

## Современные силовые полупроводниковые приборы для железнодорожного транспорта

А.В. Ставцев

Технический директор, АО "Протон-Электротекс"

### *Аннотация*

*Силовые полупроводниковые приборы играют ключевую роль в современных тяговых приводах железнодорожного транспорта и системах собственного электроснабжения поездов. Преобразователи, используемые в железнодорожной отрасли, оснащаются мощными полупроводниковыми приборами. Эволюция элементной базы — от простых диодов и тиристоров до биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и современных транзисторов на основе широкозонных материалов, таких как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), — позволила существенно повысить энергоэффективность, точность регулирования и надежность преобразовательной техники [1]. Новые полупроводниковые технологии обеспечивают более высокую эффективность и плотность мощности по сравнению с традиционными кремниевыми компонентами [2]. Железнодорожный сектор активно стимулирует спрос на такие инновации, что обусловлено стремлением к энергосбережению и снижению стоимости жизненного цикла.*

*Параллельно с развитием новых технологий возрастают требования к надежности силовых приборов. Железнодорожный транспорт характеризуется длительным сроком службы подвижного состава и экстремальными условиями эксплуатации, включая электрические перегрузки, вибрации и значительные перепады температуры окружающей среды. В связи с этим вопросы устойчивости приборов к многократным термоциклам, методы ускоренных испытаний и модели прогнозирования ресурса становятся ключевыми при проектировании и производстве силовых полупроводниковых приборов.*

*В данной статье представлен расширенный обзор современных силовых полупроводниковых приборов, применяемых в железнодорожной технике, с акцентом на энергоэффективность, надежность, долговечность и снижение стоимости жизненного цикла. Проведено сравнение различных технологий, включая тиристоры, IGBT и SiC MOSFET.*

**Ключевые слова:** Силовые полупроводниковые приборы, тиристоры, IGBT, SiC MOSFET, железнодорожный транспорт.

### **Тенденции развития преобразовательной техники для железнодорожного транспорта**

Железнодорожный электрический транспорт играет ключевую роль в экономическом, социальном и техническом развитии мирового сообщества. Он обеспечивает грузовые и пассажирские перевозки, способствует развитию городов и промышленности, а также представляет собой экологичную и энергоэффективную

альтернативу другим видам транспорта. Кроме того, железнодорожный транспорт является драйвером научно-технического прогресса в широком спектре отраслей промышленности.

В последние десятилетия железнодорожный транспорт развивается стремительными темпами. Современные проекты в этой области ориентируются на следующие направления:

- Высокоскоростные поезда;
- Водородные, гибридные и полностью электрические локомотивы;
- Бесшумный городской электротранспорт (метро, трамваи, электрички);
- Поезда на магнитной подушке.

Все эти сегменты требуют использования эффективных, компактных, легких и надежных тяговых преобразователей и преобразователей собственных нужд, способных работать при высоких напряжениях и повышенных частотах коммутации.

К создаваемым образцам преобразовательной техники предъявляются следующие требования:

- Повышение надежности и срока службы;
- Снижение стоимости жизненного цикла и эксплуатационных расходов;
- Увеличение КПД и энергоэффективности в целом;
- Уменьшение массогабаритных показателей;
- Минимизация негативного воздействия на качество электроэнергии питающей сети.

Ключевым элементом преобразовательной техники являются силовые полупроводниковые приборы, которые во многом определяют их базовые характеристики. Таким образом, потенциал и развитие силовых полупроводниковых приборов напрямую влияют на технические возможности преобразователей для железнодорожного транспорта и, в конечном итоге, на характеристики подвижного состава в целом.

### **Требования к современным силовым полупроводниковым приборам**

Исходя из требований, предъявляемых к современной преобразовательной технике для железнодорожного транспорта, формируются соответствующие требования к силовым полупроводниковым приборам, используемым в этой отрасли. Одним из ключевых требований является повышение плотности тока, которое достигается за счёт снижения динамических и статических потерь, увеличения максимальных рабочих температур и улучшения тепловых характеристик приборов.

Кроме того, для улучшения потребительских свойств преобразовательной техники необходимо повышение частоты коммутации, что требует снижения паразитных индуктивностей в конструкции приборов и оптимизации распределения токов по токоведущим цепям.

Не менее важным требованием является повышение ресурса и надёжности приборов. В условиях интенсивной эксплуатации железнодорожного транспорта долговечность и стабильность работы силовых полупроводниковых приборов становятся критически важными параметрами.

Современные тенденции также включают требования к повышению степени интеграции, что позволяет создавать более компактные и функциональные

устройства. При этом разработка кастомизированных решений под конкретные задачи железнодорожной отрасли становится всё более востребованной, обеспечивая оптимальное сочетание характеристик и стоимости. Наконец, снижение стоимости удельной мощности остаётся важным экономическим требованием, позволяющим внедрять передовые технологии без значительного увеличения затрат. Это особенно актуально для массового применения в железнодорожной инфраструктуре.

