

Конструкционные материалы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоаппаратуры

Д. Гришин¹, И. Гусев²

УДК 621.315 | ВАК 2.2.2

Электромагнитное экранирование – широко распространенный метод обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоаппаратуры. Эффективность экранирования и надежность функционирования аппаратуры во многом определяются конструкцией экранов, а также характеристиками и свойствами материалов, используемых для их изготовления. В статье рассмотрены основные конструкционные материалы, применяемые для электромагнитного экранирования, такие как прокладки, контактные пружины, ткани, термоусадочные трубки, поглотители ВЧ-излучения с клеевым слоем. Описана методика подтверждения характеристик экранирующих материалов в лаборатории ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР».

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире электроника и вычислительная техника занимают особое место во многих сферах деятельности человека. Однако совместное использование различных электронных устройств может приводить к возникновению нежелательных электромагнитных взаимодействий, которые могут негативно сказаться на работе этих устройств. Одним из способов решения таких проблем является обеспечение электромагнитной совместимости [1].

Электромагнитная совместимость (ЭМС) определяется как способность электронной системы функционировать в окружении других систем без значительного воздействия на них. Это означает, что оборудование, предназначенное для использования в различных электронных системах, должно соответствовать определенным стандартам ЭМС, чтобы обеспечить возможность безопасного и надежного функционирования в различных условиях эксплуатации.

Так, например, современные медицинские приборы, осуществляющие диагностику и лечение пациентов, включают в себя множество компонентов и электроприборов. Взаимодействие всех этих компонентов может вызывать нежелательные электромагнитные волны, что приводит к сбоям в работе устройства, возможно, даже его разрушению [2].

С расширением количества устройств, работающих в электромагнитном спектре, ученые и инженеры находят новые решения проблемы ЭМС. Основным методом обеспечения электромагнитной совместимости в части устойчивости к воздействию электромагнитных полей, а также соответствия требованиям к уровню излучаемых помех является электромагнитное экранирование [3]. Установка экранов на помехоизлучающие элементы обеспечивает разделение сигналов, необходимое для функционирования радиоэлектронной аппаратуры, повышает избирательность приемников, помехозащищенность чувствительной аппаратуры, чистоту сигнала генераторов, точность работы приборов. Правильный выбор метода экранирования, материала экрана и его конструкции очень важны именно на начальном этапе проектирования, поскольку он будет определять возможность успешного прохождения испытаний на ЭМС и надежного функционирования разрабатываемой аппаратуры.

В настоящее время промышленность выпускает огромное разнообразие материалов для обеспечения ЭМС. Это конструкционные материалы, предназначенные для улучшения экранирования, поглотители электромагнитных волн, а также ЭРИ: дроссели, специальные фильтры и полупроводниковые приборы.

В данной статье подробнее рассмотрим конструкционные материалы, к которым относятся прокладки, контактные пружины, ткани, компаунды, ферритовые изделия, а также их комбинации.

¹ АО «ТЕСТПРИБОР», лаборатория ЭМС, инженер-испытатель.

² АО «ТЕСТПРИБОР», лаборатория ЭМС, инженер-испытатель.



Рис. 1. Контактные пружины

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Контактные пружины (рис. 1) изготавливают из различных сплавов (бериллиевая бронза, сталь, монель, луженая медь) и применяют для обеспечения контакта между двумя проводящими поверхностями. Пружины отличаются большим количеством циклов сжатия – более 20 тыс. без ухудшения основных характеристик. Усилие прижима около 800 г/см. Эффективность экранирования выше всего в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц и падает с ростом частоты. В силу своей конструкции пружины позволяют организовать скользящий контакт. Универсальные методы крепления позволяют организовать скользящий или прижимной контакт в любом направлении. Для крепления может использоваться один из нескольких методов: клепки, крепление к пазам, крепление с помощью клеевого слоя, крепление методом клипсы, монтаж с помощью приклеиваемой рейки, сварка, пайка. С помощью таких пружин организуются ножевые контакты, применяемые в дверях безэховых камер.



