

Тиристорные модули высокой мощности

для электропривода

Постоянно возрастающие мощность и степень интеграции преобразовательного оборудования являются одними из основополагающих признаков развития модульной конструкции приборов силовой электроники. Модульное исполнение весьма привлекательно, поскольку позволяет организовать простые и компактные решения при проектировании современных преобразовательных устройств. В статье представлены результаты последних разработок тиристорных модулей ПАО «Электровыпрямитель» высокой мощности.

**Галина Варянова
Вячеслав Матвеев
Андрей Дружинин
Дмитрий Немаев
Хусамеддин Оруджев
Лариса Тишкина
Анна Учайкина
Надежда Мушкетова**

nicpp@elvpr.ru

Одним из приоритетных направлений развития ПАО «Электровыпрямитель» является разработка и серийное освоение современных полупроводниковых приборов силовой электроники, которые предназначены для нужд системообразующих отраслей промышленности, транспорта, энергетики и поставляются как внутри страны, так и за рубеж. Ориентируясь на потребности рынка и проводя последовательную техническую политику в области разработки и освоения новых конструкций и технологий силовых полупроводниковых приборов, предприятие постоянно уделяет внимание развитию изделий силовой электроники. В настоящее время номенклатура выпускаемых силовых полупроводниковых приборов и модулей составляет порядка 1200 типов на токи до 10 000 А и напряжение до 10 000 В, включая свыше 350 IGBT/FRD-модулей на основе кремния и карбида кремния, а также более 80 типов охладителей и прижимных устройств [1].

В ПАО «Электровыпрямитель» освоено серийное производство беспотенциальных диодно-тиристорных модулей общепромышленного применения на токи 40–2500 А, напряжение 400–4400 В, электрической прочностью изоляции 2500–9500 В RMS. Линейка продукции насчитывает порядка 350 типов диодно-тиристорных модулей прижимной конструкции, выполненных по электрическим схемам:

- одиночный ключ (диод, тиристор, симистор, опто-тиристор),
- два прибора, включенных параллельно;
- два последовательно или встречно соединенных прибора (с общим катодом или анодом);
- два прибора, включенных встречно-параллельно.

Конструктивно применение модулей имеет ряд неоспоримых преимуществ: изолированное основание модулей от потенциальных контактов; упрощенный монтаж и ошиновка силовых схем, что позволяет снижать их стоимость по сравнению с приборами таблеточного исполнения. Несмотря на то что конструкция диодно-тиристорных модулей с изолированным основанием предполагает только одностороннее охлаждение, построение схем с их применением становится все более популярным.

Повышенная циклоустойчивость диодно-тиристорных модулей обеспечивается применением в них прижимных контактов (более 100 000 циклов с перепадом температуры $\Delta T = +100$ °С). Модули с прижимными контактами выпускаются в восьми конструктивных исполнениях с шириной основания 20, 34, 50, 60, 70, 77 и 90 мм. Корпуса большей части типов модулей по габаритно-присоединительным размерам совместимы с общепринятыми сериями фирм-конкурентов, что позволяет осуществлять импортозамещение изделий зарубежного производства.

В конструкции модулей использованы конструкционные пластмассы, работающие в широком диапазоне температур $-80...+150$ °С. Все применяемые материалы пожаробезопасны: относятся к классу самозатухающих и неподдерживающих горения. Климатическое исполнение модулей УХЛ4 по ГОСТ15150-69. Стойкость к воздействию внешних факторов подтверждается результатами периодических испытаний. В состав завода входит испытательный центр, способный проводить весь комплекс сертификационных испытаний: климатических, механических, надежность (длительные испытания под нагрузкой током и напряжением). Наличие

собственных производственных мощностей для изготовления деталей из металлов и пластмасс позволяет оперативно исполнять заказы, включая возможности изготовления нестандартных деталей по вновь разработанным чертежам.

Внутренние детали корпуса герметизируются компаундами с высокими диэлектрическими и теплофизическими свойствами, которые обеспечивают изоляцию внутри модуля и защиту полупроводниковых элементов от воздействия внешней среды и прямого попадания влаги. Для поддержания заданных требований электрической прочности изоляции медное основание модуля изолировано от силовых и управляющих выводов с помощью теплопроводящей керамики из нитрида алюминия AlN. Дополнительными способами снижения напряженности электрических полей внутри корпуса является оптимальная конструкция деталей, определяемая для каждого типоразмера.