Таким образом, современные силовые полупроводниковые приборы для железнодорожной отрасли должны сочетать высокую эффективность, надёжность, компактность и экономичность, что требует постоянного совершенствования технических решений и технологии их производства.

### **Классические решения на тиристорах**

Несмотря на доминирование транзисторных технологий в современных технических решениях, тиристоры не утратили своей актуальности и продолжают использоваться в силовых системах железнодорожного транспорта. Во-первых, значительное количество эксплуатируемой техники оснащено тиристорными преобразователями. Например, в России и странах СНГ до сих пор работают тысячи электровозов постоянного тока с тиристорными регуляторами. Эти системы зарекомендовали себя как надёжные и легко ремонтируемые, а внедрение техники на основе IGBT происходит постепенно, по мере износа существующего парка или при необходимости повышения эффективности. Во многих случаях тиристорные схемы остаются простыми, хорошо освоенными и экономически выгодными в эксплуатации.

Тиристоры классического типа также активно применяются во вспомогательных узлах и инфраструктуре железных дорог. Например, в выпрямительных блоках тяговых подстанций для питания контактной сети постоянного тока предпочтение отдается мощным кремниевым тиристорам и диодам, благодаря их высокой эффективности и надёжности. Там, где не требуется быстрого переключения, и коммутация может осуществляться за счет перехода тока через ноль, тиристоры остаются оптимальным решением по соотношению цена/потери. Кроме того, тиристоры используются в устройствах плавного пуска и рекуперативного торможения электропоездов на постоянном токе. Например, схема рекуперации может включать полууправляемые тиристоры, которые возвращают избыточную энергию обратно в контактную сеть или направляют её на тормозной резистор. Ещё одно важное применение – защитные устройства: тиристоры могут функционировать в качестве электронных предохранителей или коммутаторов, отключая цепь при превышении допустимого тока. В новых составах такие функции часто выполняют быстродействующие выключатели на основе IGBT (Solid State Circuit Breaker), однако тиристорные аналоги (TSCB) также существуют и могут быть более надёжными, поскольку тиристор в открытом состоянии обладает крайне низким сопротивлением и способен выдерживать огромные импульсные токи (десятки кА) в течение короткого времени.

Производители продолжают совершенствовать характеристики тиристоров. Современные быстродействующие тиристоры обладают сокращённым временем

выключения, что расширяет область их применения. Появились тиристоры с элементами самозащиты, способные корректно переключаться при превышении предельного значения  $dV/dt$ , перенапряжении или приложении повторного напряжения в момент неполного восстановления. Также разработаны тиристоры с повышенной устойчивостью к циклическим нагрузкам. Таким образом, тиристоры остаются важной частью силовой электроники железных дорог, хотя их применение ограничивается более узкими сегментами: либо в существующем парке, где их ресурс еще не исчерпан, либо в специализированных задачах, требующих уникальных свойств (например, способности выдерживать сверхбольшие перегрузочные токи). В целом наблюдается тенденция к замене тиристорной техники на решения с использованием IGBT/SiC там, где это экономически и технически оправдано. Однако для некоторых задач классические тиристоры еще долгое время будут использоваться параллельно с современными технологиями.

### **Сравнение технических решений на основе тиристоров с современными подходами на базе IGBT, SiC и GaN MOSFET**

#### **Тиристоры**

Различные поколения силовых приборов обладают уникальными преимуществами и ограничениями, которые определяют их область применения в тяговых приводах. Тиристоры были основой тяговой электроники в 1970–1990-х годах. Тиристор имеет четырёхслойную структуру p-n-p-n и управляется токовым импульсом на управляющем электроде. После открытия он остается в проводящем состоянии до тех пор, пока анодный ток не снизится до нуля. Это означает, что обычный тиристор не может самостоятельно отключаться – для этого требуется либо естественная коммутация от сети, либо использование внешних цепей принудительного гашения.

#### ***Достоинства тиристоров***

1. Высокая устойчивость к токовым перегрузкам: Тиристоры способны выдерживать значительные токи короткого замыкания, что делает их надежными в условиях возникновения нештатных ситуаций.

2. Низкие статические потери: В открытом состоянии тиристоры имеют минимальные потери, что повышает их энергоэффективность. В проводящем состоянии тиристор ведет себя как диод с малым падением напряжения ( $\sim 1,5\text{--}2\text{ В}$ ), тогда как у IGBT падение напряжения насыщения может составлять  $2\text{--}3\text{ В}$ . Это обеспечивает более высокий КПД в мощных системах с относительно низкой частотой коммутации, где тиристоры демонстрируют меньшие потери на проводимость.