Рис. 2. Прокладка из провололочной сетки



Рис. 3. Лента из плетеного провода

Прокладки из провололочной сетки представляют собой сетку из стальной проволоки, скрученную в трубку или обернутую вокруг мягкой пористой резины (рис. 2). Применяются в основном при сборке высоконагруженных конструкций (БЭК). Между жгутами прокладки пропускается болт соединения и таким образом организуется непрерывный контакт вокруг соединения. Количество циклов сжатия – от 6 до 12 в год. Кроме того, выпускается лента из плетеного провода (рис. 3), которая позволяет экранировать кабельные сборки путем обмотки вокруг кабеля. Зафиксировать ее можно с помощью термоусадочной трубки или любым другим удобным способом.

Сегодня получили широкое распространение **экранирующие прокладки из проводящей резины и эластомеров** (рис. 4). Они популярны благодаря возможности обеспечивать одновременно герметичность и электрический контакт. Они обладают высокой гибкостью, что позволяет укладывать их в пазы сложной формы, как, например, в СВЧ-корпусах. Кроме того, они удобны для точного производства, поскольку могут быть сформированы из компаунда на автоматической линии.

Спиральные трубки (рис. 5) по функционалу подобны контактным пружинам, но их способ монтажа иной – они устанавливаются в паз и прижимаются сверху крышкой.



Рис. 4. Экранирующие прокладки из эластомера



Рис. 5. Спиральные трубки

Электрический контакт обеспечивается за счет упругости стали.

Наиболее популярны и удобны в использовании **тканевые проводящие прокладки** с упругим наполнителем и клеевым слоем (рис. 6). Они представляют собой вспененный полимер, покрытый проводящей тканью. Имеют различные формы и размеры, благодаря наличию проводящего клеевого слоя могут использоваться на неподготовленных корпусах при отсутствии пазов. Количество сжатий превышает 500 тыс. Тканевые проводящие прокладки имеют остаточную деформацию при превышении усилия и степени сжатия.

Экранирующая фольга применяется для экранирования магнитной и электрической составляющей электромагнитного поля, в зависимости от материала фольги (рис. 7). Выпускается в катушках с нанесенным клеевым слоем. Очень удобно экранировать кабели, устранять щели в экранах. Коэффициент экранирования достигает 10.



Рис. 6. Тканевые проводящие прокладки



Рис. 7. Экранирующая фольга

Для экранирования прозрачных конструкций применяется экранирующая пленка с клеевым слоем. Коэффициент экранирования от 20 до 30 дБ. Также для решения этих задач применяются готовые **экранированные стекла**, получаемые спеканием двух стекол и проволоочной сетки между ними (рис. 8). Для крепления к внешнему экрану по краям такой конструкции оставляется юбка, шириной 10–50 мм для крепления к проводящей поверхности. При применении подобных конструкций всегда необходимо помнить, что чем выше коэффициент экранирования, тем ниже коэффициент светопропускания.

При необходимости, чтобы заэкранировать кабельную сборку, обеспечив ей механическую защиту, удобно применять **экранирующие термоусадочные трубки** (рис. 9).



Рис. 8. Экранированное стекло



Рис. 9. Экранирующие термоусадочные трубки

Внутри такой трубки нанесен проводящий слой или сетка. При усадке трубка плотно облегает кабель, обеспечивая необходимую прочность и экранирование до 60 дБ на частоте 10 ГГц. Необходимо помнить, что для обеспечения заявленного коэффициента экранирования при заделке разъемов необходимо обеспечить электрический контакт по всему хвостовику разъема и его проводящего корпуса.

Особое место среди экранирующих материалов занимают **поглотители высокочастотных излучений с клеевым слоем** (рис. 10). Они применяются для обеспечения ЭМС внутри небольших корпусов. Как известно, в закрытом корпусе, состоящем из проводящих материалов, электромагнитные волны отражаются от проводящей поверхности. Многократные переотражения в небольшом замкнутом пространстве приводят к образованию стоячих волн, изменению полного комплексного сопротивления пространства над полоском и во многих случаях – к отказу функционирования схемы, которая работала при открытой крышке. Для решения этой проблемы применяют поглотители с клеевым слоем. Их удобно наклеивать на крышку корпуса, обеспечивая поглощение до 10 дБ.

На рис. 11 представлена зависимость усиления от частоты для усилителя с автоматической регулировкой усиления.



