

Новые высоковольтные мощные тиристоры

со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах

Пантелей Дерменжи
Юрий Локтаев
Алексей Сурма
Анатолий Черников

inbox@proton-electrotex.com

Несмотря на значительное развитие преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT, GTO, IGCT), для ряда областей применения, особенно в высокомошной и высоковольтной силовой электронике, по-прежнему технически оправданным и востребованным остается применение «традиционных» мощных тиристоров.

Основные тенденции развития этого типа силовых полупроводниковых приборов можно охарактеризовать следующим образом:

- Достигнуто увеличение максимальной мощности, коммутируемой отдельным прибором. Освоен диапазон блокируемых напряжений до 8000 В с реальной перспективой его расширения до 12 000 В. Освоен диапазон до 3000 А по среднему току отдельного тиристора, что соответствует диаметру отдельного кремниевого тиристорного элемента 100–150 мм.
- Формируется устойчивая рыночная ниша высоковольтных силовых приборов для работы на промышленной частоте.
- Повышаются требования к надежности и ресурсу. Ведущие фирмы начинают сравнивать гарантированный ресурс работы мощных тиристоров с ресурсом работы электровозов, трансформаторов, дуговых электропечей и других объектов, где тиристоры находят применение. Стандартным требованием к прибору становится термодинамическая устойчивость корпуса.

Важным направлением совершенствования конструкции мощных тиристоров, которое позволяет увеличить их надежность, является применение элементов самозащиты, интегрируемых в кремниевую структуру тиристорного элемента [1], что позволяет исключить выход из строя при возникновении несанкционированного режима работы.

К таким режимам, выходящим за пределы области безопасной работы и потому недопустимым при эксплуатации обычных тиристоров, следует, в частности, отнести включение мощных тиристоров в так называемых «динисторных» режимах (без внешнего сигнала управления), а именно путем приложения в прямом направлении:

- перенапряжений (импульсов напряжения, нарастающих со скоростями ниже критической скорости);

- импульсов напряжения, нарастающих со скоростями выше критической скорости;
- импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств (время задержки импульса прямого напряжения после окончания импульса анодного тока меньше времени выключения $t < t_q$).

Переключение тиристора в указанных режимах происходит обычно в пределах локальной области малой площади. При этом, так как расширенные включенной площади происходит достаточно медленно, импульс тока с амплитудой даже много меньшей среднего тока тиристора может привести к необратимой деградации полупроводниковой структуры.

Если для первого и второго режимов, указанных выше, защита может быть достаточно эффективно осуществлена с помощью внешних элементов в составе схемы управления (драйвера), то для третьего режима это весьма затруднительно, поскольку реальное время выключения тиристора зависит от многих факторов, изменяющихся в процессе функционирования тиристора в аппаратуре (температуры полупроводниковой структуры, амплитуды анодного тока и напряжения, скорости изменения этих величин при выключении). При этом опасным для тиристора является обычно довольно узкий временной интервал времени задержки импульса прямого напряжения, когда это время задержки близко к реальному значению времени выключения, но меньше его. В течение этого «опасного» интервала первоначальное включение тиристора в штатном режиме происходит в пределах локальной области с малой площадью, вследствие чего возможен его выход из строя при нарастании «аварийного» анодного тока (рис. 1).

Несмотря на кажущуюся невысокой вероятностью неблагоприятного развития аварийной ситуации, проблема защиты мощных тиристоров от пробоя в описанном режиме весьма актуальна. Так, в [2] был проведен анализ отказов тиристоров при их работе в высоковольтной преобразовательной аппаратуре Выборгской вставки постоянного тока, где одновременно эксплуатируется 6 тысяч тиристоров Т273-1250 42-го класса. Было показано, что более половины отказов могут быть интерпретированы как

следствие развития аварийной ситуации при приложении «нештатного» импульса прямого напряжения к тиристорному до завершения процесса восстановления его запирающих свойств. Аналогичные результаты были получены при анализе отказов тиристорных Т453-500 40-го класса и ТБ853-800 22-го класса в процессе отработки и эксплуатации преобразователя электропоезда «ЭТ2А» с асинхронным приводом.

