

# Новые биполярные модули с повышенным быстродействием

## для мощного частотно-регулируемого электропривода

**В статье представлены результаты разработки новых тиристорных и диодных модулей с повышенным быстродействием на напряжение 2600 В и средний ток в открытом состоянии 1000 А с диаметром кремниевой структуры 76 мм для применения в автономных инверторах тока мощного частотно-регулируемого электропривода.**

**Алексей Гришанин**

**Галина Варянова**

**Хусамеддин Оруджев**

**Никита Янсен**

**Валентин Мартыненко**

[martin@moris.ru](mailto:martin@moris.ru)

### Введение

Частотное управление является наиболее экономичным способом плавного регулирования скорости вращения мощного асинхронного двигателя. Широкое применение при этом получают двухзвенные высоковольтные преобразователи частоты. Такие устройства дважды преобразуют электроэнергию питающей сети: сначала с помощью выпрямителя производится преобразование напряжения сети с частотой 50 Гц в постоянное, затем постоянное напряжение преобразуется в переменное с требуемыми значениями напряжения, тока и частоты для управления режимом работы электродвигателя. Это преобразование осуществляется инвертором.

В настоящее время в области регулируемого электропривода малой и средней мощности доминируют преобразователи частоты на базе инверторов напряжения, построенных на полностью управляемых приборах (IGBT, MOSFET). Тем не менее в производстве преобразователей частоты мощностью 1–8 МВт для асинхронных высоковольтных электроприводов напряжением 6, 10 кВ наиболее эффективно использование схем автономного инвертора тока (АИТ) на основе однооперационных тиристоров с отсекающими диодами. Это не противоречит тенденциям развития преобразовательной техники на основе IGBT. Использование IGBT-инверторов напряжения целесообразно для электропривода, если на входе инвертора уже имеется источник постоянного напряжения (например, в случае тягового электропривода). В регулируемом электроприводе магистральных нефте- и газопроводов обычно используются мощные высоковольтные асинхронные двигатели (6 и 10 кВ),

момент нагрузки которых связан с частотой вращения квадратичной зависимостью. Асинхронный двигатель рассчитан на питание синусоидальным напряжением. Именно такое напряжение получает двигатель при питании от инвертора тока. В то же время при управлении от инвертора напряжения на двигатель поступает напряжение прямоугольной формы с высокой крутизной нарастания фронта в каждом импульсе, что снижает ресурс электродвигателя.

Другими важными факторами при использовании тиристоров в составе преобразователей частоты является его высокая нагрузочная и перегрузочная способности по току, меньшая стоимость по сравнению с IGBT-транзисторами. Указанные выше обстоятельства объясняют преимущественное распространение в зоне больших мощностей преобразователей частоты на базе автономных инверторов тока с однооперационными тиристорами и отсекающими диодами [1].

Электропривод центробежных насосов магистральных нефте- и газоперекачивающих станций предъявляет жесткие требования к преобразователям частоты: большая единичная мощность, высокие показатели надежности, безотказная работа оборудования в сложных климатических условиях, характеризующиеся высокими летними и низкими зимними температурами. Хотя круг рациональных технических решений и схем высоковольтных преобразователей частоты с АИТ в целом определен, их совершенствование непрерывно продолжается. Для этого требуется дальнейшее развитие полупроводниковых приборов силовой электроники, так как они в значительной степени определяют технико-экономические показатели электропривода в целом.