Учитывая тренды на повышение мощности единичным прибором, особое место в номенклатуре выпускаемых изделий, занимают диодно-тиристорные модули высокой мощности в корпусах с размерами основания 90×115 (MTD8), 77×150 (MTD7), 70×104 мм (MTD6) (рис. 1).

Поскольку важнейшими элементами в современных преобразователях по-прежнему остаются биполярные тиристоры высокой мощности, обладающие наименьшими потерями энергии, способностью выдерживать аварийные токи, высокую надежность и конкурентные цены, в рамках данной статьи рассматриваются тиристорные модули.

В настоящее время серийно выпускаемые предприятием низкочастотные тиристорные модули в корпусах, представленных на рис. 1, имеют следующую систему параметров (табл. 1).

Стандартное исполнение электрической схемы двухключевых модулей с размерами основания 77×150 мм — полумост, также доступны варианты сборки в схемы с общим анодом или катодом. Полупроводниковые элементы тиристоров для комплектации модулей с размерами оснований 70×104 и 77×150 мм представляют собой неразъемное соединение кремниевого кристалла, соединенного со стороны анода с молибденовым термокомпенсатором диаметром 56 мм. Топология и концентрационный профиль кристаллов низкочастотных тиристоров разработаны для достижения оптимального соотношения статических потерь в открытом состоянии и блокирующих характеристик. Металлизация катода полупроводникового элемента выполнена магнетронным напылением алюминиевого покрытия толщиной 15–20 мкм. Алюминиевые покрытия минимизируют электрические и тепловые сопротивления в прижимных контактных соединениях тиристора и обеспечивают хорошее растекание тока по катодной поверхности тиристорной структуры.

Использование более мощных тиристорных модулей позволяет получать требуемые потребителю режимы с применением меньшего количества приборов, повышая тем самым эксплуатационную надежность и сокращая материальные затраты. Опыт показывает, что



Рис. 1. Диодно-тиристорные модули высокой мощности

с ростом числа компонентов увеличивается вероятность снижения показателей надежности устройства, вызванная отказами систем управления и защитными цепями. Поэтому, чем меньше компонентов, тем проще создать простое устройство с требуемой надежностью. При этом определяющим фактором для повышения технического уровня и улучшения экономических показателей преобразователей является комплексный подход к выбору мощного прибора и системе охлаждения. Нормальный тепловой режим работы любого силового полупроводникового прибора в условиях длительной эксплуатации определяется рационально выбранной системой охлаждения. Основное место при проектировании преобразователей занимает воздушное охлаждение благодаря до-

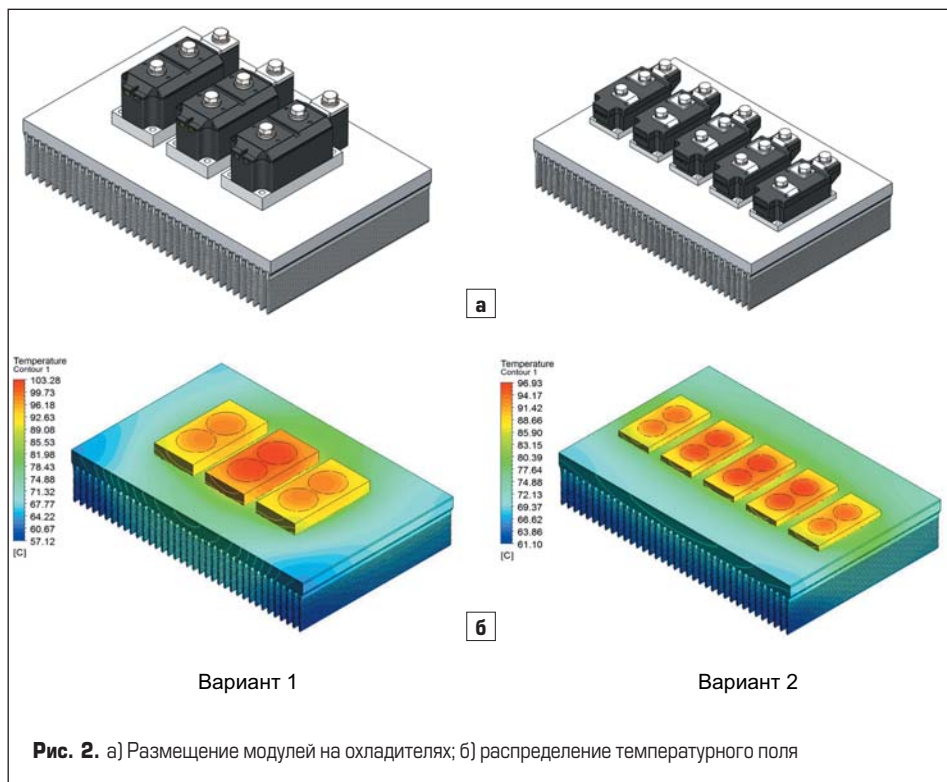
статочной простоте конструктивных решений и удобству эксплуатации. Рассмотрим пример организации силовой сборки на одинаковые электрические параметры с двумя вариантами комплектации двухключевыми тиристорными модулями в корпусах с шириной основания 60 и 77 мм, выполненными по схемам полумоста.

