

Исследования мощных фототиристоров

в предельных импульсных режимах работы

В статье представлены результаты исследований мощных тиристоров с прямым управлением светом в предельных режимах работы высоковольтных коммутаторов больших импульсных токов, значительно превышающих рабочий режим. Исследовались четырехдюймовые 4,5-кВ импульсные фототиристоры, предназначенные для 100-кА/12-кВ разрядных ключей емкостных накопителей электрической энергии с временами разрядного процесса до 1 мс. Разработана методология тестовых испытаний импульсных фототиристоров, позволяющая выявлять потенциально ненадежные приборы.

Алексей Хапугин

khapugin@elvpr.ru

Александр Плотников

plotnikov@elvpr.ru

Валентин Мартыненко

martin@elvpr.ru

Алексей Гришанин

grishanin@elvpr.ru

Станислав Кострицкий

nicpp@elvpr.ru

Владимир Картаев

nicpp@elvpr.ru

Введение

В настоящее время мощные тиристоры с электрическим (ЕТТ) и прямым оптическим управлением (ЛТТ) широко применяются в качестве разрядных ключей в системах накопления и коммутации электрической энергии в различных технологических и электрофизических установках. Схема и конструкция этих ключей, а также режим работы тиристоров определяются назначением и техническими характеристиками системы коммутации. Как правило, к тиристорному ключу антипараллельно подсоединяется высоковольтная диодная сборка [1], либо разрядный ключ изготавливается на основе импульсных тиристоров с обратной проводимостью [2]. В обоих случаях реализуется «легкий» для тиристоров режим коммутации импульсных токов без приложения обратного напряжения.

В некоторых импульсных применениях по разным причинам инверсные диоды не могут быть использованы [3, 4]. Тогда, после протекания импульса прямого тока, к прибору прикладывается отрицательное напряжение, запускающее процесс выключения тиристора с высокой скоростью спада прямого тока.

Режим работы тиристоров в мощных системах коммутации характеризуется переключением импульсов тока амплитудой до 100 кА и более, длительностью от нескольких десятков до сотен микросекунд. В этом случае отрицательное напряжение в сочетании с высокой скоростью спада прямого тока вызывает большой пиковый обратный ток тиристора и, как следствие, опасные индукционные всплески напряжения на нем.

На рис. 1 представлен разрядный ключ на основе четырехдюймового 4,5-кВ фототиристора ЛТТ

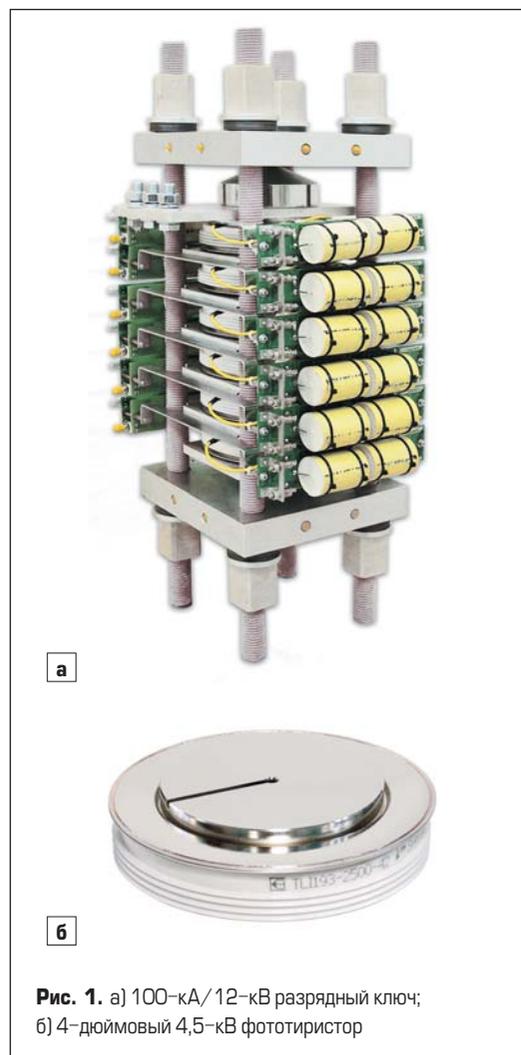
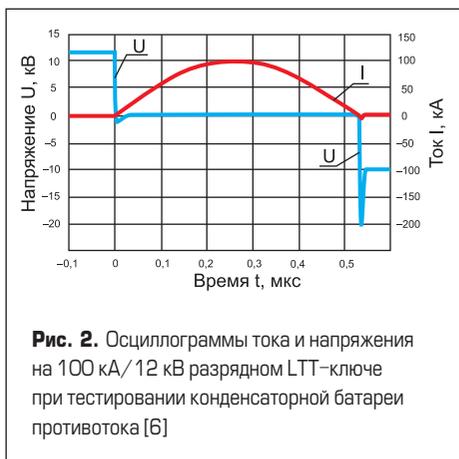