**Рис. 1.** Новый биполярный модуль с полупроводниковыми элементами диаметром 76 мм

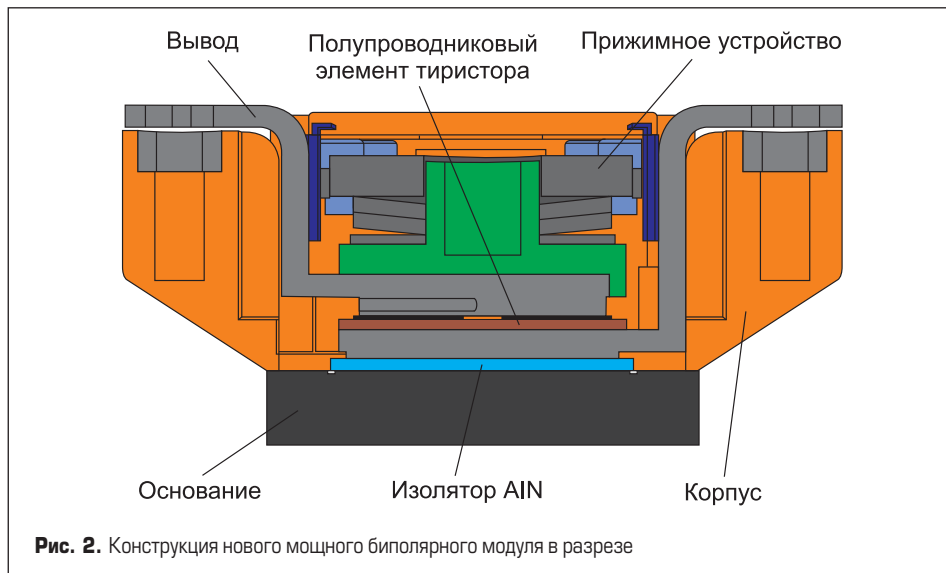
**Конструкция модуля**

Для реализации поставленных выше задач по совершенствованию АИТ была разработана и запатентована новая конструкция биполярного модуля с шириной основания 90 мм, позволяющая использовать полупроводниковые элементы тиристоров и диодов большой мощности диаметром 76 мм (рис. 1). Применение такого прибора в преобразователях с АИТ позволяет значительно увеличить мощность преобразователя при сохранении всех преимуществ, которые представляют биполярные модули с изолированным основанием (простота и компактность силовой схемы, низкая индуктивность монтажа, экономия дефицитных материалов и пр.).

Модуль изготовлен по технологии прижимного контакта, благодаря чему он имеет высокую энерготермоцикlostойкость при значительных токовых нагрузках. Толстое медное основание обеспечивает высокую перегрузочную способность по току в течение нескольких десятков секунд при естественном охлаждении, что является особенно важным для режимов плавного пуска мощных асинхронных двигателей. Конструкция модуля отличается от известных тем, что в нем было применено оригинальное прижимное устройство, включающее в себя восемь стягивающих винтов, расположенных попарно в углах стягивающей



**Рис. 3.** Распределение давления на рабочей площади полупроводникового элемента диаметром 76 мм (красный цвет — усилие сжатия 120–130 кг/см<sup>2</sup>)



**Рис. 2.** Конструкция нового мощного биполярного модуля в разрезе

пружины (рис. 2). Это позволило снизить нагрузку на каждый винт и, тем самым, обеспечить усилие сжатия 45–50 кН в ограниченном объеме модуля, минимизировать переходные контактные сопротивления между полупроводниковым элементом, теплопроводящим изолятором и медным основанием. При разработке были проведены компьютерное моделирование прижимного устройства и экспериментальные исследования контактной системы модуля с использованием пленок Prescale Fuji. Исследования показали хорошую однородность распределения давления на рабочей площади полупроводникового элемента диаметром 76 мм (рис. 3) и подтвердили правильность выбранной конструкции.