3. Высокая циклоустойчивость и ресурс: Тиристоры обладают длительным сроком службы и устойчивостью к многократным температурным циклам.

4. Надежность и отработанность решений: благодаря многолетнему опыту применения, схемы на основе тиристоров хорошо изучены и отличаются высокой надежностью.

## Ограничения тиристоров

1. Низкая частота коммутации: Тиристоры не способны работать на высоких частотах, что ограничивает их применение в современных высокочастотных системах.

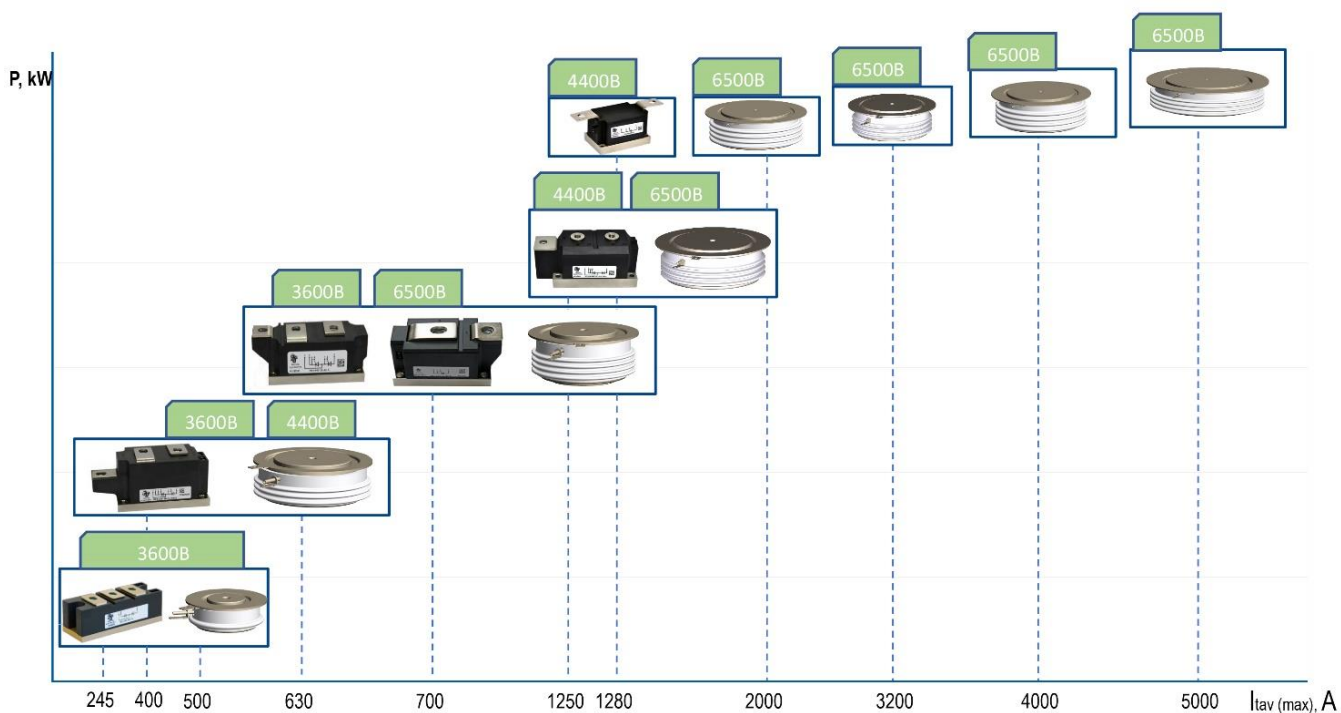
2. Необходимость сложных схем управления: для отключения тиристоров требуются дополнительные цепи, что усложняет конструкцию и увеличивает стоимость системы.

3. Высокие динамические потери: при переключении тиристоры теряют значительное количество энергии, что снижает общую эффективность системы.