Для сравнительных расчетов примем следующие условия:

- величина общей мощности отводимых потерь: 1700 Вт,
- охлаждение воздушно-принудительное: охладитель O57 с размерами 300×300 мм, скорость потока воздуха в канале 6 м/с, расстояние между установленными модулями 25 мм;
- температура окружающей среды: +40 °С.

Таблица 1. Основные параметры низкочастотных тиристорных модулей

Тип	V _{DRM} /V _{RRM}	I _{T(AV)}	I _{TSM}	V _{T(TO)}	r _T	t _q	R _{th(i-c)}	T _{max}	V _{isol}	Корпус
		(T _c , °C)	T _p = 10 мс	T _{max}	T _{max}	тип.				
Основание 70×104 мм										
M1T2-400	3600–4000	492(85)	15	1,18	0,62	400	0,042	125	3600	MTD6
M1T2-500	2900–3400	570(85)	18	1,10	0,4	320				
M1T2-630	1900–2800	660(80)	20	1,05	0,35	200				
M1T-800	1300–1800	840(80)	23	1	0,2	200				
M1T-1000	400–1200	1020(85)	28	0,9	0,15	160				
M1T1-1250	400–800	1335(85)	30	0,83	0,10	100				
Основание 77×150 мм										
M2T2-400	3600–4000	492(85)	15	1,18	0,62	400	0,042	125	3600	MTD7
M2T2-500	2900–3400	570(85)	18	1,1	0,4	320				
M2T2-630	1900–2800	660(80)	20	1,05	0,35	200				
M2T2-800	1300–1800	840(80)	23	1	0,2	200				
M2T2-1000	400–1200	1035(85)	28	0,9	0,15	160				
M2T2-1250	400–800	1335(85)	30	0,83	0,1	125				
Основание 90×115 мм										
M1T-1600	200–1200	1610(85)	60	0,85	0,064	200	0,028	135	3600	MTD8
M1T-1250	1200–1800	1400(85)	49	0,9	0,07	250				
M1T2-1000	1800–2400	1110(85)	42		0,14	320				
M1T2-800	2400–3600	910(85)	34	1,1	0,21	400				
M1T3-800	3600–4200	826(85)	32	1,2	0,26	500				