Рис. 10.
Поглотители
ВЧ-излучения
с клеевым
слоем

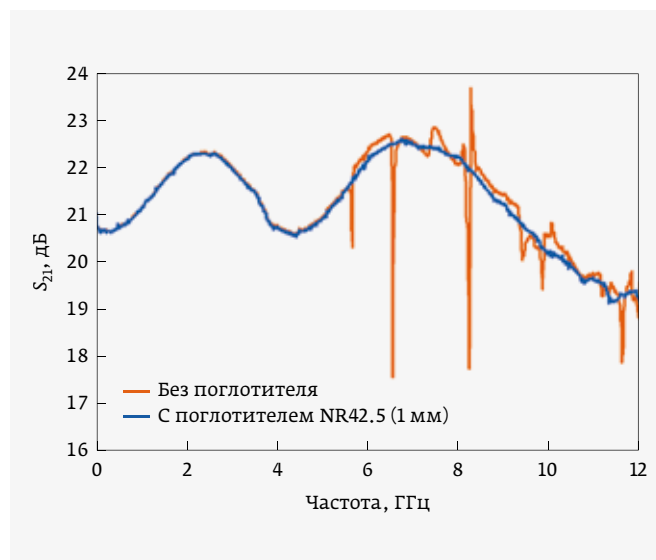


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления от частоты для усилителя с АРУ

На графике видны броски коэффициента усиления из-за пространственных резонансов до применения поглотителя. После наклейки поглотителя характеристика становится гладкой, а усилитель с АРУ – пригодным для эксплуатации. Поглотители являются частотно-зависимыми материалами, что необходимо учитывать при их выборе.

Учитывая скорость появления новых материалов в промышленности, невозможно быть заранее знакомым со свойствами их всех, в связи с чем в лаборатории ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» разработали методику подтверждения некоторых характеристик экранирующих материалов. Метод основан на стандарте MIL-STD-285 [4]. Подтверждение коэффициента экранирования листовых материалов проводится следующим образом. Перед проведением измерений выполняется калибровка измерительной системы. В безэховой камере устанавливаются друг напротив друга, соосно, приемная и измерительная антенны с известными характеристиками (рис. 12).

Измеряется коэффициент связи между антеннами в исследуемом частотном диапазоне. Затем передающая антенна и генератор сигналов устанавливаются в камере, а приемная антенна – вне камеры (рис. 13).

В технологическое отверстие камеры последовательно устанавливаются исследуемые образцы материалов и проводятся измерения. Полученные значения сравниваются с коэффициентом связи антенн без экрана между ними, и вычисляется коэффициент экранирования. Данный метод пригоден также для оценки эффективности применения проводящих прокладок. Прокладки помещаются между камерой и стальной пластиной с известным коэффициентом экранирования – по снижению коэффициента