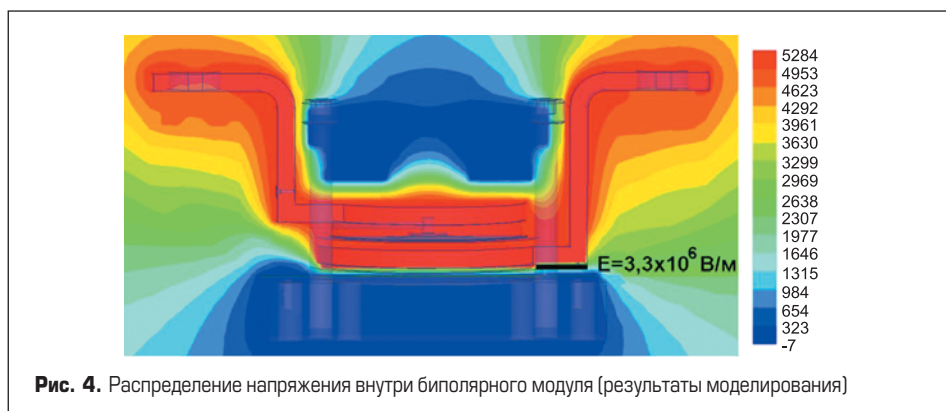
Для выполнения требований  $V_{isol} \geq 4000$  В (эффективное значение) медное основание модуля изолировано от силовых и управляющих выводов с помощью теплопроводящей керамики из нитрида алюминия (AlN). Проведено моделирование изоляции нового модуля при приложении высокого напряжения (~5000 В) между закороченными силовыми выводами и основанием. Распределение напряжения в модуле представлено на рис. 4. В результате моделирования было найдено, что наиболее слабым местом изоляции внутри модуля является пространство между углом анодной шины и основанием. Напряженность электрического поля в данном месте имеет максимальное значение, равное  $3,3 \times 10^6$  В/м (рис. 4). Требуемое напряжение изоляции

$V_{isol} = 4000$  В (rms) было достигнуто специальными выступами внутри пластмассового корпуса, в которых располагаются стягивающие винты, и применением пластиковых вставок, изолирующих токоведущие шины от пружины и стягивающих винтов.

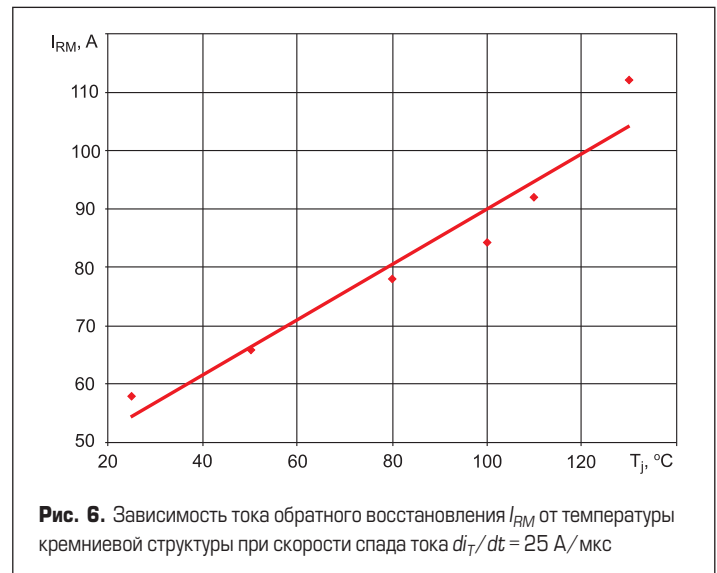
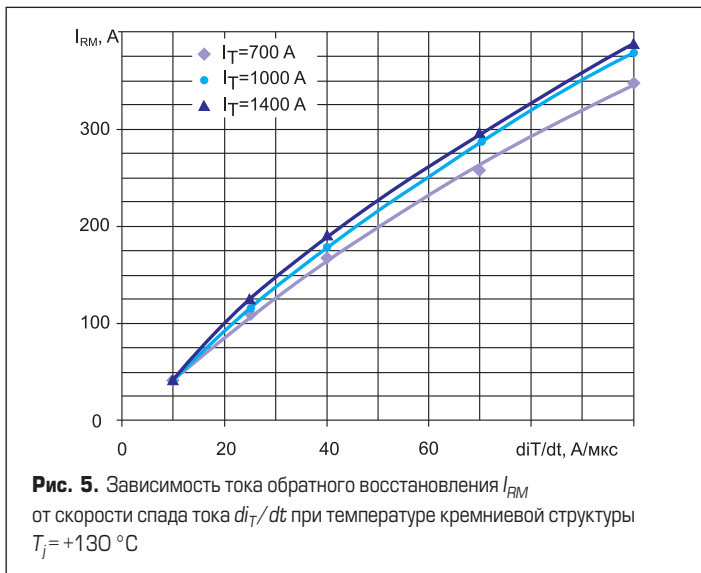
Особенности эксплуатации модулей в составе преобразователей на магистральных нефте- и газопроводах связаны со сложными климатическими условиями, в том числе с низкими зимними температурами (до -60 °С). При разработке нового модуля для АИТ эти требования были учтены. В первую очередь использовались конструкционные пластмассы, работающие в широком диапазоне температур -80...+150 °С. Внутренние детали корпуса залиты кремнийорганическим компаундом с высокими диэлектрическими и теплофизическими свойствами, который обеспечивает изоляцию внутри модуля и защиту полупроводниковых элементов от воздействия внешней среды и прямого попадания влаги.

