

# Мощные тиристоры

## для преобразователей линий электропередачи постоянного тока

**Представлены результаты исследования современной элементной базы отечественной силовой электроники для высоковольтных тиристорных вентилях для линий электропередачи постоянного тока. Приведены характеристики мощных высоковольтных тиристоров T283–1600 нового поколения с повышенной надежностью. Выполнены исследования тиристоров в режимах их эксплуатации в составе блока вентилях модернизируемого преобразовательного комплекса ПС ±400 кВ «Выборгская».**

**Антон Самойлов**

nicpp@elvpr.ru

**Татьяна Сергунина  
Алексей Хапугин**

khapugin@elvpr.ru

**Валентин Мартыненко**

martin@elvpr.ru

**Алексей Гришанин**

grishanin@elvpr.ru

**Введение**

Системы электропередачи на постоянном токе (HVDC) доказали свою эффективность и экономичность при больших расстояниях между центрами генерации и потребления электрической энергии. Они также делают возможным соединения несинхронизированных сетей переменного тока и сетей с различными частотами с реверсивными вставками постоянного тока [1]. Наиболее широкое применение для передач и вставок постоянного тока ультравысокого напряжения получили преобразователи тока с тиристорными вентилями. Важнейшими элементами в этих преобразователях являются биполярные тиристоры большой мощности, обладающие наименьшими потерями энергии, способностью выдерживать аварийные токи, подтвержденной многолетней эксплуатацией надежностью и конкурентными ценами. Они соединяются последовательно в высоковольтные сборки, применяемые в тиристорных вентилях, в состав которых входят также системы охлаждения, снабжные цепи, выравнивающие резисторы, устройства управления, диагностики и другое оборудование.

Для постоянно растущих уровней мощности HVDC мировыми лидерами в области силового приборостроения непрерывно поддерживается тренд на разработку тиристоров с более высокими напряжениями и большими диаметрами. Последними достижениями в этом направлении являются тиристоры и фототиристоры с диаметром структуры 6 дюймов и блокирующим напряжением 8,5 кВ. Отечественная промышленность имеет возможность изготовления тиристоров с диаметром кремниевой структуры 5 дюймов и блокирующим напряжением до 8,5 кВ [2, 3]. Разработка и производство тиристоров для высоковольтных преобразователей тока всегда была прерогативой ПАО «Электровыпрямитель», который изготовил и поставил на объекты электроэнергетики несколько десятков тысяч мощных тиристоров, надежно работающих и сегодня.

**История Выборгского преобразовательного комплекса**

Вставка постоянного тока ПС ±400 кВ «Выборгская» обеспечивает бесперебойную связь двух независимых несинхронно работающих энергосистем России и Финляндии, с различным уровнем напряжения ±330 и ±400 кВ, обеспечивая стабильный переток энергии, возможность его быстрого изменения без рисков нарушения статической и динамической устойчивости энергосистем. Развитие Выборгского преобразовательного комплекса (ВПК) осуществлялось одновременно с достигнутыми возможностями производства мощных высоковольтных тиристоров. Изначально вентильные блоки были выполнены на базе тиристоров Т-630 28-го класса (1980-е годы). Каждый блок (фаза) состоял из 128 последовательно соединенных тиристорных ячейек, каждая ячейка содержала три параллельно соединенных тиристора Т-630. Общее количество тиристоров на блок достигало 384 штуки. В последующем для увеличения номинальной мощности была проведена реконструкция ВПК и тиристоры Т-630 были заменены более мощными тиристорами Т273-1250 42-го класса, а их общее количество сократилось в три раза (128 шт.). Все поставленные приборы производились на заводе «Электровыпрямитель». Опыт эксплуатации тиристоров Т273-1250 в высоковольтных тиристорных вентилях (ВТВ) ВПК, как и самой вставки, показал высокую эксплуатационную надежность ВТВ, соответствующую мировому уровню.

