

## **IGBT модули для комплектации преобразователей электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями**

А. Т. Бормотов, М. А. Тогаев, Д. В. Пышков, В. Г. Мускатыньев, А. В. Гришанин  
ПАО «Электровыпрямитель», г. Саранск

**Аннотация:** *Описаны особенности конструкции IGBT модулей для применения в тяговом электроприводе железнодорожного транспорта. Представлен ряд IGBT и FRD модулей, разработанных специалистами российского предприятия в условиях санкционных ограничений для перспективного подвижного состава.*

**Ключевые слова:** *IGBT модуль, асинхронный электропривод, энерготермоциклы, прочность изоляции.*

Дальнейшее улучшение тяговых свойств электроподвижного состава будет производиться по пути повышения тягово-энергетических показателей тягового электропривода, с одной стороны, и эффективности использования сцепного веса локомотива, с другой. В настоящее время приоритетным является применение асинхронного тягового привода в электроподвижном составе железных дорог. В его состав входят собственно асинхронный тяговый двигатель и система преобразования электроэнергии. Использование асинхронного тягового двигателя усложняет систему преобразования электроэнергии электровоза и характеризуется высокой степенью взаимосвязи и взаимного влияния процессов между отдельными элементами тягового привода. Это требует использования новых подходов к проектированию.

Сравнительный анализ [1] показывает, что коэффициент мощности асинхронного привода составляет 0,99, что значительно выше по сравнению с 0,65 у коллекторного привода. Коэффициент нелинейных искажений тока асинхронного привода равен 0,15 в сравнении с 0,53 у коллекторного. Коэффициент мощности является важнейшей энергетической характеристикой электровоза и характеризует нагрузку на контактную сеть и устройства энергоснабжения, поэтому эффективность преобразования электрической энергии в асинхронном тяговом приводе электровозов в режиме тяги ощутимо выше. Аналогичное заключение возникает и по коэффициенту нелинейных искажений тока, который является количественной мерой искажений тока, вызванных работой тягового преобразователя.

Создание электроподвижного состава нового поколения тесно связано с развитием преобразовательной техники и, в первую очередь, с разработками и внедрением преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Для опережающего развития средств тяги параллельно с развитием электровозов переменного тока с применением коллекторного привода постоянного тока в настоящее время происходит разработка новых серий электровозов и электропоездов с применением асинхронных двигателей переменного тока.

Появление и постоянное совершенствование силовых полупроводниковых приборов (СПП) с МОП-управлением помогло силовой электронике сделать прорыв в направлении повышения плотности мощности и повышения КПД преобразовательных устройств. Ключевой технологией, обеспечивающей широкий диапазон от нескольких десятков ватт до нескольких мегаватт, стала технология биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT-технология). От начала производства в 1980-х годах первых серийных IGBT они прошли большой путь развития и стали стандартными силовыми ключами во многих областях силовой электроники.

Многокристалльные модули на основе чипов биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и быстровосстанавливающихся диодов (FRD) – одна из самых востребованных групп среди ключевых элементов силовой электроники с высоким уровнем функциональной интеграции. Конструктивно применение беспотенциальных модулей имеет ряд преимуществ: изолированное основание модулей от потенциальных контактов, упрощенный монтаж и ошиновка силовых схем, уменьшенные массогабаритные показатели, меньшая стоимость эксплуатации по сравнению с комплектами приборов табличного исполнения. Развитие модульной конструкции приборов силовой электроники определено постоянно возрастающими параметрами преобразовательного оборудования, их мощностью и степенью интеграции. ПАО «Электровыпрямитель» по направлению мощных транзисторных IGBT и диодных FRD модулей ведет работы более 25 лет. За этот период накоплен значительный опыт и компетенции в области разработки, производства и эксплуатации модулей [2-6]. В линейке разработанной продукции порядка 350 наименований IGBT, FRD модулей в 14 унифицированных конструктивных исполнениях на токи до 4800 А и напряжение до 6500 В, включая гибридные IGBT модули с SiC диодами Шоттки. Габаритно-присоединительные размеры большинства модулей, серийно освоенных в производстве, совместимы с общепринятыми размерами модулей зарубежных аналогов. Возможны следующие варианты схемных исполнений IGBT модулей: одиночный ключ, полумост, чоппер: верхний (с диодом со стороны коллектора) или нижний (с диодом со стороны эмиттера), двунаправленный ключ (с общим эмиттером), два ключа, одиночный ключ без диода обратного тока, чоппер с диодом инверсной полярности.