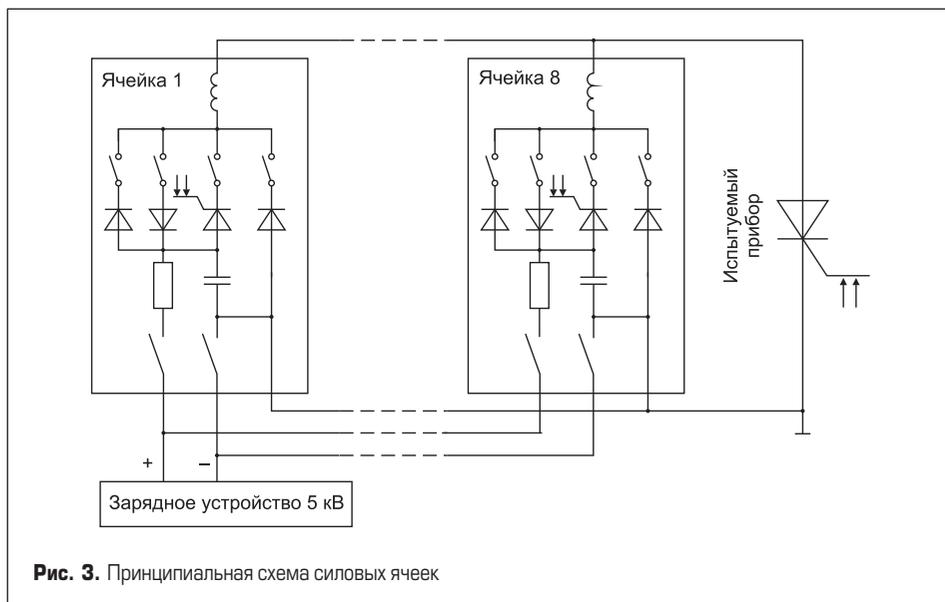
Рис. 1. а) 100-кА/12-кВ разрядный ключ; б) 4-дюймовый 4,5-кВ фототиристор



[5], предназначенный для работы в режиме коммутации 100 кА/12 кВ. На рис. 2 показаны осциллограммы тока и напряжения в упомянутом ЛТТ-ключе, полученные при тестировании батареи противотока системы защитного вывода энергии ПТЕР [6].

Тестирование батареи проводилось в режиме короткого замыкания. В этом режиме проходящий через ключ ток имел форму одной полуволны синусоиды. При тестировании выключение фототиристоров сопровождалось появлением обратного напряжения на ключе, близкого по величине напряжению заряда конденсатора, с добавлением импульса перенапряжения, вызванного обратным восстановлением тиристоров в цепи с индуктивностью. Как видно на рис. 2, пик обратного напряжения на ЛТТ-ключе достигает 20 кВ.

Напряжение, которое может выдерживать ключ, состоящий из шести последовательно соединенных фототиристоров с $V_{RSM} \approx 6$ кВ, равно 36 кВ. Так что имеется 1,8-кратный запас по напряжению, который должен обеспечивать надежную работу коммутатора. Проведенные измерения пиков перенапряжений на каждом



из шести фототиристоров при коммутации тока 100 кА и последующем обратном восстановлении показали также, что их значения находились в диапазоне 3–4 кВ и не превышали предельно допустимой величины V_{RSM} . Тем не менее испытания в этом режиме первых опытных образцов ЛТТ в составе разрядных ключей у потребителя показали, что в некоторых ключах имел место пробой одного или двух фототиристоров из шести включенных последовательно. Это притом, что на приборах проводились полный набор стандартных испытаний статических и динамических параметров в соответствии с ИЕС 60747-6 и тщательный подбор ЛТТ по параметрам обратного восстановления.