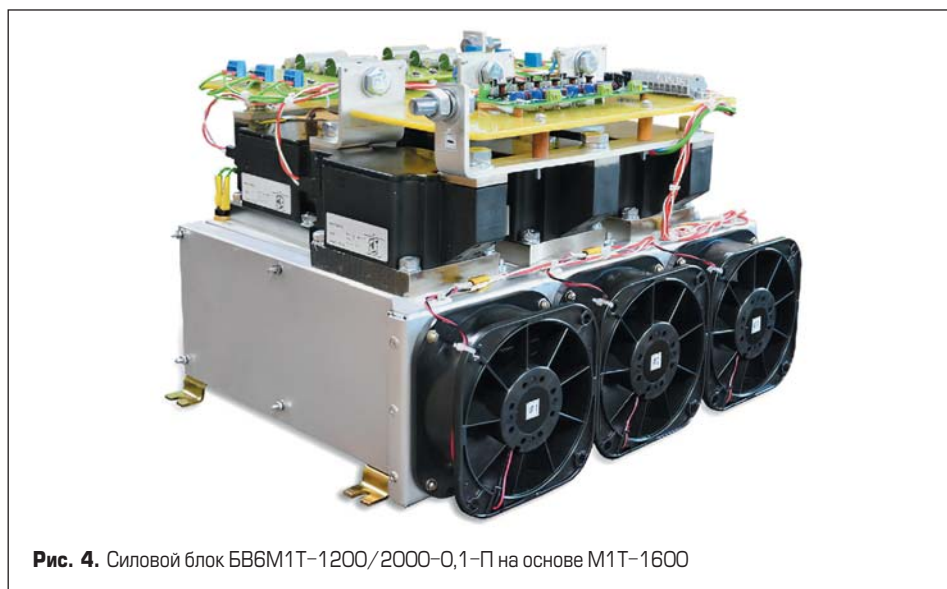
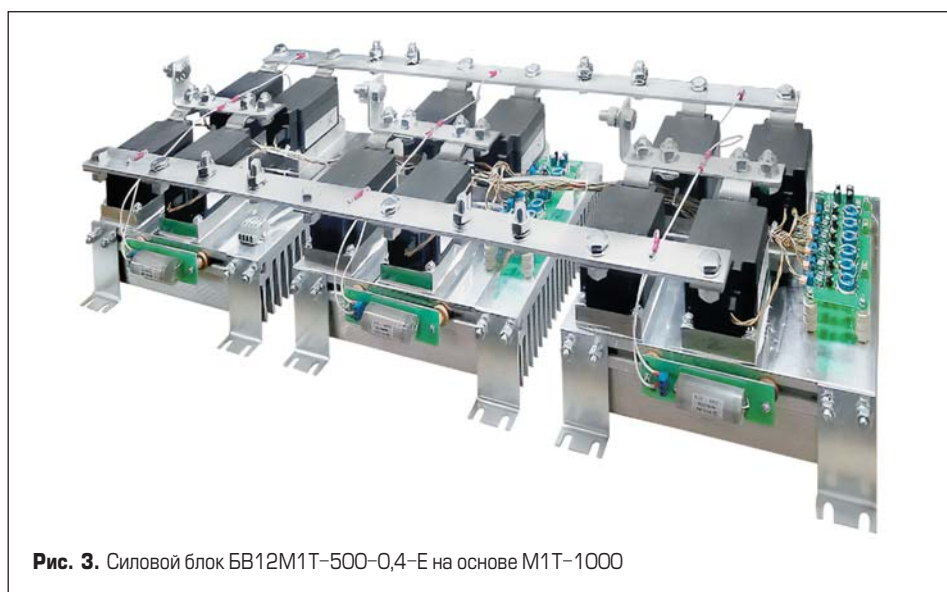


Для получения одинаковых выходных параметров силового блока потребуется применить двухключевые модули M2T2-400-40 в количестве трех штук (вариант 1) и модули M2T1-250-40 в количестве пяти штук (вариант 2), соединенных в схеме параллельно для обоих вариантов. Полная система параметров модулей доступна на сайте компании [1]. На рис. 2 приведены варианты размещения модулей и результаты расчета температурного поля для обоих вариантов исполнения силовых сборок. Для улучшения наглядности распределения температурного поля по поверхности представлена картина не всей модели, а лишь наиболее нагретых деталей модулей.

Расчет температурного поля охладителя силового полупроводникового прибора связан с решением системы управления теплопроводности и гидродинамики. Применяя современные методы мультифизического моделирования, инженеры провели расчет тепловых параметров при заданных условиях режима работы силовых модулей. Из результатов приведенных расчетов следует, что для равных условий работы (общая мощность потерь для тиристорной сборки 1700 Вт) температура максимально нагретого модуля составит +103,28 °C для варианта 1 и +96,93 °C для варианта 2, при соответствующих тепловых сопротивлениях теплоотвода 0,0328°C/Вт и 0,02915°C/Вт. Учитывая максимально допустимую температуру перехода модуля M2T2-400 $T_j = +125$ °C, принимаем возможным его применение для вышеуказанных условий работы. При этом улучшение распределения теплового поля для варианта 1 может быть достигнуто путем увеличения расстояния между модулями до 75 мм. Как показывают расчеты, температура максимально нагретого модуля при увеличении расстояния между M2T2-400 составит +96,76 °C, а тепловое сопротивление теплоотвода будет равно 0,0289 °C/Вт.

Из сравнения двух вариантов исполнения силовых сборок следует, что применяя более мощные модули, помимо сокращения числа приборов, можно оптимизировать массо-габаритные показатели системы охлаждения на 20–25%. При этом, принимая во внимание увеличение массы модуля M2T2-400 по сравнению с массой модуля M2T1-250 в 2,5 раза, общий вес сборки по варианту 1 с использованием доработанного теплоотвода будет практически сравним с весом по варианту 2. Поскольку стоимость модуля M2T2-400 выше стоимости модуля M2T1-250 на 25–30%, то для рассматриваемого примера сокращение материальных затрат только за счет применения модулей высокой мощности составит около 25%. Кроме того, с применением мощных модулей M2T2-400 с комплектацией полупроводниковыми элементами диаметром 56 мм вместо модулей M2T1-250 с полупроводниковыми элементами диаметром 40 мм, повышается устойчивость к токам короткого замыкания. Для рассматриваемых типов модулей неповторяющийся ударный ток в открытом состоянии равен $I_{TSM} = 15$ кА для M2T2-400 и $I_{TSM} = 6$ кА для M2T1-250.

