

Современная отечественная элементная база

для силовой преобразовательной техники

Силовые полупроводниковые приборы являются важнейшей элементной базой каждого преобразовательного устройства. Так же, как и электронные компоненты схем управления, эти приборы оказывают большое влияние на эффективность всей преобразовательной системы.

**Валентин Мартыненко
Вячеслав Мускатиньев
Владимир Чибиркин
Вячеслав Елисеев**

martin@moris.ru

Введение

Развитие силовых полупроводниковых приборов (СПП) в России определяется состоянием отечественного рынка преобразовательной техники, а также мировыми тенденциями развития силовой электроники. По-прежнему востребованы стандартные биполярные приборы (диоды, тиристоры, динисторы, триаки и др.). Они составляют основу отечественного преобразовательного оборудования, применяемого в таких областях, как электроэнергетика, транспорт, машиностроение, металлургия, нефте- и газодобыча, стройиндустрия, крупные коммунальные объекты, военная техника и др.

Вместе с тем за последние годы на основе полностью управляемых ключей (IGBT, GCT, IGCT, SIT и др.) созданы и эксплуатируются современные преобразователи, обеспечивающие наиболее качественное преобразование электроэнергии при минимальных потерях и материальных затратах. Рынок этих приборов, в первую очередь IGBT-модулей, является сегодня самым динамичным, причем его расширение происходит как за счет новых областей применения (медицинская и бытовая техника, ветроэнергетика,

радиолокация и др.), так и за счет распространения в те сферы, где традиционно использовались мощные тиристоры. Причем GCT и IGCT уже сегодня достигли предельных коммутируемых мощностей (6000 А/8000 В), характерных для SCR, а IGBT приближаются к ним (3600 А/6500 В).

С учетом этих тенденций в ОАО «Электровыпрямитель» ведутся разработки и осваивается производство новых видов СПП в дискретных и модульных конструкциях в широком диапазоне токов, напряжений и рабочих частот.

Дискретные приборы

ОАО «Электровыпрямитель» выпускает дискретные силовые полупроводниковые приборы с диаметром кремниевых структур от 5 до 101 мм на базе 22 типов корпусов штыревой, таблеточной и фланцевой конструкций (рис. 1). Производится широкий ряд низкочастотных (для применения в промышленной сети) диодов и тиристоров на токи от 10 до 6300 А и на рабочее напряжение от 200 до 6500 В. По заказам могут быть поставлены приборы с рабочим напряжением до 8000 В и в термодинамически устойчивых корпусах (I_{sc} до 75 кА, $\int i^2 dt = 13,5 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ c}$).

По типу данная серия СПП одна из крупнейших в мире. По электрическим параметрам, габаритно-присоединительным размерам она соответствует зарубежным аналогам — выпускаемым фирмами ABB, Eupec, Semikron, Westcode и др.

На основе тех же конструкций разработана и поставляется серия быстродействующих диодов и тиристоров, предназначенных для работы в частотно-импульсных режимах. Диоды этой группы, в зависимости от рабочего напряжения и тока, имеют времена обратного восстановления от 0,1 до 5 мкс. Частотные тиристоры выпускаются с характеристиками времени выключения от 8 до 50 мкс. Рабочее напряжение этих приборов от 1000 до 2400 В. По требованиям заказчика предприятие поставляет подобные приборы и с более высокими рабочими напряжениями (до 4000 В и выше) с нормированными временем выключения, которое оптимизировано для инверторных применений.



Рис. 1. Силовые полупроводниковые приборы штыревой, таблеточной и фланцевой конструкций

В зависимости от назначения производятся следующие типы силовых диодов: низкочастотные, быстродействующие, лавинные, кробоарные, роторные. Этими высоконадежными приборами комплектуются выпрямители для питания тяговых и вспомогательных преобразователей электровозов и тепловозов, подстанций железных дорог и муниципального электротранспорта, бесщеточные системы возбуждения электрических машин, различные приводы электродвигателей переменного и постоянного тока, преобразователи для электролиза алюминия, сварочное оборудование, источники питания и многие другие устройства.