**Оптимизация электрических параметров модуля**

Применение модулей в составе преобразователей для частотно-регулируемого электропривода на базе АИТ потребовало разработки приборов специальной конструкции и топологии кремниевой структуры с использованием технологии радиационного легирова-



**Рис. 4.** Распределение напряжения внутри биполярного модуля (результаты моделирования)



ния. Это позволило получить оптимальное соотношение основных параметров тиристора: малые значения падений напряжения и «мягкие» характеристики заряда обратного восстановления при высоких значениях коммутлируемых токов и напряжений.

К тиристорам, применяемым в схемах АИТ, предъявляются более жесткие требования к токам обратного восстановления  $I_{RM}$  и их скоростям спада ( $di_T/dt$ ). Использование обычных низкочастотных тиристоров становится невозможным, поскольку большие значения заряда обратного восстановления  $Q_{RR}$  и, соответственно, обратного тока  $I_{RM}$  приводят к возникновению недопустимых перенапряжений. В схемах АИТ при коммутации тиристоров скорость спада тока в открытом состоянии ( $di_T/dt$ ) находится в диапазоне 20–50 А/мкс. На рис. 5 приведена зависимость тока обратного восстановления  $I_{RM}$  тиристорного модуля с повышенным быстродействием от скорости спада ( $di_T/dt$ ) и амплитуды тока в открытом состоянии  $I_T$ .

На рис. 6 показана типовая зависимость тока обратного восстановления от температуры полупроводниковой структуры тиристора.

На рис. 7 приведена экспериментальная кривая взаимосвязи тока обратного восстановления и падения напряжения в открытом состоянии тиристорного модуля с повышенным быстродействием.