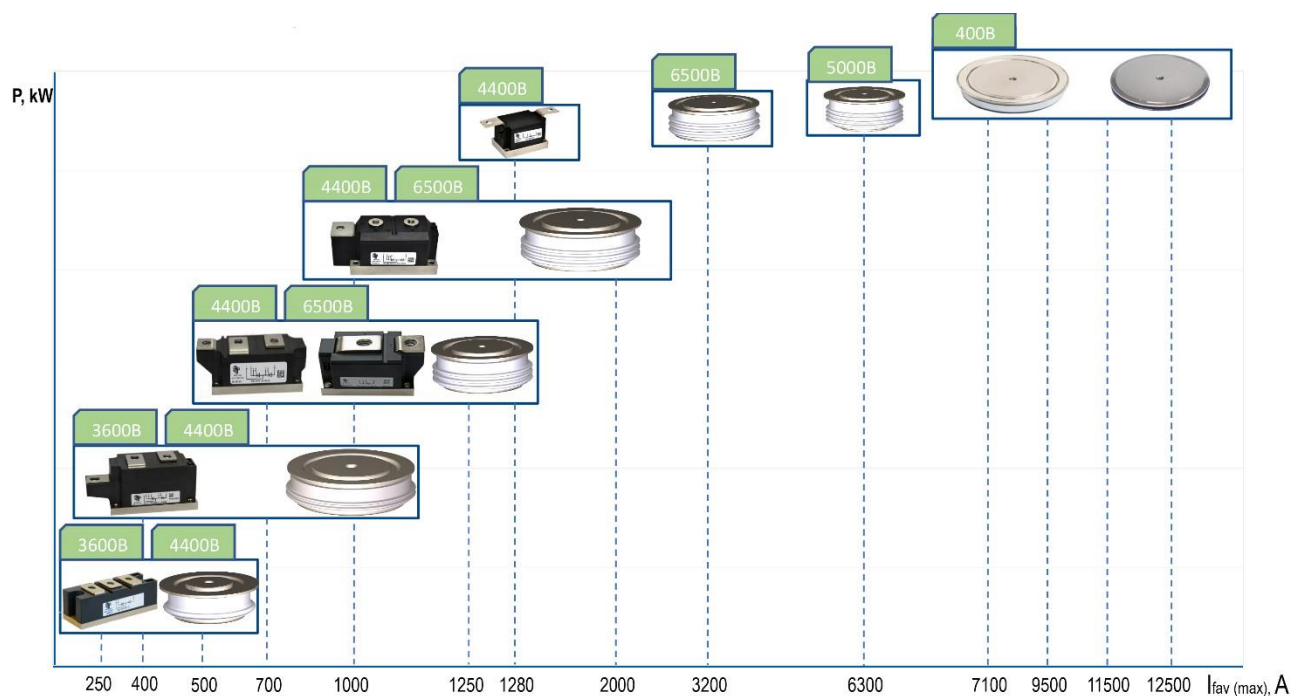
4. Низкая скорость переключения: В схемах на тиристорах невозможно быстро изменить режим работы, что приводит к заметным пульсациям тока и необходимости использования больших сглаживающих реакторов.

Линейка отечественных тиристоров охватывает диапазон напряжений от 800 В до 6500 В с возможностью расширения до 8000 В. Средние токи варьируются от нескольких сотен до нескольких тысяч ампер. Приборы выпускаются в прижимной конструкции в модульном, таблеточном и штыревом исполнениях. Помимо низкочастотных тиристоров, адаптированных для групповой работы в последовательно-параллельных схемах, существуют также высокочастотные тиристоры, которые применяются в подвижном составе железнодорожного транспорта.

Линейка отечественных тиристоров и диодов на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведена на рисунке 1 и 2.



**Рисунок 1.** Часть линейки отечественных силовых тиристоров на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"



**Рисунок 2.** Часть линейки отечественных силовых диодов на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"

## IGBT

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) совершили качественный скачок в тяговой электронике начиная с 1990-х годов. IGBT представляет собой трехслойный прибор (p-n-p) с MOSFET-структурой управления затвором, объединяющий достоинства биполярного транзистора (высокая токовая нагрузочная способность, низкое напряжение насыщения) и MOSFET (высокое входное сопротивление, управление напряжением). В отличие от тиристора, IGBT – полностью управляемый ключ, способный включаться и выключаться по сигналу затвора в любое время, независимо от тока через него. Это упрощает управление током и позволяет работать на значительно более высоких частотах.

### *Достоинства IGBT:*

- Высокая частота коммутации. IGBT может переключаться на частоте до нескольких килогерц. Благодаря этому тяговые инверторы на IGBT формируют ток почти синусоидальной формы с минимальными пульсациями, что улучшает плавность хода, снижает нагрев двигателей и акустический шум. Также более высокая частота ШИМ позволяет использовать двигатели без массивных сглаживающих дросселей.

- Простота реализации схем и монтажа. Модули IGBT с изолированным основанием достаточно легко монтировать на охладитель и подключать к ним силовые шины. Не требуются сложные и массивные снабберные цепи, обязательные для тиристоров. Кроме того, IGBT-модули легко включать параллельно для увеличения тока и последовательно для повышения напряжения, практически без сложных согласующих цепей (достаточно небольших RC-фильтров для равномерного распределения напряжения) [1]. Это существенно облегчает создание многоуровневых и многомодульных систем.

