

Силовая полупроводниковая электроника для метрополитенов

ПАО «Электровыпрямитель» специализируется на разработке и производстве силовых полупроводниковых приборов (СПП) и энергоэффективной преобразовательной техники (ПТ) на их основе. Миллионы СПП и десятки тысяч преобразователей и выпрямителей, произведённых на предприятии, более 40 лет успешно эксплуатируются в магистральных электровозах, тепловозах, путевых машинах и карьерных электровозах, в системах электроснабжения вагонов, тяговых подстанциях, преобразователях собственных нужд электрифицированного транспорта, а также в электрооборудовании метрополитенов. За все годы существования предприятия были разработаны и внедрены в производство несколько поколений СПП, многие из которых, многократно превысив допустимые сроки службы, успешно работают и сегодня на электрифицированном транспорте.

Многолетний опыт в проектировании и производстве СПП, внедрение современных технологий и применение методик контроля для отбраковки потенциально ненадежных приборов на основе учета реальных режимов эксплуатации позволяют обеспечивать высокий уровень качества выпускаемой продукции и в настоящее время. Номенклатура выпускаемой продукции составляет свыше 1000 типов СПП на токи от 10 до 10000 А и напряжение от 200 до 10000 В: диоды, тиристоры, симисторы, фототиристоры, беспотенциальные полупроводниковые модули, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), высокоэффективные охладители, прижимные устройства и теплопроводящие изоляционные элементы, силовые сборки, выполненные по



СПП и охладители

стандартным силовым схемам и по техническим требованиям заказчиков, в том числе с драйверами управления, элементами диагностики и защиты.

Выпрямительные и лавинные диоды таблеточной конструкции на токи от 1000 А до 9000 А и повторяющееся обратное напряжение от 1200 В до 6000 В широко используются в составе шести- и двенадцатипульсных выпрямителей тягового электроснабжения подстанций метрополитенов и городского транспорта. Данная серия диодов широко используется как отечественными, так и зарубежными производителями преобразовательного оборудования, в частности, итальянскими и индийскими компаниями. Высокий уровень производства обеспечивает стабильность импульсного прямого напряжения диодов в процессе всего срока эксплуатации, что особенно важно при работе приборов в схемах с параллельным соединением.

Наряду с вводом в эксплуатацию нового оборудования, особое внимание уделяется поддержанию в работоспособном состоянии электроподвижно-

го состава и систем энергоснабжения линий метро, эксплуатируемых несколько десятков лет. Качественный ремонт неразрывно связан с применением надежных компонентов, в том числе, изделий силовой полупроводниковой электроники. К сожалению, в существующих процедурах закупок для нужд метрополитенов, основным критерием является ценовое предложение участника, а его квалификация, и соответственно, качество поставляемых компонентов часто уходят на второстепенный план. В этом случае велика вероятность приобретения как некачественных комплектующих, так и контрафактных изделий. Поэтому необходимым условием обеспечения надежными отечественными компонентами является поставка проверенной сертифицированной продукции высокого качества непосредственно от предприятий – изготовителей с приёмкой представителями соответствующих ведомств.

Предметом частых закупок для ремонтных нужд подвижного состава метрополитенов являются силовые тиристоры типа Т161-160, ТЛ371-250, ТБ361-125, лавинные диоды штыревой конструкции ДЛ161-200, ДЛ171-320, диоды малогабаритной серии Д212-10, Д212-25, Д222-40, Д232-50, Д232-80 и др. Эти приборы устанавливаются в блоках питания собственных нужд (БПЧН), в блоках управления тири-

PJSC «Electrovipryamitel» from Saransk city specializes in the development and production of power semiconductor devices and energy-efficient converting equipment for transport applications. Its products more than 40 years successfully operate onboard of electric locomotives, diesel locomotives, track machines and quarry electric locomotives, in power supply systems of cars, traction units, converters for own needs of electric transport and subway. In the article the range of PJSC «Electrovipryamitel» products used in subways is analyzed.

торных регуляторов РТ-300/300, РТ-300/700 вагонов метро моделей 81-717 (714) и ЕжЗ (Ем508Т). Вся указанная выше номенклатура СПП освоена в серийном производстве, выпускается ПАО «Электровыпрямитель» на протяжении долгих лет и обеспечивает надёжную работу преобразовательной техники во многих областях применения, включая оборонную продукцию.