Для выяснения возможных причин выхода фототиристоров из строя проведены исследования:

- прямой вольтамперной характеристики ЛТТ при высоких плотностях тока, значительно

превышающих рабочий режим коммутаторов;

- устойчивости ЛТТ к воздействию перегрузок обратным напряжением импульсной мощностью 0,5–3 МВт;
- стойкости ЛТТ в режиме переключения больших импульсов токов с высокими скоростями коммутации при обратном восстановлении.

Измерительная установка

Исследования прямой вольтамперной характеристики и коммутирующей способности ЛТТ с приложением обратного напряжения проводились на конденсаторной установке, построенной в ПАО «Электровыпрямитель». Силовая часть схемы и внешний вид установки показаны на рис. 3, 4.

Испытательный стенд состоит из восьми силовых ячеек, зарядного устройства, системы



а



б

Рис. 4. Установка для импульсных испытаний силовых полупроводниковых приборов: а) шкаф управления; б) силовые ячейки

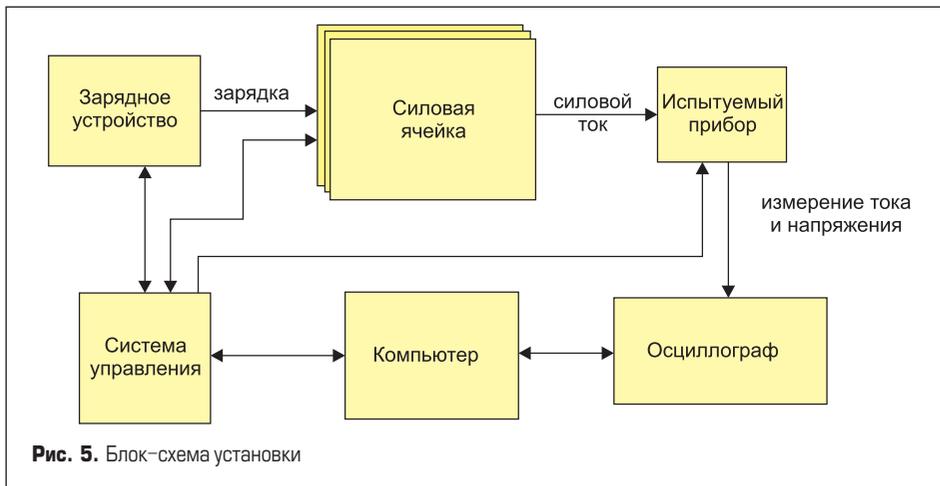


Рис. 5. Блок-схема установки

управления, системы измерений, компьютера с программой управления, сбора и обработки данных (рис. 5).

Силовая ячейка содержит:

- батарею конденсаторов суммарной емкостью 2 мФ, с напряжением заряда 9000 В;
- дроссель с индуктивностью 7 мГн;
- блок контакторов для подключения тиристорного ключа, разделительного и кроу-барного диодов;
- датчики контроля контакторов, напряжения заряда конденсаторной батареи.

Зарядное устройство обеспечивает заряд конденсаторной батареи до 5000 В с максимальной зарядной мощностью 5 кДж/с.

Система управления состоит из шкафа автоматики и компьютера (рис. 4а). Она осуществляет контроль заряда конденсаторной батареи, управление контакторами, контроль состояния контакторов, включение тиристорного ключа в каждой силовой ячейке.

Система измерений состоит из осциллографа Tektronix DPO 3014, высоковольтного делителя напряжения LeCroy PPE 5 кВ с коэффициентом деления 100:1, пояса Роговского PEM SWT1500xВ с чувствительностью 0,02 мВ/А.

Программа управления системой позволяет реализовать следующие действия и виды испытаний:

- выборочно подключать силовые ячейки к испытываемому прибору;
- задавать и контролировать величину напряжения заряда при заряде конденсаторных батарей;
- конфигурировать включение контакторов в силовых ячейках согласно выбранному виду испытаний и контролировать их состояние;
- включать тиристорные ключи в выбранных силовых ячейках;
- формировать задержку включения тиристорного ключа каждой силовой ячейки индивидуально в пределах 0–100 мкс с шагом 20 нс;
- получать результаты измерений тока и напряжения от осциллографа с их сохранением;
- контролировать состояние диодных сборок и тиристорного ключа в каждой силовой ячейке и в случае выхода их из строя сообщать об этом оператору и останавливать процесс испытаний.