ОАО «Электровыпрямитель» — известный поставщик мощных тиристоров. На предприятии производится целый ряд приборов тиристорного типа в широком диапазоне токов и напряжений:

- тиристоры низкочастотные до 5000 А/6000 В;
- тиристоры быстродействующие и частотно-импульсные до 2000 А/2400 В;
- тиристоры асимметричные до 1000 А/2800 В;
- тиристоры симметричные (триаки) до 1000 А/1400 В;
- оптоотиристоры до 80 А/1200 В;
- реверсивно включаемые динисторы (RSD) до 350 кА/4000 В.

Тиристоры широко используются в преобразователях ЛЭП и вставках постоянного тока, статических системах возбуждения крупных электрических машин, компенсаторах реактивной энергии, электроприводах, схемах плавного пуска, гальваники, электротермии, индукционного нагрева и во многих других областях применения.

Для нужд импульсной техники поставляются реверсивно включаемые динисторы, которыми комплектуются высоковольтные коммутаторы тока, способные переключать импульсные мощности в гигаваттном диапазоне. Последние разработки в этой области показали абсолютное превосходство RSD перед всеми другими типами полупроводниковых ключей. В настоящее время RSD выпускаются с диаметрами элементов от 8 до 76 мм с рабочим напряжением до 4000 В и коммутируемым током до 350 кА. Ведутся разработки по созданию мощного твердотельного ключа на импульсные токи до 500–1000 кА.

Перспективные области применения этих приборов: системы коммутации электрической энергии для мощных лазеров, ускорителей и накопителей заряженных частиц, рентгенографической аппаратуры и других мощных электрофизических установок.

ОАО «Электровыпрямитель» — единственное в России и одно из немногих предприятий в мире, выпускающих мощные симметричные тиристоры с однополярным и двухполярным управлением, которые весьма эффективны в качестве регуляторов переменного тока промышленной частоты. Они поставляются в стандартных штыревых и таблеточных корпусах, рассчитаны для работы в диапазоне токов от 10 до 1000 А и напряжения до 1400 В.

Разработаны и освоены в производстве оптоотиристоры на токи от 20 до 80 А, напряже-



Рис. 2. Диодно-тиристорные модули с прижимными контактами

ние до 1600 В в дискретном (штыревом) и модульном исполнениях с внутренней гальванической развязкой между цепью управления и силовыми выводами.

Диодно-тиристорные модули

На предприятии производится большое семейство диодно-тиристорных модулей с изолированным основанием на токи от 40 до 1250 А с рабочим напряжением до 4400 В в шести базовых конструкциях (рис. 2). Модули выполнены в прижимной конструкции с шириной медного основания 20, 34, 50, 60 и 70 мм. Достоинством этих приборов является высокая энерготермоциклическая стойкость, надежная работа в режиме больших токовых нагрузок и в тяжелых условиях эксплуатации.

Конструкция модулей позволяет реализовать следующие варианты силовых схем с использованием диодов, тиристоров, опто-тиристоров, симисторов, резисторов и других типов СПП:

- единственный прибор;
- два прибора, включенных параллельно;
- два последовательно (полумост) или встречно (однофазный мост со средней точкой) соединенных прибора;
- два тиристора, включенных встречно-параллельно (ключ переменного тока);
- асимметричный тиристор с обратным диодом;
- снабберные цепи (R-R, R-D, R-C-D) и др.



Рис. 3. Диодные однофазные и трехфазные мосты

Силовые модули удобны для потребителей. При использовании охлаждающего устройства, выполненного в виде моноплиты, модульное исполнение СПП позволяет существенно упростить конструкцию силовой части преобразователя, снизить его массогабаритные параметры, уменьшить затраты на монтаж и обслуживание.

На основе разработанных конструкций на предприятии ведется разработка специализированных модулей с интегрированной в прибор системой охлаждения, предназначенных для мощного сварочного оборудования.