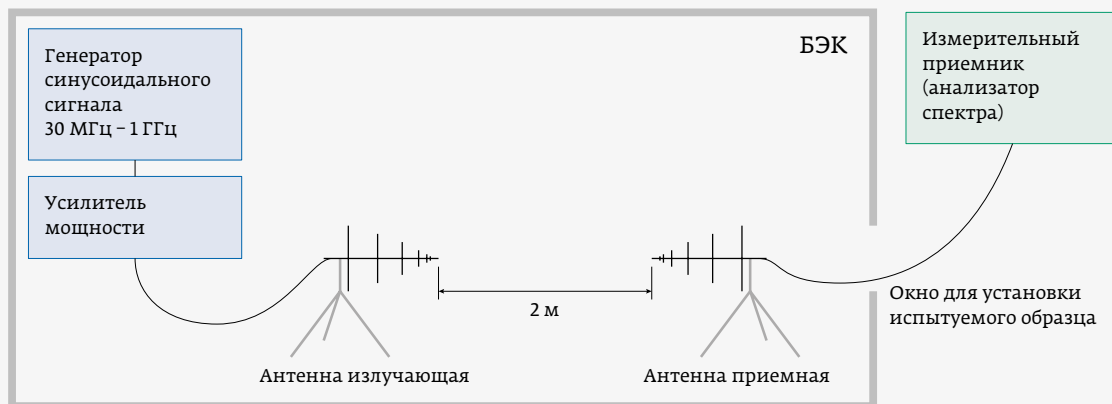


Рис. 12. Схема измерения коэффициента связи между антеннами

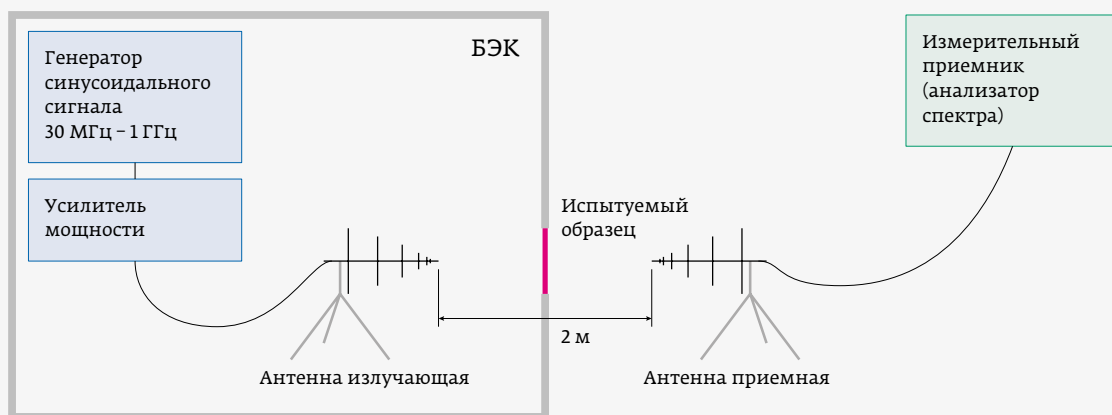


Рис. 13. Схема измерения коэффициента экранирования образцов материалов

экранирования можно довольно точно оценить эффективность применения той или иной прокладки.

С помощью этого метода было проверено несколько образцов материалов, результаты подтвердили заявленные значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря появлению на рынке новых конструкционных материалов разработчикам становится проще обеспечить необходимые требования по ЭМС, но сложнее разобраться в многообразии предлагаемых продуктов. АО «ТЕСТПРИБОР» обладает собственной испытательной лабораторией, способной подтвердить качество поставляемых материалов, что позволяет предлагать комплексные решения проблем ЭМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pospisilik M., Drofova I., Kovar S., Dulik T., Tesacek A.** Construction of a Generator for Power Frequency Magnetic Field Immunity Test. 2023. 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). 19–20 April 2023.
2. **Pospisilik M.** Introduction to Electromagnetic Compatibility for Electronic Engineers... and not only for them. – Zlin: Tomas Bata University in Zlin. 2019.
3. IMO Resolution A.813(19) – General Requirements for Electromagnetic Compatibility (EMC) for all Electrical and Electronic Ships Equipment – (Adopted on 23 November 1995).
4. Standard MIL-STD-285 Attenuation Measurements for Enclosures and Electromagnetic Shielding.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов

Программные и аппаратные трояны – способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия

Под общей редакцией А.И. Белоуса
В 2-х книгах

Книга 1

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 688 с.
ISBN 978-5-94836-524-4

Книга 2

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 630 с.
ISBN 978-5-94836-524-4

Цена 3700 руб.

Впервые в мировой научно-технической литературе в объеме одного комплексного издания последовательно и детально исследован феномен программных и аппаратных троянов, которые фактически являются технологической платформой современного и перспективного информационно-технического оружия (кибероружия). Материал энциклопедии представлен в виде 12 глав.

В первой вводной главе, обобщающей результаты анализа технических возможностей и ограничений современного оружия (атомного, космического, сейсмического, климатического, различных видов СВЧ-оружия), показано, что развитие всех «обычных» и «новейших» видов вооружений дошло до такой стадии, что их реальное использование на практике будет равносильно самоубийству начавшей войну стороны. Осознание этого факта привело к развитию информационно-технического оружия (кибероружия и нейрооружия).

В главе 2 детально исследованы концепции, методы, технические средства и примеры реализации этого вида оружия. В главе 3 рассмотрены основные виды программных троянов, вирусов и шпионских программ, которые в «кибероперациях» обычно действуют солидарно, защищая и помогая друг другу. В главе 4 наглядно показан эволюционный путь развития аппаратных троянов от «ящиков» и «коробочек» до микросхем, приведены примеры их применения в компьютерах, серверах, мобильных телефонах, автомобилях и даже в одежде и обуви человека. В главах с 5-й по 9-ю детально рассмотрены основные типы троянов в микросхемах, принципы их проектирования и работы, способы внедрения, методы их маскировки, выявления в микросхемах, а также защиты и противодействия. В главах с 10-й по 12-ю представлен детальный сравнительный ретроспективный анализ основ государственной политики в США и России в области обеспечения безопасности каналов поставки микросхем.