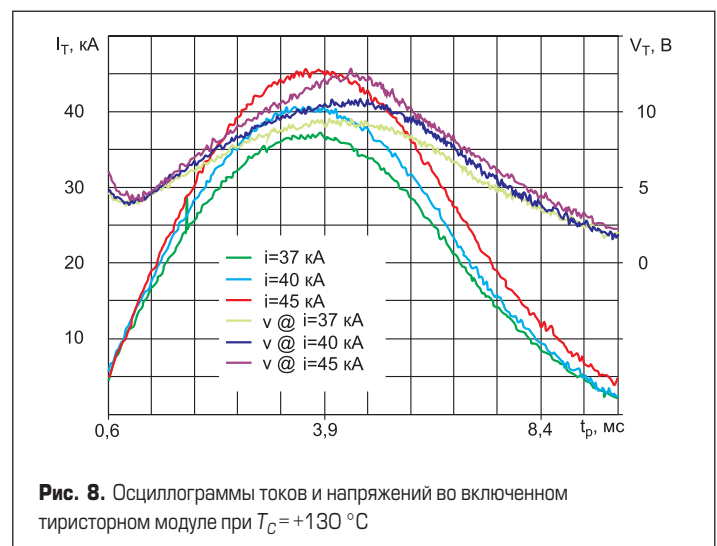
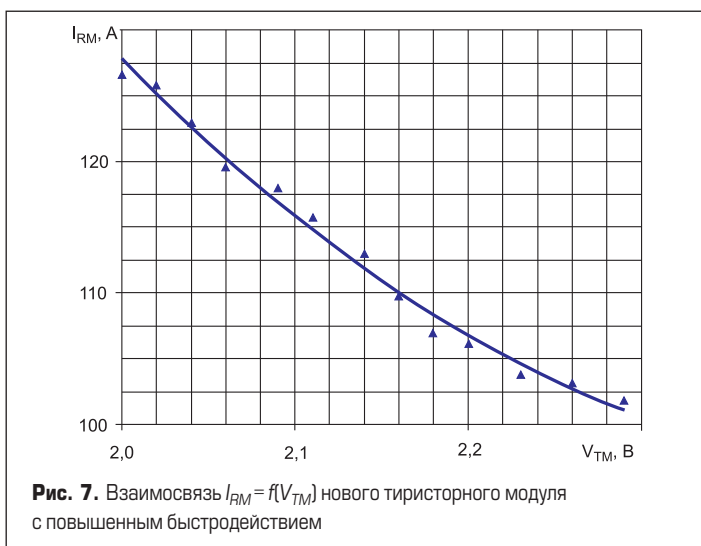
Основной эффект в увеличении токовой нагрузки в новом тиристорном модуле обеспечивается за счет использования кремниевой структуры с увеличенной активной площадью (~36 см<sup>2</sup>). Одним из важнейших параметров модуля, который характеризует предельные возможности прибора в аварийных режимах эксплуатации преобразователей, является ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии  $I_{TSM}$ . Его величина ограничивается предельнодопустимой амплитудой полусинусоидального импульса тока длительностью 10 мс. Величина  $I_{TSM}$  для нового модуля определялась экспериментальным путем. Осциллограммы падения напряжения при протекании импульсов тока через тиристорный модуль амплитудой 37, 40 и 45 кА приведены на рис. 8.

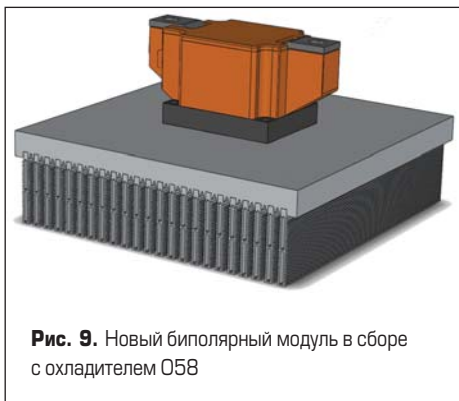
Видно, что при увеличении амплитуды тока наблюдается сдвиг максимума на кривой  $V(t)$  вправо. Это связано с джоулевым разогревом и накоплением тепла в кремни-

евой структуре при протекании импульса тока большой мощности. При достижении предельного значения тока  $I_T$  происходит резкий рост напряжения на кривой  $V(t)$  и затем такой же резкий спад. Этап нарастания напряжения объясняется сильным уменьшением подвижности носителей при высоких температурах; последующий за ним спад  $V(t)$  происходит за счет быстрой модуляции проводимости канала термогенерированной плазмы, возникающей в связи с резкой экспоненциальной зависимостью  $n_i(T)$  в диапазоне температур +400...+600 °C ( $n_i$  — собственная концентрация исходного кремния). Поэтому вывод прибора на термогенерационный пик считается предельным режимом. Предельнодопустимое значение ударного тока принимается на уровне 10–20% меньше амплитуды тока, при котором на соответствующей осциллограмме напряжения наблюдается термогенерационный пик.