### **Особенности конструкции и технологии изготовления модулей для транспорта**

При сборке многокристалльных модулей применяется внутреннее параллельное соединение чипов, изготовленных по различным технологическим процессам. В первую очередь именно характеристики применяемых чипов определяют систему выходных статических и динамических параметров модулей.

Тяговые преобразователи эксплуатируются в значительно тяжёлых режимах, связанных с многочисленными циклами «разгон – выбег – торможение». Для этих целей разработана линейка специализированных IGBT модулей серии «Т» для тягового электропривода железнодорожного транспорта. IGBT модули в процессе эксплуатации подвергаются большому количеству энерготермоциклов, которые постепенно разрушают их конструкцию из-за различия коэффициентов

термического расширения компонентов силовых модулей. В IGBT модулях транспортного исполнения для повышения их энерготермоциклостойкости используются более сложные, в сравнении с модулями для общепромышленного применения, технологические и конструкционные решения. 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 конструкторско-технологических решений для повышения надёжности соединений, полученных методом ультразвуковой сварки и др.

Обеспечение необходимой электрической прочности изоляции между основанием и потенциальными токовыводами модуля – необходимое условие их безотказной работы. Электрическая прочность изоляции  $V_{isol}$  большинства модулей находится в пределах 2500 – 6000 В RMS (для общепромышленного исполнения) и 4000 – 10200 В RMS (для модулей транспортного исполнения). Для отдельных типов модулей разработаны конструктивы с повышенным значением  $V_{isol}$  (13000 В RMS), которое обеспечивается конструктивно-технологическими особенностями модулей. В качестве изоляторов для модулей транспортного исполнения применяются металлокерамическими платами на основе нитрида алюминия. Внутренний объем модуля заполняется компаундами с высокими диэлектрическими свойствами, который обеспечивает изоляцию внутри модуля и защиту чипов IGBT и FRD от воздействия внешней среды и прямого попадания влаги. Дополнительными способами снижения напряженности электрических полей внутри корпуса является оптимальная конструкция деталей, определяемая для каждого типоразмера. При производстве модулей используются конструкционные пластмассы, допускающие эксплуатацию в широком диапазоне температур, от минус 80 до плюс 150 °С. Большинство конструкционных деталей модулей изготавливается из отечественных материалов на собственных производственных мощностях: для изготовления металлических деталей применяются автоматизированные механообрабатывающие станки и универсальные фрезерные центры, корпусные детали из пластмасс производятся посредством литья на термопластавтоматах. Все применяемые материалы пожаробезопасны и относятся к классу самозатухающих и не поддерживающих горение.

Модули для тягового электропривода изготавливаются с использованием конструкционных материалов с минимальным разбросом коэффициентов термического расширения, поэтому цена этих изделий является более высокой по сравнению с модулями общепромышленного применения.

Из-за введения санкционных ограничений доступ к ряду ранее применявшихся компонентов был приостановлен, в связи с чем в ранее освоенные изделия потребовалось внести изменения. В период 2022-2024 гг. произведена доработка и освоено производство ряда мощных модулей 12, 17 и 33 класса.

В периметре группы ТМХ ведутся проекты по разработке перспективного подвижного состава на базе тягового привода с асинхронными электродвигателями. Специалистами ООО «ТМХ-Инжиниринг» разработана линейка преобразователей для подвижного состава электровозов, тепловозов (магистральных и маневровых), унифицированной платформы моторвагонного подвижного состава, включая

водородный поезд. В условиях санкционных ограничений и дефицита доступа к ряду высокотехнологичных электронных компонентов, в ТМХ принята стратегия по унификации на уровне компонентов, в том числе IGBT модулей. Преобразователи для тягового привода подвижного состава современных электровозов 2ЭС9, ЭП21(22), 2ЭС5С, водородного поезда В-Пегас, силового электрооборудования тепловоза 3ТЭ30Г реализованы по схемам многоуровневых инверторов напряжения на базе IGBT модулей с блокирующим напряжением 3300 В.