В номенклатуре предприятия также имеется и постоянно развивается широкая линейка диодно-тиристорных модулей с изолированным основанием на токи от 40 до 2000 А и рабочее напряжение до 4400 В. Напряжение изоляции между выводами модулей и основанием составляет от 2500 до 9500 В. Модули выполнены по технологии прижимного контакта, что обеспечивает им высокую энерготермостойкость, надёжную работу в циклических режимах с большими токовыми нагрузками, которые имеют место при эксплуатации электроподвижного состава. Конструкция модулей с прижимными контактами позволяет реализовать различные варианты силовых схем с использованием всех видов выпускаемых СПП. Так, к примеру, модулями М1Д1-630-18 комплектуются тяговые преобразователи электрифицированного городского наземного транспорта отечественного производства.



IGBT модуль с повышенной электрической прочностью изоляции (серия «В»)

В современной концепции развития транспортной структуры мегаполисов немалую роль играет и наземный пригородный железнодорожный транспорт. Предприятие выпускает преобразователи ВИП-1000-У1, которые предназначены для выпрямления однофазного переменного тока частотой 50 Гц в постоянный для питания четырех тяговых двигателей постоянного тока в режиме тяги и для инвертирования постоянного тока в однофазный пере-

менный ток 50 Гц в режиме рекуперативного торможения моторных вагонов модернизированного электропоезда переменного тока ЭД9Т. Внедрение выпрямителя позволяет за счет рекуперативного торможения экономить до 15% потребляемой электропоездом энергии. Выпрямитель комплектуется тиристорами ТЗ53-800-28 и охлаждается набегающим потоком воздуха при движении электропоезда. Благодаря постоянному совершенствованию конструкции и технологии изготовления тиристорных, а также введению дополнительных испытаний и диагностирования приборов, интенсивность отказов λ тиристорных данного типа приближается к значению 1×10^{-8} час⁻¹.

Необходимость применения преобразователей частоты на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) давно стала аксиомой при проектировании электропривода, в том числе, тягового. Несмотря на свои особенности, достаточно сложную конструкцию и необходимость более квалифицированного обслуживания в процессе эксплуатации в сравнении с приводом на основе тиристорных преобразователей, никто уже не сомневается в целесообразности применения регулируемого асинхронного электропривода в подвижном составе городского электротранспорта.

Все преобразователи частоты делятся на две основные группы – статические ПЧ и преобразователи для тягового привода. К статическим преобразователям частоты для транспортных средств относятся преобразователи собственных нужд (ПСН) подвижного состава (системы кондиционирования, вентиляции, освещения, стабилизаторы бортовой сети), которые не подвергаются частым изменениям режимов «включено – выключено», т. е. достаточно длительное время находятся в режиме постоянной нагрузки. Силовая часть этих преобразователей выполнена на базе относительно дешёвых стандартных IGBT модулей. Эти модули производятся многими фирмами и их особенностями являются медное основание и недорогие металлокерамические подложки на основе оксида алюминия. Вторая группа – преобразователи для

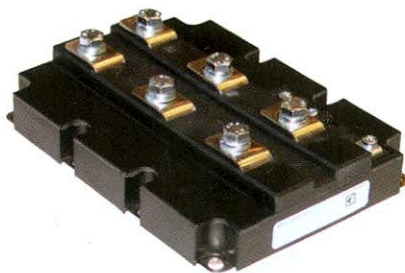
управления тяговыми асинхронными двигателями вагонов метро, троллейбусов, трамваев, гибридных транспортных средств, электробусов, а также железнодорожного транспорта (электропоездов, электровозов и тепловозов). Тяговые преобразователи эксплуатируются в значительно более тяжёлых режимах, связанных с многочисленными циклами «разгон – выбег – торможение». IGBT модули в этих преобразователях в процессе эксплуатации подвергаются большому количеству энерготермоциклов, которые постепенно разрушают их конструкцию из-за различия коэффициентов термического расширения компонентов силовых модулей. Кроме этого, и преобразователи, и модули эксплуатируются в жёстких механических и климатических условиях, что также предъявляет соответствующие требования к живучести изделий. В IGBT модулях транспортного исполнения для повышения их энерготермостойкости применяются более сложные, в сравнении со стандартными модулями, технологические и конструкционные решения. Модули для тягового электропривода изготавливаются с использованием конструкционных материалов с минимальным разбросом коэффициентов термического расширения, поэтому цена этих изделий является более высокой. В связи с высокими требованиями к этим изделиям производителей IGBT модулей транспортного исполнения в мире насчитывается не более десятка.

ПАО «Электровыпрямитель» более 20 лет занимается разработкой и производством IGBT модулей. В настоящее время номенклатура IGBT модулей, производимых предприятием, составляет около 400 различных типов модулей на токи от 50 до 4800 А и напряжение от 600 до 6500 В. Накопленный за это время опыт позволил не только разработать и выпускать серийно модули, являющиеся полными аналогами зарубежной продукции, но и в соответствии с задачами потребителей создать новые изделия, не имеющие аналогов. Предприятие производит модули как стандартного исполнения, так и циклоустойкие для применения в тяговом приводе транспортных средств.