С этого года начал выпуск новой серии диодно-тиристорных модулей (низкочастотных и частотных) с паяными контактами на выходные токи от 40 до 500 А, напряжение до 1600 В, выполненных по схемам однофазных и трехфазных мостов (рис. 3). Они используются во входных и выходных выпрямителях инверторов на основе IGBT, источниках питания, зарядных устройствах и во многих других схемах. Эти компактные и дешевые приборы позволяют существенно снизить габариты и массу устройства, а также материальные затраты в производстве преобразователей широкого назначения мощностью до 250 кВт.

Предприятие выпускает силовые беспотенциальные модули на основе высокочастотных диодов с мягкими характеристиками обратного восстановления (SFRD-модули) на токи от 20 до 800 А, напряжение от 600 до 3300 В, напряжение изоляции от 2500 В



Рис. 4. Быстровосстанавливающиеся диодные модули (SFRD-модули)

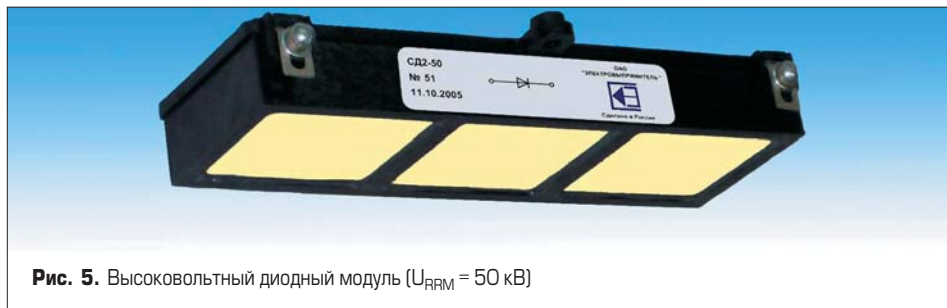


Рис. 5. Высоковольтный диодный модуль ($U_{PRM} = 50$ кВ)

до 15 кВ, имеющих конструктивные исполнения и технологию изготовления, аналогичные IGBT-модулям (рис. 4). Схемное исполнение данной серии — от одиночных ключей до трехфазных мостов. Особенностью этих приборов являются лавинные характеристики, очень низкие время (до 0,1 мкс) и заряд обратного восстановления, плавное восстановление и способность работать на высоких частотах.

Области применения SFRD-модулей: инверторные и снабберные диоды для IGBT, шунтирующие диоды для индуктивных нагрузок (FWD), выходные высокочастотные выпрямители для источников бесперебойного питания, электросварки и пр.

По специальному заказу поставляются высоковольтные диодные модули (рис. 5) на токи до 2 А и напряжение до 50 кВ (аналоги модулей 3HV50, 6HV50 американской фирмы HVCA). Модули имеют оригинальную конструкцию, позволяющую при обдуве корпуса в 2–3 раза увеличить рабочий ток. Приборы предназначены для развязки вспомогательных цепей в высоковольтных источниках питания лазеров, рентгеновского оборудования и др.

IGBT-модули

Одним из главных направлений в ОАО «Электровыпрямитель» является производство наиболее быстро развивающегося класса силовых полупроводниковых приборов (СПП) — силовых модулей на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Освоено серийное производство IGBT-модулей на токи от 25 до 3600 А и напряжение до 3300 В, выполненных по схемам одиночных ключей, чопперов и полумостов (рис. 6).



Рис. 6. IGBT-модули с паяными и прижимными контактами

В модулях предусмотрены защитные диоды обратного тока с мягкими характеристиками обратного восстановления. Основная номенклатура этих приборов выпускается в стандартных корпусах и предназначена для статических преобразователей частоты, используемых в различных отраслях промышленности и в коммунальном хозяйстве. Модули являются прямыми или близкими аналогами зарубежных образцов как по параметрам, так и по габаритным и присоединительным размерам, что обеспечивает их хорошую взаимозаменяемость.