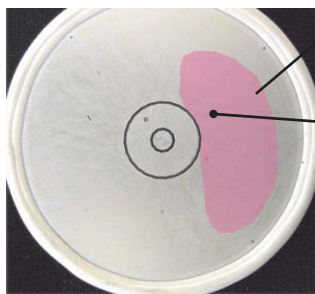
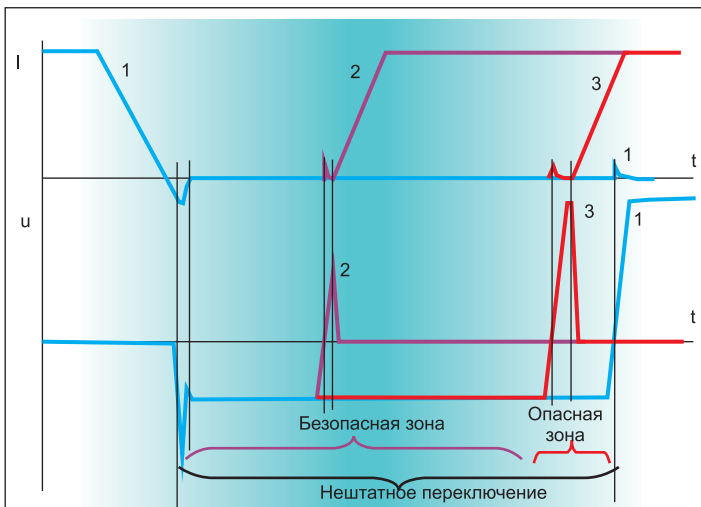
Задача создания тиристора с защитой от выхода из строя в описанном режиме сводится к обеспечению достаточного периметра области первоначального включения при любых режимах штатного переключения. Если принять, что условия изменения анодного тока на переднем фронте при аварийном переключении не превышают допустимых пределов для «штатного» включения при подаче импульса тока управления, то периметр области первоначального включения при штатном переключении должен быть не меньше, чем периметр управляющего электрода (УЭ) тиристора (или суммы периметров УЭ вспомогательного и основного тиристорных, если используется вспомогательная тиристорная структура). Чтобы гарантировать контролируемую конфигурацию области первоначального включения в штатном режиме, применяются различные конструктивно-технологические мероприятия:

- Комплекс технологических мер, направленных на достижение равномерного по площади тиристорной полупроводниковой структуры исходного распределения таких величин, как время жизни носителей заряда в базовых и эмиттерных слоях, слоевого сопротивления p -базы и др., что позволяет исключить появление «неконтролируемой» локальной области первоначального включения в штатном режиме.
- Создание локальной области (или группы областей) с контролируемой конфигурацией, в пределах которой время выключения больше, чем в других областях тиристорной структуры. При штатном переключении эта область (или группа областей) гарантированно будет переключаться первой и обеспечит необходимый периметр области первоначального включения. В качестве методов получения таких областей могут быть использованы: создание локальных по площади областей пониженной рекомбинации в n -базовом слое; локальные области с уменьшенной эффективностью распределенной катодной шунтировки и др.
- Комплекс мер, позволяющих в любом случае получить конфигурацию области первоначального включения, соответствующую проектируемой. Сегодня для обеспечения требуемого периметра области первоначального

включения используются методы создания областей с «градиентным» распределением «локального» времени выключения (при этом площадь области первоначального включения может изменяться, но ее периметр меняется слабо), а также различные конструктивно-технологические методы, использующие «передачу» включения на область вблизи управляющего электрода.

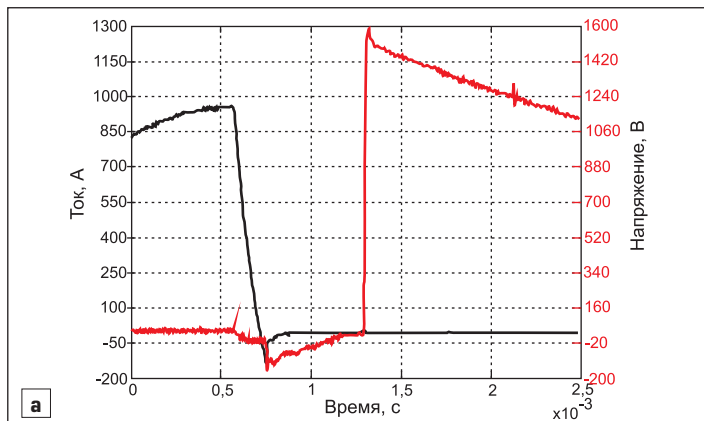
Осуществление указанных конструктивно-технологических мероприятий позволило разработать и применить в массовом производстве технологию изготовления тиристорных, обладающих стойкостью к несанкционированному переключению в режиме с приложением импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств [3].

В настоящее время ЗАО «Протон-Электротекс» производит серию тиристорных, стойких к аварийному переключению при неполном восстановлении запирающей способности, предназначенных для комплектации устройств электроэнергетики и транспорта. Эти приборы способны безопасно переключаться в таком режиме и коммутировать импульсы аварийного тока $I_{TM(tq)}$ амплитудой не менее оговоренного паспортного значения. Типичные осциллограммы тока и напряжения при переключении такого тиристора в процессе его тестирования показаны на рис. 2.