Книга ориентирована на широкий круг читателей: от инженеров, специалистов по информационной безопасности, чиновников министерств и ведомств до школьников и пенсионеров, активно использующих социальные сети.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru



125367, г. Москва,
вн.тер.г. муниципальный округ
Покровское-Стрешнево, пр-д Полесский,
д. 16, стр. 1, пом. 9/1/2,
тел.: 8 (495) 232-14-67,
info@ooo-farad.ru,
www.ooo-farad.ru



ПРОГРАММИРУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ



- ▶ **ВЫСОКАЯ МОЩНОСТЬ**
- ▶ **ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ**
- ▶ **ВЫСОКАЯ НАДЕЖНОСТЬ**

**ПРОГРАММИРУЕМЫЕ
ЛИНЕЙНЫЕ
СРЕДНЕЧАСТОТНЫЕ
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Область применения:

- ▶ Военная авиация
- ▶ Испытательные лаборатории
- ▶ Двигателестроение
- ▶ Испытания электрических компонентов
- ▶ Испытания на электромагнитную совместимость
- ▶ Ремонт и техническое обслуживание компонентов военной техники
- ▶ Тестирование и верификация военной продукции
- ▶ Испытания авиационной электроники

**ПРОГРАММИРУЕМЫЕ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ
ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Область применения:

- ▶ Тестирование силовой электроники
- ▶ Научные исследования и испытания
- ▶ Испытание низковольтных устройств
- ▶ Испытание силовых полупроводниковых модулей
- ▶ Аэрокосмическая промышленность
- ▶ Оборонная промышленность
- ▶ Тестирование автомобильной электроники
- ▶ Интеллектуальные сети

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (СЕРИИ F-PSM И F-PLM)

СЕРИЯ F-PSM

- ▶ Диапазон выходных частот: от 320 до 480 Гц, от 300 до 800 Гц, опция от 45 до 1 кГц.
- ▶ Диапазон выходной мощности от 1 до 450 кВА.
- ▶ Действующее фазное выходное напряжение: 138 В / 180 В / 276 В / 1000 В.
- ▶ 1-фазный и 3-х-фазный выход.
- ▶ 3-х-фазное напряжение независимо регулируется по каждой фазе, регулировка сдвига фаз от 0 до 359,99°
- ▶ Поддержка программирования на передней панели, без необходимости использования ПО через ПК.
- ▶ Регулируемая скорость нарастания и спада напряжения.
- ▶ Функция плавного пуска выходной мощности.
- ▶ 16-битный цифровой высокоточный преобразователь с точным выходом.
- ▶ 16-битный аналого-цифровой высокоточный преобразователь обеспечивает точное считывание данных.
- ▶ Функции защиты: OVP / OCP / OTP.
- ▶ 19-дюймовая стандартная стойка или напольный шкаф.
- ▶ 7" большой ЖК-дисплей.
- ▶ Сенсорный экран управления и ввод при помощи цифровых клавиш.
- ▶ Многоуровневая ручка регулировки.
- ▶ Защита от превышения потребляемой мощности с помощью автоматического выключателя.
- ▶ Кнопка включения / выключения выхода.
- ▶ Оптимизация воздушного потока, экономия пространства для охлаждения.