Серьезная конкуренция на рынке силовых IGBT-модулей, в том числе и в России, заставляет искать новые технические решения, которые позволяют предприятию занимать определенную нишу в данной области. Кроме самых низких цен на подобную продукцию ОАО «Электровыпрямитель» имеет еще одно неоспоримое преимущество — возможность быстро осуществить поставку нестандартных IGBT-модулей. Гибкость производственной линии, унифицированная конструкция модулей и высокая квалификация персонала позволили в короткие сроки по индивидуальным заказам потребителей разработать более 20 новых типов IGBT-модулей нестандартного исполнения в серийных конструктивах. В их числе высоковольтные модули на напряжение 3300 В в корпусах 34 и 62 мм, модули по измененным электрическим схемам и др. В настоящее время в этих корпусах готовятся к пробной поставке IGBT-модули на ток 25 А и напряжение 6500 В.

В течение последних трех лет проведены работы по созданию IGBT-модулей для электроподвижного состава. По требованиям РЖД с учетом особенностей российских железных дорог разработаны IGBT-модули специального исполнения, предназначенные для эксплуатации в циклических режимах нагрузки, при низких отрицательных температурах, в условиях жестких механических воздействий. Для вспомогательных СПЧ бортового питания электровозов и пассажирских поездов разработаны модули с напряжением изоляции более 15 кВ. Ведутся работы по созданию мощных IGBT-модулей на напряжение 6500 В для тягового электропривода магистральных электровозов.

В рамках целевой федеральной программы «Национальная технологическая база» на предприятии проведена разработка базовой технологии производства температуростойких силовых высоковольтных управляемых ключей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором на токи до 1400 А и напряжение до 2500 В в герметичных металлокерамических корпусах с прижимной конструкцией. Приборы имеют высокую энерготермоциклоустойчивость и стойкость к механическим и климатическим воздействиям. Разработанные ключи предназначены для создания высоконадежных преобразовательных устройств мощностью до 100 МВт для топливно-энергетического комплекса (гибких линий электропередач, компенсаторов реактивной мощности, регулируемых приводов переменного тока, активных фильтров и т. п.); транспортных средств городского, пригородного и железнодорожного электротранспорта, большегрузных карьерных самосвалов, подводных и надводных судов и других устройств с повышенными требованиями к надежности.

В рамках целевой федеральной программы «Национальная технологическая база»

на предприятии проведена разработка базовой технологии производства температуростойких силовых высоковольтных управляемых ключей на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором на токи до 1400 А и напряжение до 2500 В в герметичных металлокерамических корпусах с прижимной конструкцией. Приборы имеют высокую энерготермоциклоустойчивость и стойкость к механическим и климатическим воздействиям. Разработанные ключи предназначены для создания высоконадежных преобразовательных устройств мощностью до 100 МВт для топливно-энергетического комплекса (гибких линий электропередач, компенсаторов реактивной мощности, регулируемых приводов переменного тока, активных фильтров и т. п.); транспортных средств городского, пригородного и железнодорожного электротранспорта, большегрузных карьерных самосвалов, подводных и надводных судов и других устройств с повышенными требованиями к надежности.

Охлаждающие устройства и силовые блоки

ОАО «Электровыпрямитель» в течение многих лет разрабатывает и производит высокоэффективные охлаждающие устройства для всех типов выпускаемых СПП (рис. 7). Поставляются разнообразные охладители с воздушной и жидкостной системами охлаждения для приборов штыревой и таблеточной конструкций с односторонним и двухсторонним способами охлаждения, с системами прижима и контроля усилий сжатия, крепежом, силовыми шинами, изоляционными элементами.

Из последних разработок следует отметить охладители, предназначенные для СПП большой мощности, которые позволяют реализовывать проекты по созданию преобразователей мощностью до нескольких мегаватт. Это воздушные охлаждающие системы типа O273 с тепловым сопротивлением 0,035 °C/Вт и жидкостные охладители типа OM109 ($R_{th(ha)} = 0,013$ °C/Вт).