- Защищенность от аварий. IGBT обладает встроенной способностью ограничивать ток при коротком замыкании. В режиме КЗ транзистор входит в насыщение и удерживает ток на уровне порядка 5 номиналов, после чего за десятки микросекунд может быть выключен сигналом затвора. Таким образом, IGBT способен пережить короткое замыкание без разрушения, в то время как для тиристорных схем необходимы специальные быстрые предохранители или разрядники, иначе прибор выходит из строя. Это свойство существенно повышает надежность и живучесть тяговых преобразователей с IGBT.

- Низкие динамические потери. Относительно низкие динамические потери IGBT позволяют их использовать на повышенных частотах и эффективно организовывать отвод выделяемого тепла.

- Высокая плотность мощности. По совокупности факторов IGBT модули дают возможность построить более эффективные преобразователи по плотности мощности - Решения на IGBT обладают меньшими размерами и массой при одинаковой мощности преобразователя по сравнению с решениями на тиристорах.

### ***Ограничения IGBT***

- Ограниченная перегрузочная мощность в режиме короткого замыкания – тиристоры выдерживают токи перегрузки в несколько десятков крат по отношению к номиналу, в отличии от IGBT, которые выдерживают порядка 5 кратное превышение тока и в случае затруднений с выключением транзистора в данном режиме возможен выход его из строя.

- Относительно низкая циклоустойкость. Более низкая циклоустойкость и ресурс IGBT приборов в массовом модульном исполнении с изолированным основанием по сравнению тиристорами прижимной конструкции.

- Высокие статические потери. Что не позволяет построить эффективное техническое решение, где преобладают статические режимы работы.

В преобразователях собственных нужд применяются IGBT приборы на 1200В и 1700В. В основном применяется решение на 1700В.

В тяговом преобразователе востребованы транзисторы:

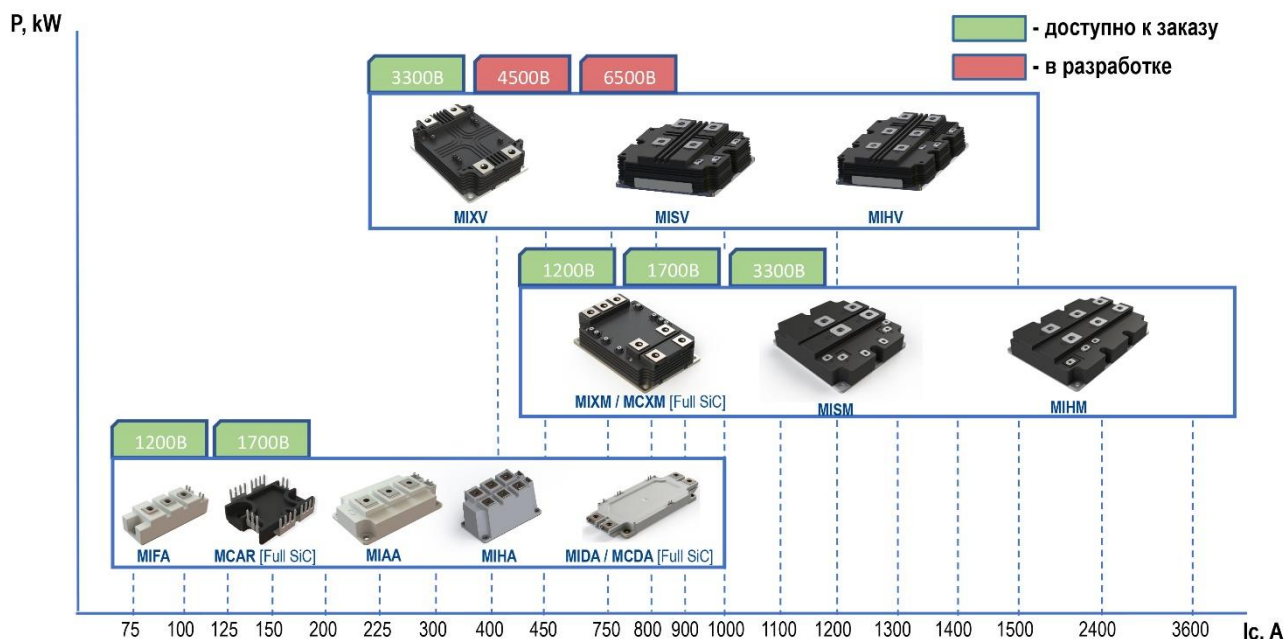
- 1700В - преимущественно для метрополитена;

- 3300В - тепловозы и электровозы, в том числе построенные по многоуровневой схеме;

- 4500В - электровозы ;

- 6500В - маневровые электровозы, электрички типа Ласточка и Иволга, высокоскоростные поезда типа Сапсан.