На сегодня отдельные ВТВ находятся в работе более 30 лет, и преобразовательное оборудование ВПК исчерпало свой ресурс. В связи с этим актуальной представляется задача реконструкции преобразовательного комплекса вставки постоянного тока, включающая разработку, изготовление и испытание блока тиристорных вентилях для ВПК на современной элементной базе, позволяющей улучшить характеристики ВПК в части показателей надежности, уменьшения потерь электроэнергии на охлаждение оборудования, периодичности и объемов технического обслуживания



Рис. 1. Высоковольтный тиристорный модуль на тиристорах T283-1600



Рис. 2. Полупроводниковый элемент и тиристор T283-1600-60

ния. При этом габаритно-присоединительные размеры ВТВ при модернизации должны быть сохранены. Предпочтительным вариантом для новых ВТВ является применение более мощных и высоковольтных тиристоров для сокращения числа последовательно соединенных приборов и комплектующих (охладители, защитные цепи, драйверы управления).

В настоящее время АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проводится поэтапная реконструкция комплектных вентильных преобразовательных устройств (КВПУ) на ПС  $\pm 400$  кВ «Выборгская» [4]. Блок вентилей преобразовательного моста новой конструкции состоит из двух ВТВ, в состав каждого вентиля в свою очередь входят четыре высоковольтных тиристорных модуля (ВТМ), соединенных последовательно.

ВТМ представляет собой устройство (рис. 1), состоящее из последовательно соединенных двух дросселей насыщения и тиристорной сборки. В тиристорную сборку входят 12 последовательно соединенных тиристоров типа T283-1600-60 и 13 охладителей с единым прижимным устройством, блок конденсаторов, резисторы цепей деления напряжения между тиристорными ячейками, стойки с блоками управления, два коллектора с трубками для подвода (отвода) охлаждающей жидкости к охладителям и дросселям насыщения.

### Тиристоры для ВТВ

Структура силовой схемы блока вентилей должна гарантировать требуемую надежность при максимальной загрузке приборов по току и напряжению. Применение тиристора T283-1600-60 нового поколения, взамен ранее использовавшихся тиристоров T273-1250-42, позволило за счет увеличения рабочего напряжения снизить в 1,5 раза количество последовательно соединенных тиристоров в вентиле. Кроме того, тиристор T283-1600-60 имеет низкие статические и динамические потери, минимальный разброс заряда обратного восстановления  $Q_{RR}$ , низкие времена выключения  $t_q$  и высокие  $(dV/dt)_{crit}$ , устойчив к лавинным перегрузкам и токам короткого замыкания с последующим приложением обратного и прямого напряжений. Благодаря оптимизации толщины кремниевой структуры, удельного сопротивления и топологии катода, тиристор

обладает пониженным напряжением во включенном состоянии  $V_T$  для приборов данного класса. Увеличение диаметра кристалла помогло существенно сократить тепловое сопротивление тиристора, повысить его предельный и ударный токи, а снижение потерь во включенном состоянии позволило снизить рабочие температуры кристалла со  $+100$  до  $+90$  °С. Все эти технические улучшения несомненно повышают эксплуатационную надежность новых тиристоров и вентиля в целом.

Тиристоры T283-1600 изготавливаются на основе нейтронно-легированного бесдислокационного кремния с диаметром полупроводникового элемента 90 мм и собраны в металлокерамические корпуса таблеточной конструкции с габаритными размерами: диаметр 120 мм, высота 35 мм (рис. 2). Использование корпусов высотой 35 мм взамен прежних 26-мм позволило увеличить изоляционный промежуток между анодом и катодом тиристора и обеспечило требуемый класс по напряжению 6000 В. Увеличение высоты корпуса тиристора также дает возможность разработчику преобразовательного оборудования более удобно размещать защитные RC-снабберы и выравнивающие резисторы.

Для повышения надежности в программу межоперационных испытаний элементов тиристоров T283-1600-60 включен дополнительный контроль на устойчивость к воздействию импульсов обратного напряжения длительностью 100 мкс с выводом ВАХ на лавину амплитудой 5–6 А. Приборы выдерживают 4 А в прямом и не менее 5 А в обратном направлении, что свидетельствует о высоком качестве тиристоров и их возможности сохранять работоспособность при кратковременных неповторяющихся импульсных перенапряжениях. Стабильность блокирующих ВАХ достигается применением многослойных пассивирующих защитных покрытий и испытаний.