Восемь силовых ячеек подключено параллельно на испытываемый прибор силовым коаксиальным кабелем. При одновременном

включении всех силовых ячеек испытательный стенд имеет следующие электрические параметры: общая емкость конденсаторов 16 мФ, запасенная энергия 200 кДж, максимальное амплитудное значение разрядного тока 400 кА при напряжении заряда конденсатора до 5000 В. Форма импульса тока близка к синусоиде, длительность у основания импульса (0,1 амплитуды) — 520 мкс. Испытуемый фототиристор включается импульсом лазерного излучения длиной волны 900–980 нм, мощностью 200 мВт и длительностью 50 мкс.

Цикл испытания следующий. По команде оператора программа управления конфигурирует испытательный стенд согласно заданному виду испытаний. Далее производится заряд выбранных силовых ячеек. По окончании заряда компьютер отключает зарядное устройство и формирует цикл запуска. В данном цикле выдаются лазерные импульсы на ЛТТ-ключи выбранных силовых ячеек. Силовые ячейки разряжаются через испытываемый ЛТТ, а осциллограф производит регистрацию протекающих процессов, таких как силовой ток через испытываемый прибор и напряжение, приложенное к испытываемому прибору. По окончании цикла силовые ячейки разряжаются, контакторы выключаются, и осциллограф передает на компьютер результаты измерений.

Экспериментальные результаты

Нагрузочная способность фототиристоров

Важнейшим условием надежной работы разрядного ключа является высокая устойчивость фототиристоров к воздействию импульсных токов. Она определяется максимальной температурой полупроводниковой структуры, которая зависит от параметров протекающих импульсов тока (амплитуда, длительность, форма) и собственных характеристик ЛТТ, прежде всего прямого падения напряжения.

Для подтверждения специфицированных (рабочих) значений импульсов тока, а также определения предельных и разрушающих коммутируемых токов проведены нагрузочные испытания и измерения прямой вольт-амперной характеристики ЛТТ в широком диапазоне токов, в том числе при амплитудах тока, значительно превышающих рабочий режим разрядного ключа.

Фототиристоры включались импульсами света мощностью 200 мВт и коммутировали редко повторяющиеся импульсы тока до 170 кА. При этом измерялись импульсный ток и прямое падение напряжения. По форме импульса напряжения, его максимальному значению и смещению пика напряжения относительно пика импульса тока определялся предельно допустимый коммутируемый ток ЛТТ, выше которого прибор может выйти из строя.

На рис. 6–8 показаны импульсы тока и прямого падения напряжения на ЛТТ соответственно в режимах: рабочем, предельном и токовой перегрузки, при которой происходит шнурование тока и пробой прибора.

На рис. 6 форма кривой падения напряжения практически полностью соот-

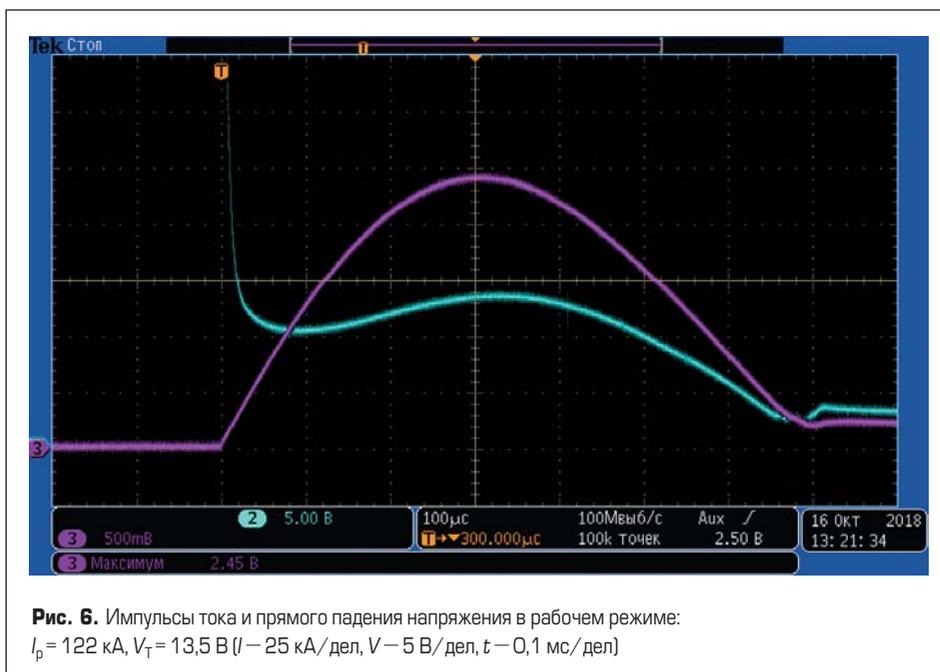


Рис. 6. Импульсы тока и прямого падения напряжения в рабочем режиме:

$$I_p = 122 \text{ кА}, V_T = 13,5 \text{ В} (I - 25 \text{ кА/дел}, V - 5 \text{ В/дел}, t - 0,1 \text{ мс/дел})$$