Линейка отечественных IGBT модулей на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведена на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Линейка отечественных силовых IGBT и SiC на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс"

### SiC MOSFET

SiC MOSFET сравнительно недавно начал применяться в железнодорожной технике. По принципу действия это полевой транзистор с изолированным затвором, аналогичный кремниевому MOSFET, но изготовленный на основе карбида кремния с широкой запрещённой зоной  $\sim 3,2$  эВ (в сравнении с 1,1 эВ у кремния). Благодаря материалу SiC MOSFET сочетает высокое рабочее напряжение и устойчивость к повышенным температурам с крайне низкими потерями на переключение. По сравнению с IGBT, у SiC MOSFET коммутационные потери значительно ниже. Он способен работать на частотах в десятки килогерц даже при напряжениях класса 3,3–6,5 кВ, в то время как кремниевый IGBT ограничен частотами в единицы килогерц. SiC MOSFET — это прибор, управляемый напряжением (как и IGBT), имеющий паразитный обратный диод. В контексте железнодорожной техники SiC MOSFET рассматривается как преемник IGBT для новых поколений тяговых преобразователей, что позволяет ещё больше снизить потери и уменьшить габариты оборудования.

#### *Ключевые преимущества SiC MOSFET:*

- Значительно меньшие коммутационные потери;
- Более низкие статические потери при малых и средних токах;
- Возможность работы при температуре кристалла 175–200 °С без ухудшения надёжности;
- Возможность работы в третьем квадранте, то есть пропускание обратного тока через транзистор, что имитирует встречно-параллельный диод. Это позволяет уменьшить габариты силовых полупроводниковых приборов по сравнению с IGBT и исключить высокие перепады температур в цикле работы транзистора и встречного диода.

### ***Ограничения SiC MOSFET:***

- Высокая стоимость;
- Сложность производственной технологии;
- Недостаточно изученные вопросы долговечности (например, надёжность подзатворного оксида и встроенного диода при длительной эксплуатации);
- Сложность обеспечения электромагнитной совместимости (EMC);
- Высокие скорости фронтов тока и напряжения, что может повредить изоляцию трансформатора или двигателя;
- Проектирование полупроводников и преобразователя в целом требует специфических знаний.

Тем не менее, в испытательных и опытных образцах подвижного состава SiC-инверторы продемонстрировали улучшение КПД и снижение потерь на ~10–15% по сравнению с лучшими аналогами на основе IGBT [3]. Это напрямую способствует энергосбережению и снижению тепловой нагрузки на систему охлаждения. Отечественные силовые SiC MOSFET на примере продукции компании АО "Протон-Электротекс" приведены на рисунке 3.

### **GaN HEMT**

GaN HEMT (транзисторы на основе нитрида галлия) по параметрам дополняют SiC MOSFET. Они обладают еще более высокой скоростью переключения и малой емкостью затвора, что минимизирует потери на высоких частотах. GaN-приборы имеют смысл применять там, где требуются очень высокие частоты (сотни кГц и выше) и сравнительно невысокое напряжение. В железнодорожном транспорте GaN может найти применение во вспомогательных преобразователях, источниках бесперебойного питания, системах отопления/кондиционирования вагонов – для повышения эффективности и уменьшения размеров этих устройств. Для основных тяговых цепей GaN-технология пока не обеспечивает нужных уровней напряжения и тока, но такие разработки ведутся. Несомненный плюс GaN – крайне низкие потери при высокочастотной работе, позволяющие существенно снизить массу фильтров и катушек, а значит, и общий вес оборудования. Ожидается, что по мере совершенствования технологий GaN займет свою нишу наряду с SiC в системах железнодорожной электроники.

### **Перспективные направления**

Современные тенденции развития силовых полупроводниковых приборов для железнодорожного транспорта направлены на дальнейшее повышение эффективности, интеграцию интеллектуальных функций и освоение новых материалов. Рассмотрим некоторые перспективные направления:

1. Интеллектуальные силовые модули (IPM, Intelligent Power Module). Это силовые модули, объединяющие в одном корпусе не только собственно транзисторы/диоды, но и встроенные драйверы управления, датчики тока, температуры, а также схемы защиты и диагностики. IPM изначально появились для промышленной автоматике и электроприводов, но все более актуальны и для тяговых преобразователей железнодорожной техники. Преимущества очевидны: высокая степень интеграции упрощает разработку системы, сокращает число

внешних компонентов и повышает надежность за счет оптимального согласования внутри модуля. Например, типовой IPM содержит встроенные защиты от перенапряжения, превышения тока, перегрева, а также выводит диагностические сигналы контроллеру [4]. В случае аварии такой модуль способен самоотключиться быстрее, чем сработает внешняя защита, предотвращая повреждение силовых элементов. Благодаря близости драйвера и транзисторов внутри корпуса уменьшается паразитная индуктивность и улучшается управление – можно достичь оптимальных быстрых фронтов без риска перенапряжений, что важно для SiC/GaN приборов. Для железнодорожной техники создание высоковольтных IPM-модулей (напряжением 3,3 кВ и выше) с интегрированными функциями станет большим шагом вперед, позволяющим упростить топологию преобразователей и улучшить их отказоустойчивость.