Мощные тиристорные модули широко применяются для реализации проектов разработки и поставки силовых блоков собственного



изготовления [2]. Для примера представлена конструкция силового блока реверсивного управляемого выпрямителя на ток 500 А, напряжение 400 В для электропривода постоянного тока БВ12М1Т-500-0,4-Е с естественным охлаждением, реализованная на базе одноключевых модулей М1Т-1000.

Одной из последних разработок с использованием мощных модулей стал силовой блок трехфазного управляемого выпрямителя с воздушным принудительным охлаждением БВ6М1Т-1200/2000-0,1-П (рис. 4). Блок предназначен для плавного пуска электродвигателей с рабочим напряжением 0,1 кВ, выходной рабочий ток (среднее значение) при угле проводимости тиристоров 120° эл. составляет 1200 А, рабочая частота питающей сети 400 Гц [2]. Блок состоит из шести беспотенциальных одноключевых тиристорных модулей М1Т-1600 с шириной основания 90 мм, установленных на трех охладителях О55 (по два модуля на каждом охладителе).

Серию одноключевых тиристорных модулей в корпусе с размерами основания 90×115 мм отличает повышенная мощность в компактном объеме. Модулей подобного конструктивного исполнения нет ни у одного мирового производителя. Данная конструкция модуля позволяет использовать полупроводниковые элементы тиристоры диаметром 76 мм. Толстое медное основание обеспечивает высокую перегрузочную способность по току в течение нескольких десятков секунд при естественном охлаждении, что особенно важно для режимов плавного пуска мощных двигателей. Конструкция модуля отличается от известных тем, что для обеспечения требуемого усилия сжатия полупроводникового элемента применено оригинальное прижимное устройство, включающее восемь стягивающих винтов, расположенных попарно в углах стягивающей пружины [3].

Индивидуальный подход к каждому заказу позволяет совершенствовать функциональные характеристики изделий и оперативно осваивать выпуск тиристорных модулей с системой параметров, необходимой конкретному потребителю. Ниже в качестве примера представлены результаты проведенных работ по оптимизации системы параметров быстродействующего модуля по требованиям потребителя. В [4] были приведены результаты разработки быстродействующего тиристорного модуля М1ТБ-1000-26 для преобразователей частоты на основе схемы автономного инвертора тока. Подобные преобразователи широко применяются в частотно-регулируемых электроприводах с асинхронным электродвигателем, обеспечивая эффективный способ экономии электроэнергии при работе насосных, компрессорных и дутьевых механизмов. Токовая идеология в сочетании со специальными алгоритмами управления позволяет обеспечить практически синусоидальное выходное напряжение преобразователей, то есть высокий уровень электромагнитной совместимости с двигателем. С учетом новых требований потребителя к повышению единичной мощности тиристорных модулей была произведена конструкторско-технологическая доработка М1ТБ-1000, в результате которой освоен выпуск нового модуля