ветствует хорошо известной стандартной кривой падения напряжения при включении тиристора. Имеет место лишь небольшой сдвиг пика напряжения вправо относительно пика тока, что связано с нагревом кремниевой структуры LTT от протекающего тока.

На осциллограмме рис. 7 видно, что в предельном режиме джоулевый разогрев кремниевой структуры LTT приводит к запуску термогенерационный процесс, который искажает форму импульса прямого падения напряжения с возникновением справа на кривой характерного пика напряжения. В данном примере фототиристор сохранил свои блокирующие характеристики. При последующем незначительном увеличении импульса тока (рис. 8) термогенерационный пик напряжения резко возрос, прибор при этом вышел из строя из-за разрушительного шнурования тока.

На рис. 9 представлена вольтамперная характеристика LTT во включенном состоянии в области больших импульсов тока. Зеленые точки — это результаты измерений, синяя кривая — расчетная прямая ВАХ. Кроме того, здесь показана расчетная зависимость максимальной температуры кремниевой структуры LTT от коммутируемого тока (красная кривая). Расчеты выполнены в программном комплексе Synopsys Sentaurus TCAD. В целом видно хорошее совпадение измеренной и расчетной прямых ВАХ. Расхождение этих ВАХ при токах выше 160 кА связано с тем, что расчеты не учитывали феномен шнурования тока при быстром разогреве кремния, приводящего к неконтролируемому развитию термогенерационных процессов.

На вольтамперной характеристике LTT (рис. 9) можно условно выделить три области. Область 1 распространяется до амплитуды

тока 120 кА. В этой области допускается многократно повторяющийся режим нагрузки импульсным током амплитудой до 100–120 кА. Область 2 соответствует предельному режиму нагрузки с амплитудой тока 125–160 кА. В этой области тиристоры после включения остаются работоспособными, но при этом их ресурс снижается и чем ближе коммутируемый ток к 160 кА, тем меньше их ресурс. Область 3 — запрещенный режим работы прибора.

Для четырехдюймового 4,5-кВ LTT рабочий режим нагрузки в батарее противотока ограничен амплитудой тока до 100 кА. Он существенно меньше предельного импульса тока, что дает предпосылки ожидать от прибора высокой надежности во время эксплуатации. В подтверждение сказанному, на рис. 10 представлена расчетная зависимость максимальной температуры разогрева кремниевой структуры фототиристора от времени при коммутации импульса тока в штатном режиме работы 100-кА/12-кВ LTT-ключа. Видно, что максимальная температура кремниевой структуры LTT в этом режиме не превышает +125 °С, что способствует долговременной работе ключа.



Рис. 7. Импульсы тока и прямого падения напряжения в предельном режиме: $I_p = 164,5 \text{ кА}$, $V_T = 18 \text{ В}$, $V_{cg} = 26 \text{ В}$ ($I - 25 \text{ кА/дел}$, $V - 10 \text{ В/дел}$, $t - 0,1 \text{ мс/дел}$)



Рис. 8. Импульсы тока и прямого падения напряжения в момент пробоя LTT прямым током: $I_p = 170 \text{ кА}$, $V_{cg} > 35 \text{ В}$ ($I - 25 \text{ кА/дел}$, $V - 5 \text{ В/дел}$, $t - 0,1 \text{ мс/дел}$)

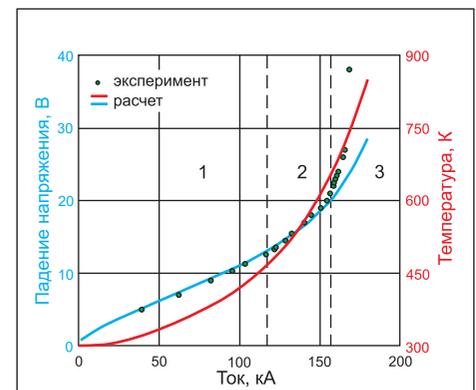


Рис. 9. Вольтамперная характеристика LTT во включенном состоянии в области больших токов (зеленые точки — эксперимент, синяя кривая — расчет). Красная кривая — расчетная зависимость максимальной температуры кремниевой структуры LTT от тока