2. Системы мониторинга состояния и предиктивная диагностика. Внедрение датчиков и электронных измерителей прямо в силовые модули открывает возможность непрерывно контролировать их состояние. Перспективным является встроенный мониторинг параметров силового элемента: падения напряжения на открытом приборе, времени переключения, утечек, температуры кристалла, изменение теплового сопротивления и др. Уже сейчас реализуются решения, где каждая силовая ячейка снабжена микроконтроллером, собирающим такие данные и передающим их в центральную систему диагностики. Сочетание этих данных с алгоритмами машинного обучения позволит прогнозировать срок службы с высокой точностью. Для железнодорожных операторов это чрезвычайно важно – переход от планово-профилактического обслуживания к обслуживанию по состоянию позволяет снизить издержки и избежать внеплановых простоев. Можно предположить, что в новых поколениях тяговых преобразователей появятся “умные” силовые шкафы, способные сами сигнализировать о необходимости замены определенного модуля задолго до его отказа.

3. Новые полупроводниковые материалы и приборы будущего. Помимо SiC и GaN, которые уже вошли в практику, в лабораториях ведутся разработки силовых приборов на алмазе и других ультраширокозонных полупроводниках (оксид галлия Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нитрид алюминия AlN и др.). Алмазные транзисторы обещают невиданные характеристики: ширина запрещенной зоны ~5,5 эВ, критическое электрическое поле пробоя порядка 10 МВ/см, теплопроводность в 3–5 раз выше, чем у меди. Теоретически алмазные приборы могли бы работать при температурах >300 °С, коммутировать тысячи вольт на частотах в сотни килогерц, практически без потерь. За алмазом закрепилось название “крайний” или “ультимативный” полупроводник будущего, способный вывести электронику на новый уровень эффективности [5]. Уже достигнуты первые успехи: созданы опытные диоды Шоттки на алмазе с пробивными напряжениями порядка 5–10 кВ [6]), отработаны технологии легирования алмаз для создания p-n переходов. В 2021 году японские инженеры сообщили о первом n-канальном алмазном транзисторе, открывшем путь к полностью алмазным приборам [7]. Практическое применение алмаза пока сдерживается трудностями: малый размер доступных монокристаллов, сложность легирования, очень высокая стоимость. Но перспективы внушительны: алмазные силовые транзисторы потенциально смогут радикально уменьшить габариты и массу

тяговых преобразователей, практически устранив ограничения по нагреву и потери на проводимость [5], что приведет к упрощению охлаждения, снижению энергопотерь и даже удешевлению обслуживания и миниатюризации охлаждающих устройств. Ожидается, что алмазные приборы найдут нишу в сверхответственных применениях (например, авиация, космос) в течение ближайших 10–15 лет, а затем по мере удешевления могут прийти и в наземный транспорт, в т.ч. железные дороги.

4. Новые методы охлаждения и компоновки. Параллельно с развитием самих приборов идут инновации в области их охлаждения. Появляются решения по двухстороннему охлаждению силовых модулей (охлаждение с обеих сторон чипа для равномерного отвода тепла) и использование тепловых трубок.

5. Глубокая интеграция комплектного электропривода. Также рассматривается интеграция силовых модулей непосредственно на тяговых двигателях – интегрированный привод, где инвертор крепится на корпус двигателя – это сокращает длину кабелей, уменьшает потери и помехи. Все это требует очень надежных и компактных силовых компонентов, что становится возможным благодаря новым полупроводникам.

5. Улучшение характеристик IGBT. Нельзя забывать, что и традиционные кремниевые IGBT продолжают совершенствоваться. В настоящее время доступны IGBT VII поколения с еще более низким падением напряжения и возможностью работы при +175 °С. На подходе технологии с тонкопленочным затвором и новые конструкции ячеек, снижающие паразитные емкости и повышающие скорость. Это означает, что даже перед лицом конкуренции SiC, кремниевые приборы будут оставаться востребованными за счет оптимального сочетания цены и отличных характеристик в своем диапазоне. Более того, появляется концепция гибридных модулей, где в одном корпусе используются и кремниевые IGBT, и SiC-диоды (для снижения обратных потерь), или параллельное включение SiC MOSFET и IGBT для сочетания их преимуществ (SiC берет на себя быстрые переключения, IGBT – проведение больших токов).

### **Надежность силовых полупроводников**

Надёжность силовых полупроводниковых приборов – критически важный параметр в железнодорожной технике, где отказ тягового привода может вывести из строя целый поезд и повлиять на безопасность движения. При проектировании преобразователей закладывается ресурс, рассчитанный на десятилетия интенсивной эксплуатации (до 30 лет, что эквивалентно миллионам циклов нагрузки).