Рис. 7. Серия охладителей с воздушной и жидкостной системами охлаждения

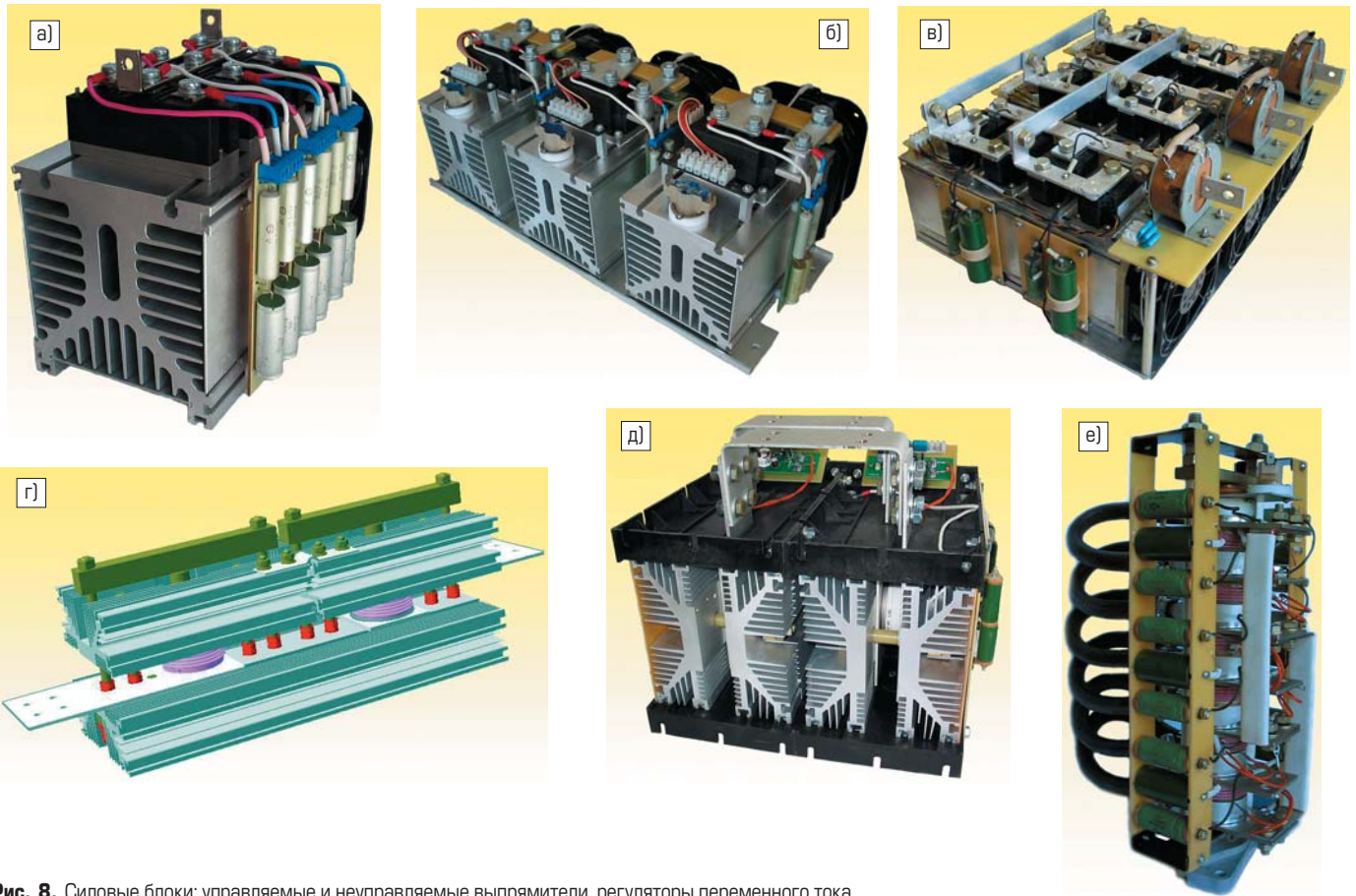


Рис. 8. Силовые блоки: управляемые и неуправляемые выпрямители, регуляторы переменного тока