Анализ требований, предъявляемых к тиристорам в составе ВТВ, показывает, что коммутируемое схемой время выключения является наиболее важным динамическим параметром. Оптимизация конструкции и технологии изготовления полупроводниковых элементов тиристора T283-1600 позволила получить требуемые значения времени выключения ( $t_q \leq 400$  мкс) при более высоком классе по напряжению и одновременном снижении стати-

ческих потерь по сравнению с тиристорами T273-1250-42. Такое значение времени выключения обеспечивает стабильность и гибкость системы линий электропередачи постоянного тока.

Для надежной работы тиристоров в сборках с последовательным соединением важным является и уменьшение разброса заряда обратного восстановления  $Q_{RR}$ . Минимальные разбросы  $Q_{RR}$  для последовательных соединений тиристоров и низкие времена выключения  $t_q$  достигаются путем прецизионного регулирования времени жизни неосновных носителей заряда облучением высокоэнергетичными электронами на ускорителе «Электроника-У003», который входит в состав технологической линии производства силовых полупроводниковых приборов завода «Электровыпрямитель». Контролируемое введение радиационных дефектов позволяет гибко управлять временем жизни неосновных носителей заряда в полупроводниковых структурах приборов и, соответственно, всей системой электрических параметров. Благодаря данной технологии высоковольтные тиристоры поставляются с разбросом по заряду обратного восстановления  $\pm 5\%$ .

Заряд обратного восстановления определяется расчетным путем с помощью специальной программы по зависимости кривой тока обратного восстановления от времени. Далее производится подбор тиристоров в группы. При этом методика подбора ориентируется как на значение заряда, так и на вид кривой тока обратного восстановления. Эффективность методики подбора проверяется результатами контроля распределения напряжения в процессе обратного восстановления пары тиристоров, подобранных по осциллограммам токов обратного восстановления (рис. 3). Измерения выполняются с использованием RC-снаббера (номиналы  $R = 20$  Ом,  $C = 0,47$  мкФ).

В соответствии с режимом работы ВТВ тиристоры должны быть устойчивы к воздействию ударного тока косинусоидальной формы амплитудой 21 кА длительностью 18 мс с последующим приложением обратного и прямого напряжений. Данные испытания (100%-ная проверка) проводятся на всех тиристорах, в том числе и T283-1600-60, поставляемых для комплектации электрооборудова-

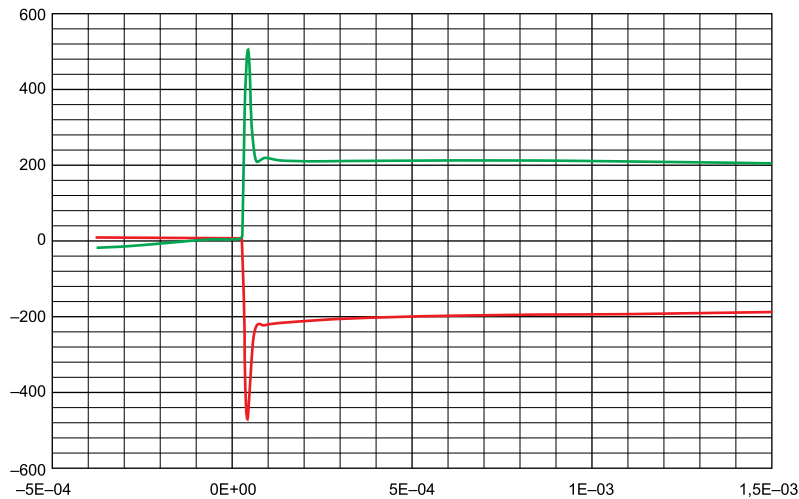


Рис. 3. Распределение напряжений в процессе обратного восстановления пары тиристоров, подобранных по осциллограммам токов обратного восстановления