**Экспериментальные результаты**

Для надежной и безотказной работы преобразователей на основе АИТ необходимо обеспечить отвод мощности потерь, выделяемой в полупроводниковом элементе



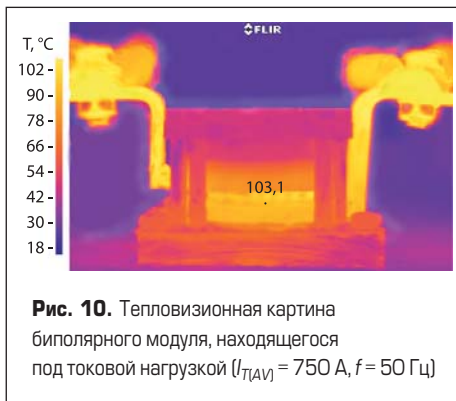


тиристорного модуля. Предельная нагрузочная способность модуля определяется максимально допустимой температурой перехода, которая не должна быть превышена в любых режимах работы полупроводникового прибора. Известно, что при снижении рабочей температуры кремниевой структуры полупроводникового прибора на 15–20% интенсивность отказов снижается в два-три раза. С учетом этого для тиристорного модуля, работающего в жестких условиях эксплуатации АИТ, предельнодопустимая температура полупроводниковой структуры была установлена на уровне +105 °С.

Конструкция мощных силовых полупроводниковых модулей с изолированными основаниями предполагает только одностороннее охлаждение. В преобразователях частоты на основе АИТ, как правило, применяется принудительное воздушное охлаждение, которое реализуется обдувом оребренной поверхности охладителя с определенной скоростью и напором охлаждающего воздуха. Для определения предельной нагрузочной способности нового тиристорного модуля были проведены его испытания под токовой нагрузкой в сборе с охладителем в условиях, приближенных к реальным. При этом с помощью тепловизионной системы FLIR проводилась регистрация ИК-излучения и определение температуры на всех деталях модуля. При испытаниях использовался охладитель О58, изготовленный из алюминиевого сплава с запрессованными ребрами размером 300×300 мм. Охладитель О58 при испытаниях располагался таким образом, чтобы его ребра были параллельны направлению потока охлаждающего воздуха. На рис. 9 приведено схематическое изображение модуля в сборе с охладителем. Для уменьшения контактного теплового сопротивления между охладителем и модулем применялась теплопроводящая паста НТС Electrolube.

На рис. 10 показана тепловизионная картина распределения температуры на модуле при протекании выпрямленного среднего тока  $I_{T(AV)} = 750$  А ( $f = 50$  Гц) при температуре окружающей среды  $T_{amb} = +25$  °С. Тепловое сопротивление охладителя  $R_{th(ha)} = 0,030$  °С/Вт при скорости охлаждающего воздуха  $v_{gh} = 6$  м/с.

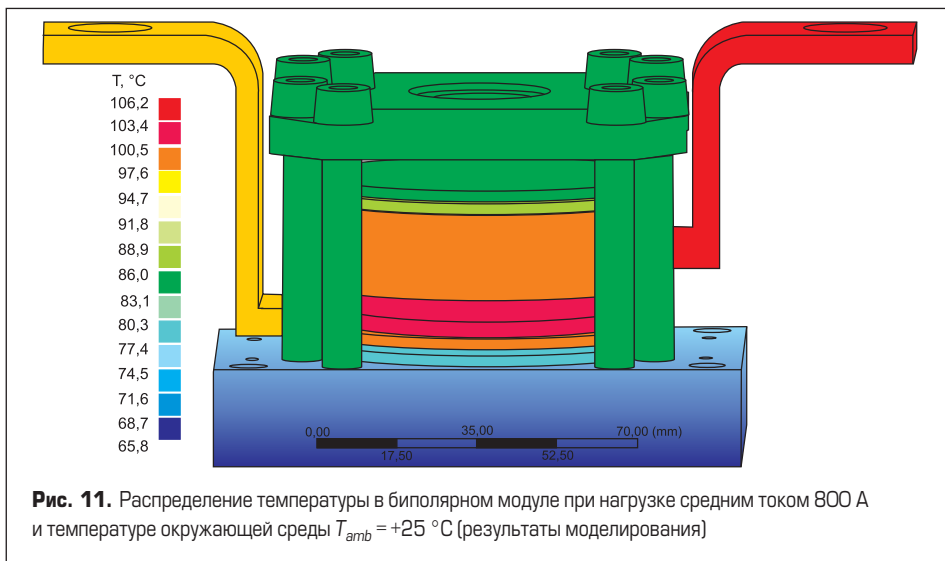
С помощью тепловизионной системы было определено, что максимальная температура в модуле при указанном выше режиме токовой нагрузки составляла +103,1 °С. Зона максимальных температур точно совпадает



с расположением полупроводникового элемента в модуле.