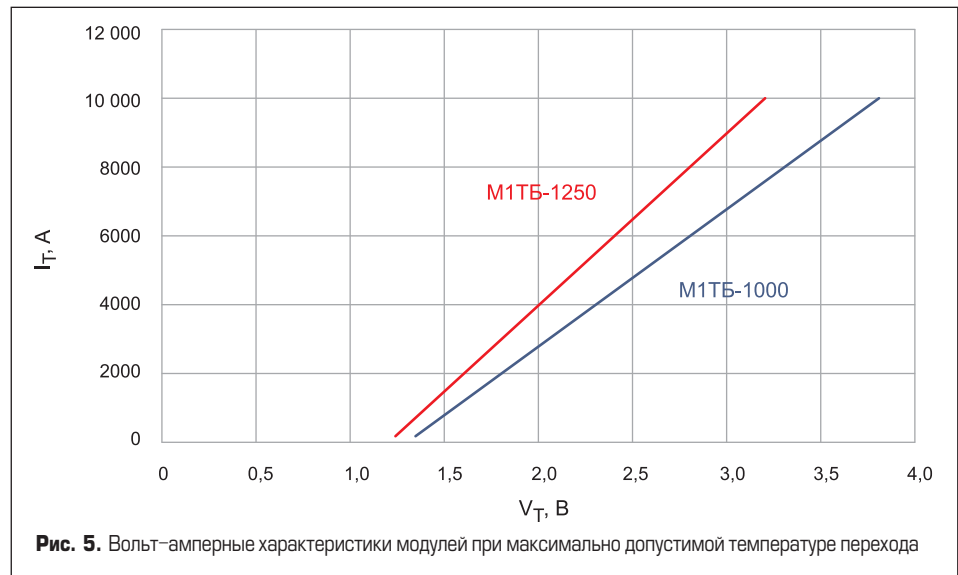


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики модулей при максимально допустимой температуре перехода

ля М1ТБ-1250 в тех же габаритных размерах корпуса.

К тиристорам, применяемым в схемах автономного инвертора тока, предъявляются более жесткие требования к динамическим параметрам: импульсному току обратного восстановления I_{RR} и времени выключения t_q . Использование обычных низкочастотных тиристорных становится невозможным, поскольку большие значения заряда обратного восстановления Q_{RR} и соответственно тока I_{RR} могут приводить к возникновению недопустимых перенапряжений.

С целью достижения поставленных потребителем требований в новой конструкции модуля были применены полупроводниковые элементы диаметром 80 мм. Электрофизические параметры и конструкция кремниевых структур полупроводниковых элементов тиристорных модулей спроектированы для достижения оптимального баланса между потерями во включенном состоянии и динамическими потерями.

Увеличение диаметра полупроводникового элемента с 76 до 80 мм привело к увеличению активной площади кристалла тиристора на 12%. Соответственно, уменьшились и прямые потери энергии во включенном состоянии.

В новом приборе они были минимизированы за счет оптимизации концентрационного профиля распределения примесей и катодной шунтировки в кристаллах. Для получения низких значений динамических параметров на основе экспериментальных данных были определены требования к времени жизни неосновных носителей заряда в высокоомных областях. Регулирование времени жизни неосновных носителей заряда в базовых областях кристалла проводилось за счет применения радиационных методов — электронного облучения на ускорителе «Электроника-У003», который входит в состав технологической линейки предприятия. При облучении в кремнии образуются радиационные дефекты кристаллической структуры, вызывающие появление дополнительных центров рекомбинации. В свою очередь рекомбинационные центры вызывают уменьшение времени жизни пропорционально интегральному потоку частиц. На рис. 5 представлены типичные вольт-амперные характеристики в открытом состоянии двух модулей М1ТБ-1000 и М1ТБ-1250 на повторяющемся напряжении в закрытом состоянии 2600 В.

На рис. 6 приведены взаимосвязи импульсного тока обратного восстановления и времени