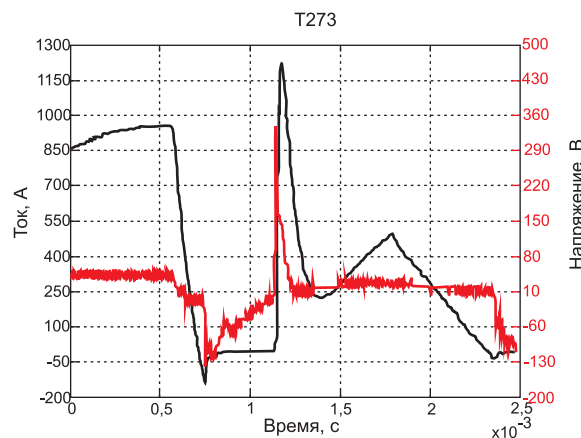


2-Область первоначального включения большой площади (безопасное переключение)
3-Область первоначального включения малой площади (опасность выхода из строя)

Рис. 1. Зависимости анодного тока и напряжения от времени в процессе штатного переключения при подаче импульса прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств: 1 — «штатный» процесс выключения ($t > t_{q1}$), аварийное переключение не происходит; 2 — аварийное переключение в «безопасной» зоне, область первоначального включения имеет большую площадь и периметр; 3 — аварийное переключение в «опасной» зоне, область первоначального включения имеет малые площадь и периметр



а



б

Рис. 2. Типичные осциллограммы тока и напряжения при переключении тиристора, стойкого к аварийному переключению при неполном восстановлении запирающей способности, в процессе его тестирования: а) тиристор не переключается (время задержки подачи импульса прямого напряжения больше времени выключения t_{q1}); б) переключение тиристора в «опасной» зоне (время задержки подачи импульса прямого напряжения близко к значению времени выключения t_{q1} , но меньше его)

Таблица. Основные характеристики новых приборов

Параметр и единица измерения	Тип прибора (новые разработки)		
	T453C-800	T273C-1250	T173C-1600
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{DRM}/U_{RRM} , В	2400/3200	4200/4400	3600/4000
Максимально допустимый средний прямой ток $I_{T(AV)}$, А	800 (+85 °C)	1250 (+85 °C)	1600 (+85 °C)
Импульсный аварийный прямой ток $I_{T(тq)}$, А (при $t \leq t_q$)	800	1250	1600
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии I_{TSM} , кА	15	33	36
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di_T/dt)_{crit}$, А/мкс	630	250	250
Температура перехода, °C	максимально допустимая, T_{jmax}		
	минимально допустимая, T_{jmin}		
Импульсное напряжение в открытом состоянии U_{TM} , В, не более	2,3	2,1 (3925 А)	2,05
Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии и повторяющийся импульсный обратный ток I_{DRM}/I_{RRM} , mA, не более	100	150	150
Отпирающее постоянное напряжение управления U_{GT} , В, не более	5,0	3,0	3,0
Отпирающий постоянный ток управления I_{GT} , А, не более	0,40	0,3	0,30
Гарантированный ресурс, лет	15	15	15
Время выключения t_q , мкс, не более	160–250	250–500	250–500
Время выключения t_{q0} при $U_R = 0$, мкс, не более	$1,2t_q$	$1,2t_q$	$1,2t_q$
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $(dU_D/dt)_{crit}$, В/мкс, не менее	1600	1000–1600	1000–1600
Тепловое сопротивление переход-корпус R_{thjc} , °C/Вт, не более	0,02	0,01	0,01
Габариты корпуса	высота, мм	26	26
	диаметр, мм	75	107
Масса, кг	0,5	1,2	1,2

Основные характеристики новых приборов приведены в таблице.

Литература

1. Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U. Self-protected high-power thyristors // Proc. PCIM 2001. Power Conversion, Nuernberg.
2. Лазарев Н. С., Локтаев Ю. М., Лытаев Р. А., Колюхов А. В., Чесноков Ю. А., Прочан Г. Г. Оценка состояния тиристоров Т373-1250 в блоках БВПМ 800/120 на Выборгской подстанции // Известия НИИ постоянного тока. 2004. № 2(60).
3. Дерменжи П. Г., Колюхов А. В., Лапшина И. Н., Локтаев Ю. М., Чесноков Ю. А., Черников А. А. К вопросу о расширении областей безопасной работы мощных тиристоров. Тезисы докладов конф. «Современное состояние развития приборов силовой электроники и преобразовательной техники». Саранск. Изд. ОАО «Электровыпрямитель». 2004.