На рис. 11 приведены результаты теплового моделирования нового биполярного модуля с полупроводниковым элементом диаметром 76 мм при нагрузке постоянным током  $I_{T(AV)} = 800$  А и температуре окружающей среды  $T_{amb} = 25$  °С. В расчетах полупроводниковый элемент представлялся как источник тепла мощностью 1395 Вт. В целях сокращения времени расчетов охладитель задавался с коэффициентом конвекции  $\alpha = 0,00276$  Вт/мм<sup>2</sup>·°С. Расчетная температура полупроводниковой структуры составила 106 °С.

Из результатов моделирования и испытаний можно констатировать, что разработанный биполярный модуль может обеспечить



надежную и длительную работу в АИТ при нагрузке средним током до 800 А и заданных условиях охлаждения.

Разработанные модули испытывались также в составе мощных преобразователей частоты на основе автономных инверторов тока с отсекающими диодами. В схему АИТ были установлены три параллельно соединенных тиристорных модуля. Каждый тиристор нагружался средним током 433 А. К модулям прикладывалось обратное напряжение от коммутирующих конденсаторов АИТ амплитудой 1250 В. Скорость спада тока в открытом состоянии через три параллельно соединенных тиристорных модуля была равной  $-di_T/dt = 63$  А/мкс, через один модуль 21 А/мкс.

На рис. 12 показана осциллограмма напряжения при выключении тиристорного модуля. Установившееся значение напряжения в контуре коммутации 1250 В, напряжение на тиристоре с учетом коммутационных всплесков 1550 В, коэффициент перенапряжений  $\leq 1,25$ . По виду полученной осциллограммы следует отметить плавный характер спада обратного напряжения.

В таблице представлены основные параметры тиристорного модуля М1ТБ-1000-26 и комплектного диодного модуля М1ДЧ-1000-26, разработанных для преобразователей АИТ мощного частотно-регулируемого электропривода.

Таблица. Основные параметры тиристорного модуля М1ТБ-1000-26 и комплектного диодного модуля М1ДЧ-1000-26