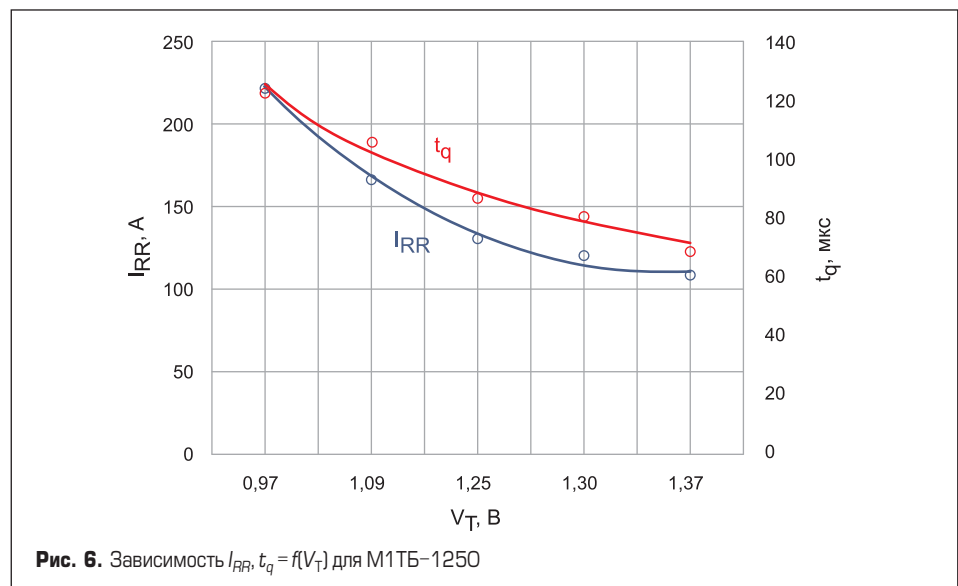


Рис. 6. Зависимость I_{RR} , $t_q = f(V_T)$ для М1ТБ-1250

Таблица 2. Основные параметры модуля М1ТБ-1250

Наименование параметра, условия измерения	Обозначение параметра, ед. измерения	Норма
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии, (при температуре корпуса +70 °С), 180°sin 120°rec	$I_{T(AV)}$, А	1307 1208
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное обратное напряжение	V_{DRM} , V_{RRM} , В	2600
Динамическое сопротивление, не более $T_f = T_{jmax}$, $I_T = 1960-5890$ А	r_T , мОм	0,185
Пороговое напряжение, не более $T_f = T_{jmax}$, $I_T = 1960-5890$ А	$V_{T(ТО)}$, В	1,17
Импульсное напряжение в открытом состоянии, не более $T_f = +100$ °С, $I_T = 1400$ А	V_T , В	1,42
Ударный ток в открытом состоянии, не менее $V_R = 0$, $t_D = 10$ мс, $T_f = T_{jmax}/+25$ °С	I_{TSM} , кА	38/40
Время задержки включения, не более $T_f = +25$ °С, $V_D = 0,5 V_{DRM}$, $I_T = 1400$ А, $I_{FG} = 2$ А, $t_r \leq 0,5$ мкс	t_{gd} , мкс	3
Импульсный ток обратного восстановления, не более $T_f = +100$ °С, $I_T = 1400$ А, $-(di/dt) = 25$ А/мкс, $V_R = 100$ В	I_{RR} , А	110
Время выключения, типичное $T_f = T_{jmax}$, $I_T = 1400$ А, $-(di/dt) = 10$ А/мкс, $V_R = 100$ В, $dv_D/dt = 50$ В/мкс	t_{qf} , мкс	80
Электрическая прочность изоляции (действующее значение), не менее $t = 1$ мин/1 с	V_{isol} , В	3600/4000
Максимально допустимая температура перехода	T_{jmax} , °С	130
Тепловое сопротивление переход-корпус не более DC 180°sin 120°rec	$R_{th(j-c)}$, °С/Вт	0,025 0,026 0,027

Таблица 3. Параметры аналитической функции $Z_{th(j-c)}$ модуля М1ТБ-1250

n	1	2	3	4
R_{thn} , К/Вт	0,00696	0,01567	0,00212	6,62706E-4
τ_n , с	15,01755	5,33416	0,05507	0,0017

Заключение

Конкурентоспособность выпускаемых модулей подтверждается многолетним опытом их надежной эксплуатации в различных областях ответственных применений. Выбранные направления развития диодно-тиристорных модулей соответствуют современным тенденциям и находятся в спектре постоянного внимания разработчиков с целью соответствия требованиям потребителей.

Продолжение следует

Литература

1. www.elvpr.ru/catalog/power-semiconductor-devices/
2. Сабешкин А., Мускатиньев В., Гришанин А., Елисеев В., Иванова С., Потапов С., Аширов Р., Немаев Д. Силовые блоки на основе тиристоров и фототиристоров для промышленных применений // Силовая электроника. 2020. № 1.
3. Grishanin A., Martynenko V., Khapugin A., Varyanova G., Baru A. New Thyristor mega-Module for Megawatt-Range Frequency Converters. Proceeding of PCIM Europe Conference. Nueremberg, 2012
4. Гришанин А., Варянова Г., Оруджев Х., Янсен Я., Мартыненко В. Новые биполярные модули с повышенным быстродействием для мощных частотно-регулируемых электроприводов // Силовая электроника. 2012. № 5.

выключения модуля М1ТБ-1250 от импульсного напряжения в открытом состоянии.

Оптимизация конструкции и технологии изготовления полупроводниковых элементов М1ТБ-1250-26 позволила получить требуемое сочетание параметров (табл. 2).

На основании результатов моделирования модуля М1ТБ-1250 была определено переходное внутреннее тепловое сопротивление $Z_{th(j-c)}$, которое описывает изменение теплового сопротивления прибора во времени. На рис. 7 представлена модель модуля для расчета тепловых сопротивлений. Для упрощения расчетов использовалась не вся модель, а лишь те детали, которые непосредственно участвуют в теплообмене: полупроводниковый элемент, контактные прокладки, токопроводящие шины, изолятор, основание.