Для удовлетворения потребностей комплектации серии преобразователей и электрооборудования подвижного состава разработана новая серия модулей МТКИ-1500-33Т, М2ДЧ-1200-33Т, МДЧ-800-33Т, МТКИ-1500-33ТВ, М2ДЧ-1200-33ТВ на напряжение 3300 В. Модули серии «Т» выполнены в корпусах с электрической прочностью изоляции 6,0 кВ (рисунок 1), серии «ТВ» – 10,2 кВ (рисунок 2). На текущий момент изготовлены и испытаны опытные партии модулей, в том числе на устойчивость к перегрузкам и воздействию токов короткого замыкания, и реализуются мероприятия по подготовке производства к их серийному выпуску.

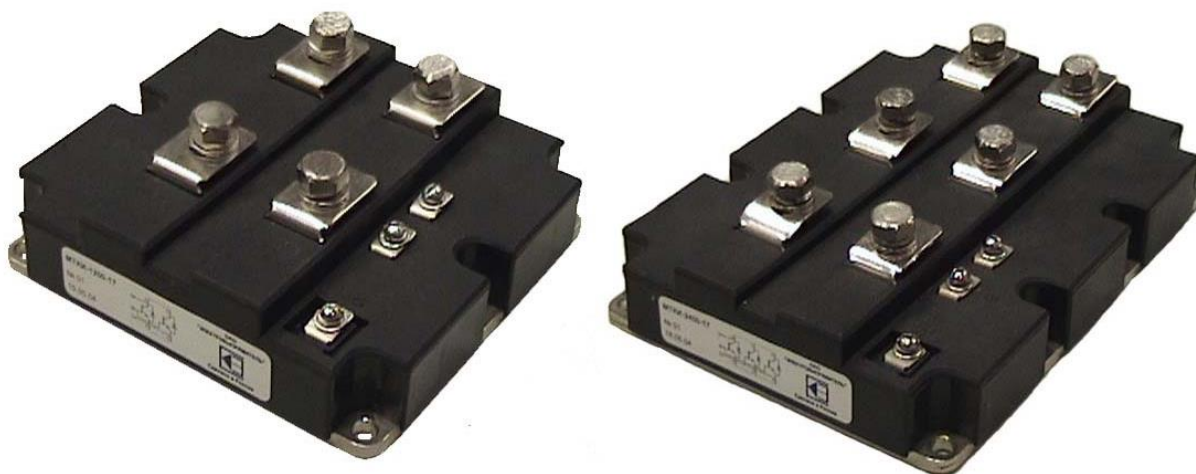


Рисунок 1 – Конструктивы модулей серии «Т»



Рисунок 2 – Конструктивы модулей серии «ТВ»

**Список использованных источников:**

1 А. А. Зарифьян, А. М. Евстафьев. Показатели качества потребления энергии в коллекторном и асинхронном тяговых приводах электровозов переменного тока // Известия ПГУПС, Санкт-Петербург - 2023. с. 987-998.

2 Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей. Часть 3. Влияние параметров цепи управления на коммутационные характеристики / В. Мускатиньев, А. Бормотов, А. Гришанин, М. Тогаев, Д. Пышков, И. Федяев // Силовая электроника. 2020. № 6. С. 22-25.

3 Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей. Часть 2. Еще раз о высокой частоте и малых токах / В. Мускатиньев, М. Тогаев, Д. Немаев, А. Бормотов, Д. Пышков, И. Федяев // Силовая электроника. 2020. № 3. С. 24-27.

4 Влияние параметров цепи управления на коммутационные характеристики высоковольтных IGBT модулей / В. Мускатиньев, М. Тогаев, А. Бормотов, И. Федяев, Д. Пышков // Международная конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2020). Россия, Санкт-Петербург, 4–7 октября 2020.

5 Параметры и характеристики IGBT-модулей на напряжение 1200 В при низких температурах / В. Мускатиньев, М. Тогаев, В. Мартыненко, А. Бормотов // Силовая электроника. 2018. № 5. С. 98-100.

6 А.Т. Бормотов, В.Г. Мускатиньев, А.В. Гришанин. IGBT модули для тягового электропривода рельсового подвижного состава // Техника железных дорог. № 1. 2025 г.