Одним из примеров новой продукции для транспорта является серия модулей с повышенной электрической прочностью изоляции между основанием и выводами (эффективное значение V_{isol} более 13 кВ). Эта серия модулей разработана в соответствии с требованиями ОАО «РЖД» в части электрической прочности изоляции и в настоящее время применяется в ПСН уже широко известных электропоездов «Ласточка». IGBT модули серии «В» выпускаются на напряжение от 1700 до 6500 В, разработанные технические решения защищены патентом на изобретение RU 2274928.

Другим примером нестандартной продукции является IGBT модуль МД-ТКИ-1200-17-2КТД, также разработанный для применения в железнодорожном транспорте. Его отличительной особенностью является встроенный диод с удвоенной нагрузочной способностью. Модуль также относится к изделиям с высокой энерготермоцикlostойкостью, что позволяет применять его в тяговом приводе. В настоящее время эти модули применяются в системах электродинамического торможения модернизированных локомотивов ЧС-6 и ЧС-7.

IGBT-техника развивается значительно быстрее, чем традиционные биполярные СПП, и ежегодно ведущие фирмы-производители представляют новые технологические решения для повышения плотности коммутируемой мощности и надёжности модулей с использованием одновременно недорогих традиционных материалов. В частности, в последнее время на рынке появились новые модули на напряжение до 1700 В с повышенным ресурсом



IGBT модуль для электродинамического тормоза локомотивов (серия «КТ»)

эксплуатации, предназначенные для применения в тяговом приводе транспортных средств средней мощности. Их энерготермоцикlostойкость на порядок выше (30 – 50 тысяч циклов), чем у стандартных модулей с медным основанием (5 – 7 тысяч циклов), однако этот показатель пока не достиг параметров по термоцикlostойкости транспортных модулей (100 – 200 тысяч циклов). ПАО «Электровыпрямитель» продолжает развивать производство линейки специализированных IGBT модулей серии «Т» для тягового электропривода городского и железнодорожного транспорта, в том числе, подвижного состава метрополитена. Особенности модулей серии «Т» являются применение металломатричных композиционных материалов AlSiC, металлокерамических плат с высокой теплопроводностью на основе керамики из нитрида алюминия, бесфлюсовой пайки высокотемпературными припоями, новых технологических решений для повышения надёжности соединений, полученных методом ультразвуковой сварки и др.

Реальный срок службы СПП составляет более 30 лет. Большое значение в поддержании высокого качества СПП и ПТ на их основе оказывает действующая на заводе система менеджмента качества, сертифицированная по ГОСТ Р ИСО 9001-2008 (ISO 9001:2008), ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO

9001:2015), Система сертификации на железнодорожном транспорте и деятельность заводской инспекции ОАО «РЖД». Для обеспечения высокого качества приборов действует двухступенчатый контроль качества СПП:

I ступень – это 100%-ный контроль всех важнейших параметров силовых полупроводниковых приборов при нормальной и повышенных температурах;

II ступень – дополнительный контроль параметров и диагностика СПП по специально разработанным и согласованным с потребителями методикам, учитывающим реальные режимы эксплуатации.

В состав завода входит испытательный центр, способный проводить весь комплекс сертификационных испытаний: климатических, механических, надёжностных. Приборы периодически подвергаются испытаниям, включающим в себя и проверки параметров приборов при низких температурах (-60 °С), устойчивости приборов ко всем климатическим и механическим воздействиям по нормам подвижного состава, длительные испытания под нагрузкой током и напряжением и др. Такой уровень контроля гарантирует надёжную работу приборов ПАО «Электровыпрямитель» на электрифицированном транспорте.

ПАО «Электровыпрямитель», являясь одновременно разработчиком и производителем силовых полупроводниковых приборов, укомплектовано высококвалифицированными специалистами и имеет полный технологический цикл для выпуска этой наукоемкой продукции. Понимание соответствующих требований к преобразовательной технике и путей решения вопросов качества и надёжности в сочетании с оптимальной ценой и является, в первую очередь, путём к успеху в создании надёжных СПП и преобразователей для транспорта.



Специализированные IGBT модули для тягового электропривода (серия «КТ»)

Директор НИЦ СПП
ПАО «Электровыпрямитель»

А.В. Гришанин,

Начальник отдела полупроводниковых приборов с полевым управлением
НИЦ СПП ПАО «Электровыпрямитель»

В.Г. Мускатиньев

Тел.: +7 8342 47-1523