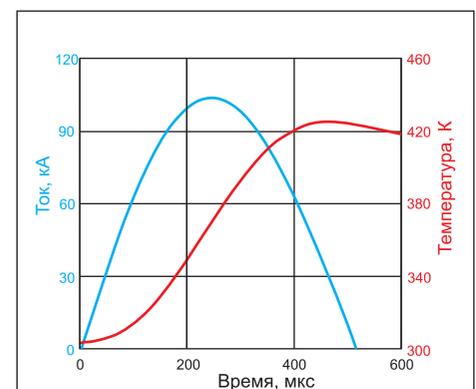


Рис. 10. Зависимость максимальной температуры кремниевой структуры LTT от времени (красный цвет) при коммутации импульса прямого тока амплитудой 100 кА (синий цвет)

Исследование лавинной устойчивости фототиристоров

Выше отмечено, что при работе в 100-кА/12-кВ LTT-ключках фототиристоры имели достаточно большие запасы как по рабочему напряжению и току, так и по температуре кремния. Однако это не давало 100% выхода на испытаниях у заказчика первых образцов LTT-ключей в режиме, изображенном на рис. 2. Для решения этой проблемы в программу рутинных испытаний были включены испытания LTT обратной ударной мощностью, подобно тем, что проводятся на лавинных диодах. К фототиристорам в обратном направлении прикладывались одиночные импульсы напряжения трапе-

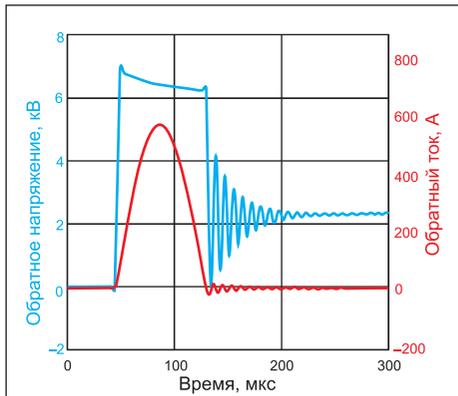


Рис. 11. Импульсы тока и напряжения при испытаниях лавинной устойчивости LTT

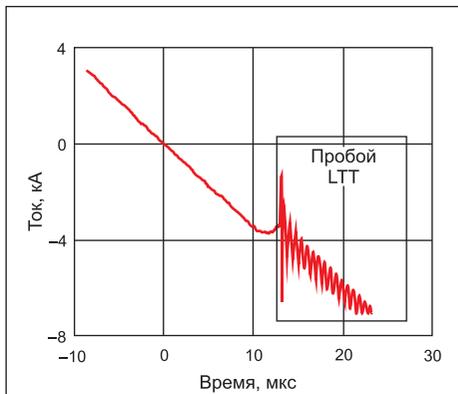


Рис. 12. Пробой LTT при обратном восстановлении

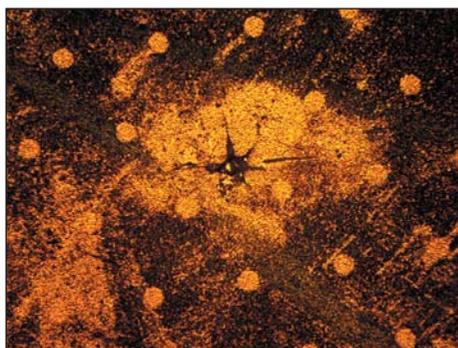


Рис. 13. Характерный вид участка пробоя LTT динамической лавиной

цидальной формы длительностью 100 мкс амплитудой около 6500 В, при этом токи на лавинном участке обратной ВАХ достигали 500 А. Осциллограммы импульсов тока и напряжения при испытаниях лавинной устойчивости LTT показаны на рис. 11.

Большинство тиристоров эти испытания успешно выдержали. Они также показали лучшие результаты при испытаниях в разрядных ключах у потребителя, но, тем не менее, пробы продолжались.