Параметры	М1ТБ-1000	М1ДЧ-1000
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии $I_{T(AV)}$ и максимально допустимый средний прямой ток $I_{F(AV)}$ (при температуре корпуса, °C), А	1055 (70)	1155 (90)
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии $V_{DRM}$ и повторяющееся импульсное обратное напряжение $V_{RRM}$ , В	2600	2600
Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии $V_{DSM}$ и неповторяющееся импульсное обратное напряжение $V_{RSM}$ , В	2700	2700
Динамическое сопротивление $g_T$ , МОм, не более ( $T_i = T_{jmax}$ , $I = 1570-4710$ А)	0,30	0,19
Пороговое напряжение $V_{T(ТО)}$ , В, не более ( $T_i = T_{jmax}$ , $I = 1570-4710$ А)	1,25	1,00
Отпирающий постоянный ток управления $I_{GT}$ , mA, не более ( $T_i = +25$ °C, $V_D = 12$ В)	300	-
Отпирающее постоянное напряжение управления $V_{GT}$ , В, не более ( $T_i = +25$ °C, $V_D = 12$ В)	3,5	-
Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии $I_{DRM}$ и повторяющийся импульсный обратный ток $I_{RRM}$ , mA, не более ( $T_i = T_{jmax}$ , $V_{DR} = 2600$ В)	180	100
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di/dt)_{crit}$ , А/мкс, не менее ( $T_i = T_{jmax}$ , $V_D = 0,5V_{DRM}$ , $I_T = 1400$ А, $I_{FG} = 2$ А, $t_r \leq 0,5$ мкс, $f = 50$ Гц)	250	-
Время задержки включения $t_{gd}$ , мкс, не более ( $T_i = +25$ °C, $V_D = 0,5V_{DRM}$ , $I_T = 1400$ А, $I_{FG} = 2$ А, $t_r \leq 0,5$ мкс)	3,0	-
Заряд обратного восстановления $Q_{RR}$ , мкКл, не более ( $T_i = T_{jmax}$ , $I = 1400$ А, $-(di/dt) = 25$ А/мкс, $V_R = 100$ В)	550	500
Амплитуда тока обратного восстановления $I_{RM}$ , А, не более ( $T_i = T_{jmax}$ , $I = 1400$ А, $-(di/dt) = 25$ А/мкс, $V_R = 100$ В)	110	120
Время выключения $t_q$ , мкс, типичное ( $T_i = T_{jmax}$ , $I = 1400$ А, $-(di/dt) = 25$ А/мкс, $V_R = 100$ В, $dv_D/dt = 50$ В/мкс)	80	-
Электрическая прочность изоляции $V_{isol}$ , В (действующее значение)	4000	4000
Тепловое сопротивление переход-корпус (DC) $R_{th(j-c)}$ , °C/Вт	0,028	0,028
Максимально допустимая температура перехода $T_{jmax}$ , °C	130	140

**Выводы**

Результаты моделирования и экспериментальных исследований показали принципиальную возможность создания высокомоощных модулей с диаметром полупроводникового элемента 76 мм. Применение новых биполярных модулей позволит улучшить технические характеристики и надежность преобразователей частоты на основе автономного инвертора тока для мощного асинхронного электропривода.

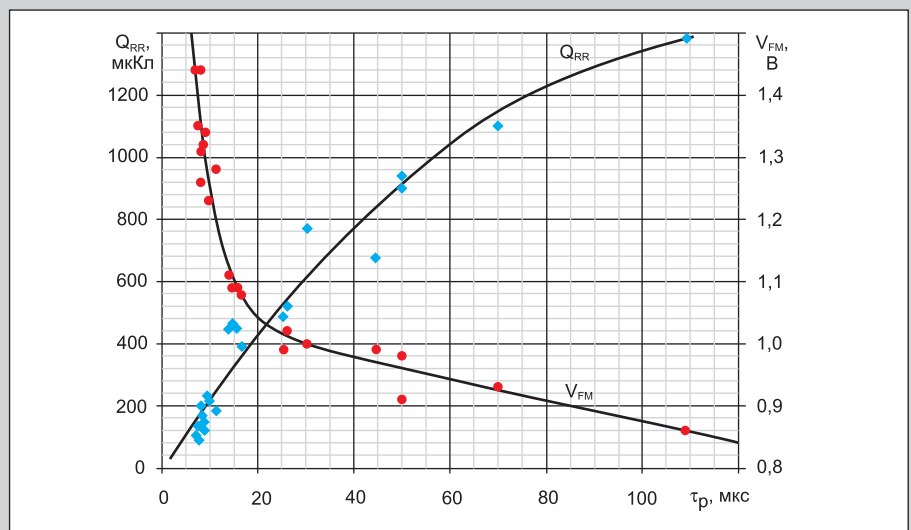
Авторы благодарят А. Ю. Бару за предоставленные материалы по результатам испытаний модулей в составе мощных преобразователей частоты на основе автономных инверторов тока с отсекающими диодами.

**Литература**

1. Сокол Е., Бару А., Шинднес Ю., Лукпанов Ж. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов магистральных нефтепроводов // Электротехника. 2004. № 7.

В №4'2012 в статье «Оптимизация параметров мощного лавинного диода для работы в многофазных выпрямителях на средних частотах» на рис. 4 (стр. 44) допущена неточность в обозначениях кривых.

Верный рисунок:



Авторы приносят свои извинения