На рис. 8 представлена графическая зависимость $Z_{th(j-c)}$ в таблице 3 даны частные тепловые сопротивления R_{thn} и постоянные времени τ_n для аналитической функции, полученные на основе результатов моделирования:

Данные, полученные при проведении математического моделирования, хорошо согласуются с результатами испытаний установившегося теплового сопротивления $R_{th(j-c)}$ для однополупе-

риодного выпрямленного тока, проведенными на образцах М1ТБ-1250. Информация относительно теплового переходного сопротивления будет полезна разработчикам преобразователей при определении допустимых режимов модуля при проектировании устройств плавного пуска.

Результаты экспериментальных исследований показали принципиальную возможность создания высокомоощных модулей с диаметром полупроводникового элемента 80 мм. К основным преимуществам разработанных модулей следует отнести:

- низкие статические и динамические потери;
- минимальные разбросы импульсных токов обратного восстановления I_{RR} для последовательных соединений;
- низкие времена выключения;
- высокая стойкость к токам короткого замыкания.

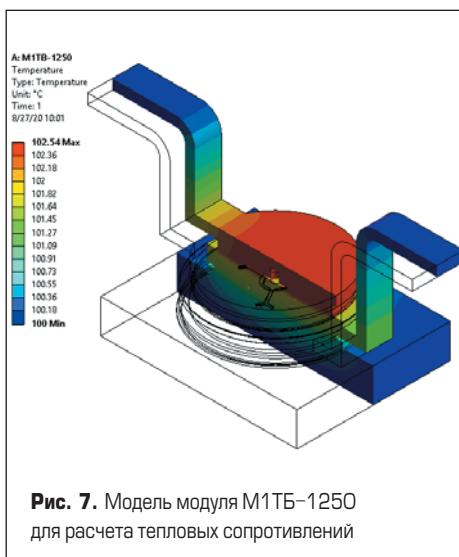


Рис. 7. Модель модуля М1ТБ-1250 для расчета тепловых сопротивлений

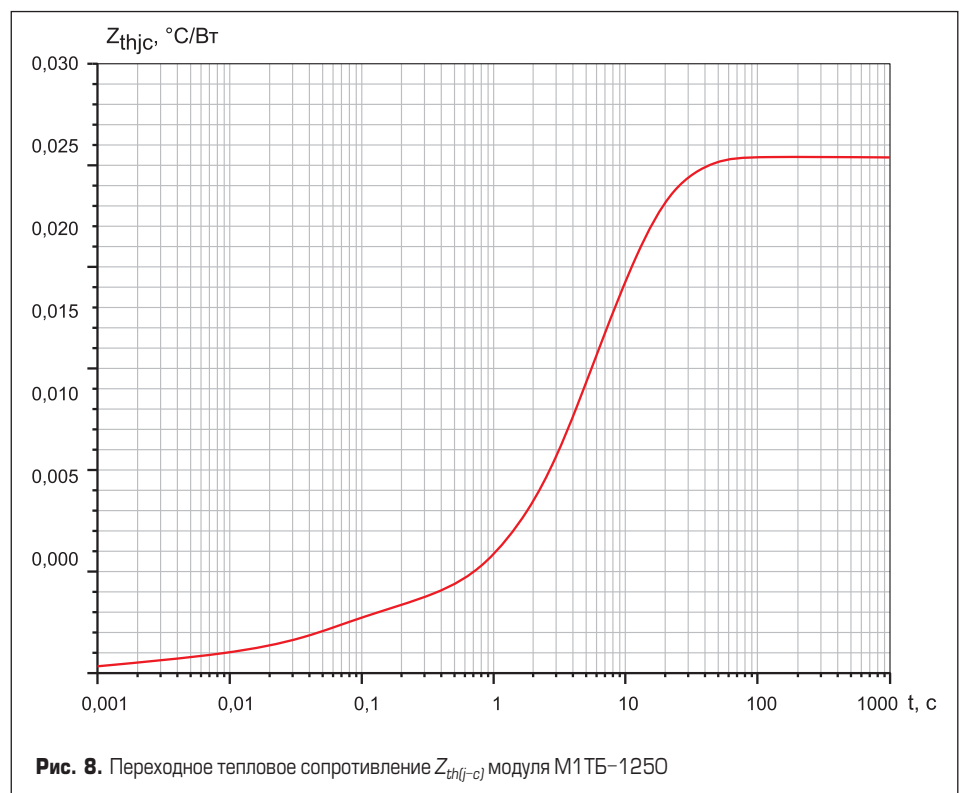


Рис. 8. Переходное тепловое сопротивление $Z_{th(j-c)}$ модуля М1ТБ-1250