Исследование стойкости фототиристоров к импульсным токам с приложением обратного напряжения

Очередным шагом было введение в программу испытаний фототиристоров нагрузки приборами импульсами тока до 100 кА, с последующим приложением обратного напряжения амплитудой до 3500 В. Испытания проводились на описанной выше конденсаторной установке, которая была соответственно перепрограммирована для испытаний фототиристоров в этом режиме.

Измерялись параметры обратного восстановления: ток (I_{rr}), заряд (Q_{rr}) и время (t_{rr}) обратного восстановления фототири-

ров, а также скорости спада прямого ($-di/dt$) и обратного (di_R/dt) токов. Значения этих параметров для одной из групп тиристоров, используемых в высоковольтных сборках разрядных LTT-ключей, показаны в таблице.

С целью улучшения динамического деления напряжения на последовательно соединенных фототиристорах при выключении высоковольтной сборки элементы LTT подвергались специальному выравнивающему облучению электронами. Режим облучения был подобран таким образом, чтобы обеспечить узкий разброс параметров и сохранить высокие импульсные токи. Разброс I_{rr} и Q_{rr} во всех группах LTT не превышал 1,5%. Из таблицы видно, что при нагрузке фототиристора импульсом тока 100 кА с приложением обратного напряжения этап восстановления блокирующей способности характеризуется высокими обратными токами и скоростями коммутации. Испытания показали, что некоторые приборы при испытаниях в конденсаторной установке этот режим не выдерживают.

Было установлено, что пробой происходил при напряжениях значительно меньших

Таблица. Динамические параметры LTT ($I_p = 100$ кА, $V_R = 3,5$ кВ)

№ LTT	I_{rr} , А	t_{rr} , мкс	Q_{rr} , мкКл	$-di/dt$, А/мкс	di_R/dt , А/мкс
'62_11'	3475	16,06	31113	350	854
'58_9'	3477	16,14	31389	352	845
'62_14'	3502	16,13	31589	353	857
'61_1'	3539	16,55	32764		808
'63_1'	3553	16,6	33003	351	816
'61_39'	3562	16,36	32529	354	849

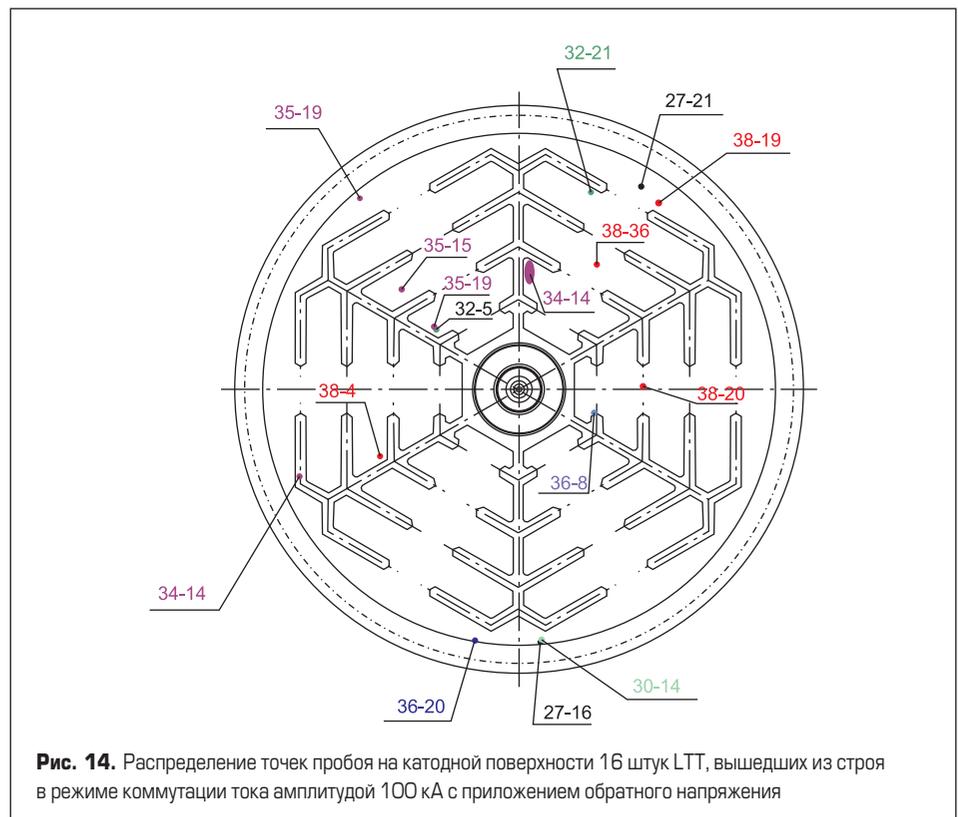


Рис. 14. Распределение точек пробоя на катодной поверхности 16 штук LTT, вышедших из строя в режиме коммутации тока амплитудой 100 кА с приложением обратного напряжения