Для диодно-тиристорных и IGBT-модулей разработаны и поставляются охладители — моноплиты типа O55 (аналог охладителя P3 фирмы Semikron), на которых легко можно собрать различные силовые схемы. Проводится разработка высокоэффективных экструзионных алюминиевых охладителей шириной до 600 мм с запрессованными ребрами, имеющими тепловое сопротивление до 0,015 °C/Вт.

Предприятие выпускает серию изоляционных теплопроводящих элементов таблечной конструкции на основе оксида и нитрида алюминия с низкими внутренними тепловыми сопротивлениями (до 0,07 °C/Вт) и с напряжением изоляции не менее 10 кВ. Они предназначены для развязки силовой схемы, выполненной на таблечных диодах и тиристорах, с охлаждающим устройством и корпусом преобразователя.

Кроме того, на ОАО «Электровыпрямитель» можно заказать проектирование и изготовление силовых блоков с использованием всей имеющейся на предприятии номенклатуры СПП и охладителей. Блоки изготавливаются как по стандартным силовым схемам (выпрямители, инверторы, регуляторы переменного тока и др.), так и по техническим требованиям заказчиков.

- а) трехфазный управляемый выпрямитель (100 кВт);
- б) трехфазный регулятор переменного тока (100 и 300 кВт);
- в) реверсивный трехфазный управляемый выпрямитель (360 кВт);

- г) блок высоковольтного реверсивного моста (1,43 МВт),
- д) однофазный регулятор переменного тока (1,5 МВт);
- е) трехфазный управляемый мост с жидкостным охлаждением (500 кВт).

Блоки предназначены для устройств плавного пуска и управления скоростью вращения электродвигателей, для регуляторов температуры и освещенности, для компенсации реактивной мощности, электросварки, индукционного нагрева, гальваники и для источников бесперебойного питания. Особенности силовых блоков: компактная конструкция, небольшая масса, изолированный охладитель, высокая плотность мощности на единицу объема, высокая надежность при работе в тяжелых режимах циклических нагрузок. По требованию заказчиков поставка силовых блоков производится в комплекте с вентиляторами, термодатчиками, драйверами управления, устройствами защиты от перенапряжений, токов перегрузки и коротких замыканий.

Заключение

ОАО «Электровыпрямитель» продолжает работы, направленные на дальнейшее развитие силовой полупроводниковой элементной базы, приведение ее структуры и уровня в соответствие с требованиями современной техники.

В соответствии с программой развития данного направления предприятием в ближайшие 2–3 года должны быть разработаны и освоены в производстве новые перспективные типы полупроводниковых приборов,

проведена модернизация производства серийных СПП с целью дальнейшего повышения их технического уровня и резкого увеличения объемов выпуска.

К новым приборам прежде всего относятся полностью управляемые полупроводниковые ключи — новые высоковольтные биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, запираемые тиристоры с интегрированным управлением IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor), мощные тиристорные ключи, управляемые светом, комплектные частотные диоды таблечной конструкции с мягким восстановлением, импульсные ограничители напряжения, полупроводниковые резисторы и др.

Использование в схемах преобразователей быстродействующих полностью управляемых мощных ключей позволит производить преобразование электроэнергии на высоких частотах, снизить общие потери в преобразователях, применить современные «интеллектуальные» системы управления, снизить массу и габариты преобразователей.

Предусматривается также расширение рабочих токов до 10 кА и напряжений до 12 кВ стандартных силовых полупроводниковых приборов — мощных диодов и тиристоров с улучшенными характеристиками и с повышенной эксплуатационной надежностью.

Разрабатываемые в ОАО «Электровыпрямитель» новые приборы являются элементной базой перспективных преобразовательных систем, предназначенных для модернизации всех отраслей отечественной экономики.