: только контакты, сваренные

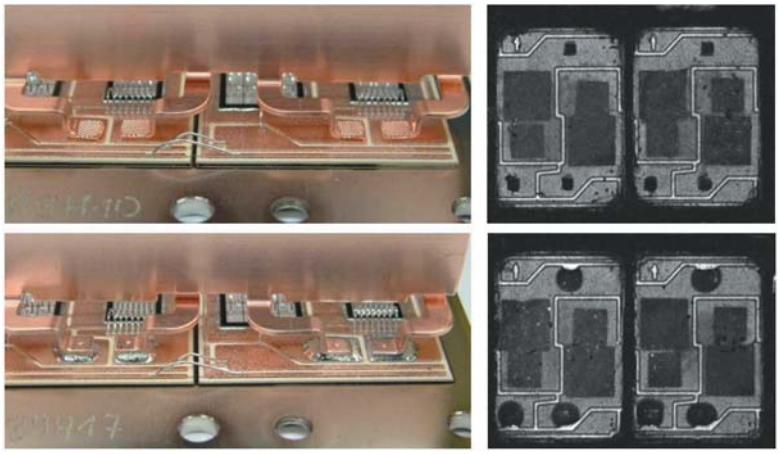

Рис. 10. Сравнительные испытания конструкций, сваренных УЗ, и паяных; фото ультразвуковой микроскопии после 100 циклов испытаний на тепловой удар

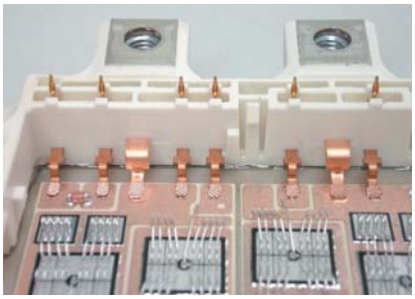

Рис. 11. Силовой модуль EconoPACK™4 без крышки

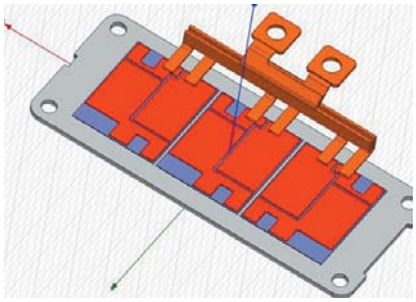

Рис. 12. Концепция «токопроводящей шины на раме»

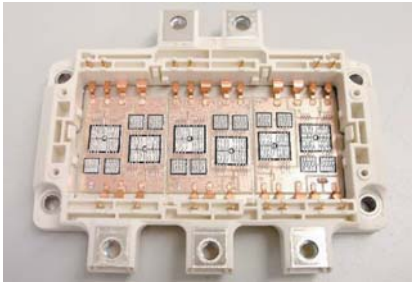

Рис. 13. Вид изнутри на клеммы, приваренные УЗ и вспомогательные разъемы с применением технологии Press-Fit

УЗ, не показывают признаков усталости в соединении. Сегодняшние ограничения срока службы силовых контактов могут быть преодолены за счет применения ультразвуковой сварки медных контактов к поверхности подложки.

Переход к реальному изделию EconoPACK™4

Суммируя вышеперечисленные выгоды, компания Infineon Technologies начала интеграцию технологии ультразвуковой сварки в новую конструкцию EconoPACK™4. Хорошо известный принцип компоновки корпуса 'Econo' характеризуется плоской геометрией и более высокой степенью интеграции с размещением до трех фазных выводов в одном модуле. EconoPACK™4 объединяет этот принцип с описанной технологией соединений. Силовые контакты, рассчитанные на ток до 200 А, а также вспомогательные соединения реализуются УЗ-сваркой (рис. 11).

Внедрение УЗ-сварки привело к созданию концепции «токопроводящей шины на раме» (рис. 12), обладающей низкой паразитной индуктивностью, которая важна для современных кремниевых устройств с высокой скоростью переключения, таких как IGBT3 и IGBT4 от компании Infineon.

Инновационная конструкция также снижает стоимость инверторной системы, обеспечивая прижимной контакт без пайки со вспомогательными клеммами ERNI Press-Fit (рис. 13), которые могут быть также припаяны, если это требуется.

Последующие продукты, такие как PrimePACK™ и IHM-B, также используют технологию УЗ-сварки и хорошо адаптированы к внедрению будущих поколений кристаллов.

По вопросам приобретения силовых модулей Infineon обращайтесь к руководителю направления активных компонентов компании «ПетроИнТрейд» Юрию Емельянову: infineon@petrointrade.ru.

НОВАЯ СЕРИЯ AC/DC-МОДУЛЕЙ ОТ TDK-LAMBDA

Компания TDK-Lambda представила новую серию AC/DC-источников питания RFE1000. Эти встраиваемые модули питания способны отдавать нагрузке 1 кВт мощности через одиночный выход номиналом 24, 32 или 48 В. При этом возможно регулирование выхода с помощью потенциометра в диапазоне –10…+12% (в общем — 22%) от номинала. Изделия рассчитаны на универсально широкий диапазон входных напряжений — 85…265 В AC.

Источник может применяться как отдельным блоком, так и в параллельном подключении: возможно соединение до 8 блоков для формирования систем большей мощности или систем с резервированием. При этом возможно заказать модель со встроенным выходным блокирующим MOSFET-элементом.

Охлаждение — принудительное с изменяющими (в зависимости от нагрузки) частоту вращения вентиляторами. RFE1000 работают при температурах 0 ...+70 °C, имеют габариты 305×127×41 мм и удельную мощность 10,5 Вт/дюйм^3 (или 0,64 Вт/см^3). КПД достигает 89%.

Силовые выходные клеммы имеют болтовой зажим M5, а через 12-точечный разъем типа JST каждая модель реализует дополнительные функции: дистанционное включение/ выключение, параллельная работа, сигнализация о рабочем/аварийном состоянии, удаленная обратная связь, независимый источник опорного напряжения 12 В/0,25 А. Другие стандартные функции — это защита от перенапряжения, защита от перенагрузки, защита от перегрева и LED-индикатор рабочего состояния выхода на передней панели.

Секторы применения семейства RFE — промышленная автоматика, связь, измерительные комплексы, усиление аналоговых сигналов.

Новая серия RFE1000 имеет гарантию 2 года и отвечает стандартам EN55022, FCC (класс «B») по кондуктивной и излучаемой электромагнитной совместимости, обладает знаком CE, а также одобрена по стандартам безопасности UL/EN60950-1.

www.tdk-lambda.com