СЕРИЯ F-PLM

- ▶ Диапазон выходных частот 320-480 Гц / 300-800 Гц, дополнительный диапазон 45 – 5000 Гц.
- ▶ Диапазон выходной мощности 30 30 000 ВА .
- ▶ Выходное напряжение стандарт от 0 до 13 – 8 В, дополнительно от 0 до 180 В / 276 В / 1000 В.
- ▶ 1-фазный и 3-х-фазный выход.
- ▶ 3-х-фазное напряжение регулируется независимо, а сдвиг фаз регулируется в пределах от 0° до 359,99°.
- ▶ Технология линейного питания, ультранизкий уровень искажений, ультранизкие внешние помехи.
- ▶ Поддержка программирования с передней панели, нет необходимости в программном управлении от ПК.
- ▶ Скорости нарастания и спада напряжения регулируются.
- ▶ Функция плавного пуска выходного питания.
- ▶ 16-битный ЦАП и АЦП обеспечивают высокоточное выходное напряжение и более точное считывание данных.
- ▶ Многочисленные функции защиты: OVP / OCP / OTP.
- ▶ Корпус форм-фактора стандартной 19-дюймовой стойки или напольный шкаф.
- ▶ Сенсорное управление и ввод с цифровых клавиш.
- ▶ Кнопка включения/выключения выхода.
- ▶ Передний и боковые воздухозаборники, отвод воздуха сзади, экономят пространство для охлаждения.
- ▶ Поддержка протокола MODBUS.
- ▶ Стандартный интерфейс RS485 и RS232. Дополнительный интерфейс: USB, GPIB, LAN.
- ▶ APM (аналоговое программирование и мониторинг (изолированный)).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА (СЕРИИ F-PM И F-PMD)

СЕРИЯ F-PM

- ▶ Максимальное выходное напряжение / ток: 1500 В / 1500 А.
- ▶ Высокая удельная мощности: макс. мощность 1-го источника 15 кВт/3U и 5 кВт/ 2U.
- ▶ Режимы работы: постоянное напряжение CV, постоянный ток CC, приоритет CV/CC может быть установлен в 132 комбинациях напряжения/тока по выбору пользователя.
- ▶ Стандартный входной сигнал PFC, коэффициент мощности до 0,99 (5 кВт/2U).
- ▶ Поддержка программирования на передней панели без управления внешним ПО от компьютера.
- ▶ Регулировка скорости подъема и спада напряжения и тока.
- ▶ Функция плавного пуска вых. мощности для работы с индуктивной нагрузкой.
- ▶ 16-битный ЦАП и 20-битный АЦП обеспечивают точный выходной сигнал и считывание измерений.
- ▶ Защита OVP / OCP / OTP.
- ▶ Стандартный размер под стойку 19".
- ▶ 4" ЖК-дисплей.
- ▶ Управление с сенсорного экрана и ввод с цифровых клавиш.
- ▶ Входная мощность контролируется автоматическим выключателем (3U).
- ▶ Клавиша включения/ выключения выхода.
- ▶ Клеммы дистанционного измерителя напряжения для компенсации падения напряжения на выходной линии в стандартной комплектации.
- ▶ Поддержка протоколов Modbus и SCPI.
- ▶ Стандартный интерфейс: RS-485 и RS-232, цифровой ввод-вывод. Дополнительные интерфейсы: LAN & CAN, USB, GPIB.
- ▶ Аналоговое программирование и мониторинг (изолированные).

СЕРИЯ F-PMD

- ▶ 7" большой ЖК-дисплей.
- ▶ Сенсорный экран и цифровой ввод.
- ▶ Клеммы удаленного измерения для компенсации падения напряжения на выходной линии в стандартной комплектации.
- ▶ Интеллектуальная регулировка скорости вентилятора для снижения шума.
- ▶ Передний/боковой воздухозаборник и задний воздуховыпуск для экономии пространства для рассеивания тепла.
- ▶ Поддержка Modbus и SCPI.
- ▶ Стандартный интерфейс: RS-485 и RS-232, цифровой ввод/вывод. Дополнительный интерфейс (LAN и CAN, USB, GPIB).
- ▶ Аналоговое программирование и мониторинг (изолированный).
- ▶ Диапазон выходного напряжения постоянного тока 0-30V / 40V/ 50V/ 80V/ 300V/ 350V/ 400V/ 800V.
- ▶ Диапазон выходного тока от 0 до 5000 А.
- ▶ Диапазон выходной мощности: 2 / 3 / 5 / 10 / 20 кВт и до 300 кВт.
- ▶ Поддержка программирования с передней панели без необходимости ПО внешнего компьютера.
- ▶ Регулируемые скорости подъема и спада напряжения/тока.
- ▶ Функция плавного пуска силового выхода для работы с индуктивной нагрузкой.
- ▶ 16 битный ЦАП и 20-разрядный АЦП обеспечивают точную настройку выхода и точное считывание данных.
- ▶ Функции защиты OVP/ OCP /OTP.
- ▶ Размер под 19" стандартную стойку.