Для обеспечения высоких требований к качеству силовых полупроводниковых приборов, применяемых на железнодорожном транспорте, деятельность компании-производителя должна быть организована соответствующим образом как в области разработки, так и испытаний и в целом система качества менеджмента должна быть нацелена на выпуск продукции, соответствующей высоким требованиям железнодорожной отрасли.

### **Разработка**

На этапе разработки, по сути, закладывается качество будущей продукции и её себестоимость. Для гарантированного обеспечения качества необходимо применять

методы оценки технических рисков и выстраивать целенаправленную работу по их снижению за счёт технических решений и (или) внедрения специализированных методов контроля при квалификации продукции или во время серийного производства.

### ***Испытания***

Реализуется комплекс испытаний, направленный как на определение базовых технических характеристик разрабатываемых и производимых приборов, так и на комплексное исследование и подтверждение высокого уровня надёжности продукции.

Объём базовых испытаний на надёжность на примере IGBT-модулей, выпускаемых компанией АО "Протон-Электротекс", приведён ниже. При этом общее количество испытаний превышает 125 для квалификации одного типа IGBT-модуля:

1. Стабильность утечек по затвору (HTGB);
2. Стабильность утечек по цепи коллектор-эмиттер (HTRB);
3. Стабильность утечек по цепи коллектор-эмиттер при повышенной влажности (H3TRB);
4. Электротермоциклирование;
5. Термоциклирование;
6. Тепловой удар;
7. Вибрация;
8. Механический удар;
9. Низкотемпературное хранение;
10. Высокотемпературное хранение;
11. Соляной туман;
12. Хранение при повышенной влажности.

### ***Система качества менеджмента***

Для обеспечения качества выпускаемой продукции система менеджмента должна гарантировать воспроизводимость её характеристик. Для этого необходимо автоматизировать бизнес-процессы компании, внедрить системы менеджмента качества, включая общепромышленную - ISO 9001 и специализированную для железнодорожного транспорта - IRIS, а также регулярно подтверждать применяемые подходы аудитами со стороны клиентов.

Ниже приведён подход в области менеджмента качества российской компании АО "Протон-Электротекс", поставляющей силовые полупроводниковые приборы для железнодорожной отрасли.

*Сертификаты соответствия:*

- ISO 9001:2015;
- ISO 14001:2015;
- ISO/TS 22163:2017 (IRIS).

*Автоматизация бизнес-процессов:*

- 100% основных бизнес-процессов компании автоматизированы с помощью ERP-системы;
- 40% вспомогательных и обеспечивающих процессов автоматизированы с помощью BPM-системы;

- Оставшиеся процессы качественно документированы.

*Методы менеджмента качества:*

- Применяется система анализа технических рисков конструкции – DFMEA;

- Применяется система анализа технических рисков технологии производства – PFMEA;

- Проводится оценка воспроизводимости ключевых технологических процессов с использованием статистических методов – SPC;

- Проводится оценка воспроизводимости измерений с использованием статистических методов – MSA;

- Применяются методы выявления коренных причин и анализ проблем: 8D, "5 Почему".

*Пройденные аудиты со стороны клиентов, связанных с железнодорожной промышленностью:*

- General Electric (США);

- ТМХ (Россия);

- ABB (Швейцария);

- Alstom (Франция);

- Schneider Electric (Франция);

- Fuji (Япония).

### **Заключение**

Отрасль силовой полупроводниковой электроники для железнодорожного транспорта находится в фазе динамичного развития. Новые материалы и интеллектуальные технологии открывают возможности для создания еще более эффективных, надежных и “умных” тяговых преобразователей. Это, в свою очередь, будет способствовать появлению более энергоэффективных и экономичных поездов, с меньшими затратами на их жизненный цикл и лучшими эксплуатационными качествами. Инженерам, занимающимся разработкой и эксплуатацией железнодорожной техники, важно следить за этими трендами, чтобы своевременно внедрять передовые решения и сохранять конкурентоспособность подвижного состава в современных условиях.

### **Литература**

1. Силовые полупроводниковые приборы. В центре тихой революции. URL: <https://library.e.abb.com>

2. Silicon Carbide Power Components For Mireo Plus B Units. URL: <https://www.railrevolution.net>

3. Towards more efficient, Silicon Carbide-based traction systems. URL: <https://rail-research.europa.eu>

4. Intelligent Power Modules provide excellent protection for industrial equipment. URL: <https://www.arrow.com>

5. The transistor of the future. URL: <https://compoundsemiconductor.net>

6. Diamond Power Electronics: From 1kV towards 10kV Breakdown. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>

7. New diamond transistor is a world-1st - paving the way for high. URL: <https://www.livescience.com>