неповторяющегося напряжения V_{RSM} испытуемых приборов (до 1000 В). На рис. 12 показан типичный случай выхода фототиристора из строя после коммутации импульса тока 100 кА на этапе восстановления запирающей способности при спаде обратного тока. Характерный вид участка кремниевой структуры LTT после этого пробоя показан на рис. 13 и может быть связан с разрушением прибора динамической лавиной [7].

Тиристоры, выдержавшие на конденсаторной установке коммутацию импульсным током 100 кА с последующим обратным восстановлением, затем успешно прошли все виды испытаний у потребителя 100-кА/12-кВ LTT-ключей при тестировании конденсаторной батареи противотока.

Обсуждение

Результаты исследований показали высокую устойчивость фототиристоры к импульсным токам без фазы выключения и лавинным перегрузкам обратным напряжением. Хорошие результаты получены при отборе фототиристоры для высоковольтных сборок с последовательным соединением, которые должны работать в импульсных режимах коммутации больших токов с обратным восстановлением. Потери приборов при этом составляли не более 15%.

Изучены причины выхода LTT из строя вследствие динамической лавины. Установлены места пробоя. На рис. 14 представлена «топографическая карта» расположения на катодной поверхности LTT точек пробоя 16 приборов, вышедших из строя в режиме коммутации

тока амплитудой 100 кА с приложением обратного напряжения. На рисунке видно, что большинство точек пробоя (~75%) находятся на краях четырехслойной структуры LTT в области фаски и разветвленного управляющего электрода.

Первопричиной этому с большой вероятностью является локализация коммутируемого тока в открытых участках кремниевой структуры на границе n^+-p эмиттерного перехода фототиристора. При протекании импульса прямого тока на этой границе имеет место повышенная плотность тока, которая сохраняется в тех же местах в фазе протекания обратного тока при выключении LTT. В местах с повышенной плотностью тока пробой прибора из-за динамической лавины наиболее вероятен.

Нами изучается возможность полного исключения пробоя фототиристоры из-за динамической лавины путем изменения топологии высоколегированной части анодного перехода LTT, которое должно улучшить однородность распределения плотности тока по площади фототиристора во включенном состоянии и при его выключении.

Заключение

Проверенные на конденсаторной установке фототиристоры успешно выдержали на стендах у потребителя все виды испытаний в составе 100-кА/12-кВ LTT-ключей на предельные токи и напряжения при тестировании батареи противотока системы защитного вывода энергии ITER. Проверка работоспособности LTT-ключа была подтверждена положитель-

ными результатами испытаний импульсами тока 100 кА с приложением обратного напряжения в объеме 5000 включений.

Литература

1. Przybilla J., Keller R., Kellner U., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Peppel T. Direct-Light Triggered Solid-State Switches for Pulsed Power Applications. Proc. Pulse Power Conference, 2003.
2. Hartman W., Römhald M., Donner A. A 100 kJ Pulse Unit for Electromagnetic Forming. Proc. International Conference on High Speed Forming, 2006.
3. Fridman B., Enikeev R., Kharcheva K., Kovrizhnykh N., Serebrov R. Counter pulse capacitor bank for 70 kA, 10 kV commutation system. Proc. Pulse Power Conference, 2013.
4. Wettengel S., Lindenmüller L., Bernet S., Kroll F., Brack F.-E., Pawelke J. Novel Thyristor-based Pulsed Current Converter for a Medical Application — a Conceptual Introduction. Proc. PCIM Europe, 2018.
5. Chibirkin V., Martynenko V., Khapugin A., Konuchov A., Tundykov S., Grishanin A., Enikeev R., Serebrov R. Development and Investigations of Light Triggered Thyristors for Pulse Application. Proc. PCIM Europe, 2011.
6. Serebrov R., Fridman B., Khapugin A., Martynenko V. Development and Research of Heavy Pulse Current LTT Switches // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44. No. 7.
7. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Semiconductor Power Devices. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011