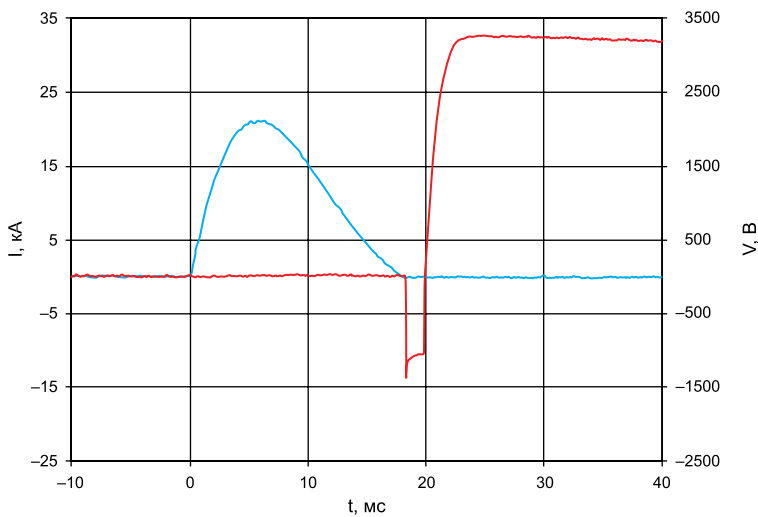


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения при испытаниях ударным током (режим ЛЭП)

ния ЛЭП. Через тиристор при максимально допустимой температуре перехода от источника однократных импульсов тока пропускают импульс тока синусоидальной формы длительностью  $t_p = (18 \pm 0,2)$  мс, амплитудой  $I_{TSM} = 21$  кА. После протекания импульса тока к тиристорам от источника импульсного напряжения прикладывают обратное напряжение  $V_R = 1350$  В, а спустя 1,5 мс — прямое напряжение амплитудой  $V_D = 3400$  В со скоростью нарастания напряжения  $dv_D/dt = 0,6$  В/мкс (рис. 4).

Надежность тиристоров Т283-1600-60 подтверждена проведением испытаний на безотказность при одновременном воздействии силового тока и напряжения в сертифицированном испытательном центре ПАО «Электровыпрямитель». В АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проведены длительные испытания ВТВ в режимах, соответствующих максимальным токовым и иным потенциальным воздействиям на тиристоры, а также в режимах с максимальной выделяемой мощностью в элементах цепей деления напряжения ВТМ. Головной образец блока БВПМ-М-800/120, изготовлен-

ный на тиристорах Т283-1600-60, выдержал комплекс испытаний в реальных условиях эксплуатации, который подтвердил работоспособность блока в штатном и аварийных режимах, при воздействиях грозовых импульсов и т. д.

### Заключение

Результаты испытаний тиристоров Т283-1600-60 продемонстрировали их полное соответствие требованиям, предъявляемым к тиристорам для электрооборудования ЛЭП ПТ. Применение мощных высоковольтных тиристоров нового поколения позволяет существенно снизить количество последовательных соединений в вентильях, а за счет увеличения диаметра кристалла и оптимизации кремниевой структуры повысить токовую нагрузку при сохранении требуемых динамических параметров. Положительные результаты испытаний новых БВПМ подтвердили возможность применения тиристоров Т283-1600-60 в объектах электроэнергетики при строительстве вставок и линий электропере-

дачи постоянного тока, устройств поперечной и продольной компенсации, выпрямителей для плавки гололедообразований.

### Литература

1. Сулова О. В., Травин Л. В. Обобщение тенденций развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током (по материалам Международного colloквиума 2017 CIGRE A3, B4 & D1). XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного электротехнического оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М.: 2017.
2. Гришанин А. В., Хапугин А. А., Плотников А. В., Мартыненко В. А., Елисеев В. В. Новые разработки мощных полупроводниковых приборов ПАО «Электровыпрямитель» для российских и международных проектов в электро- и термоядерной энергетике. XXVI конференция «Перспективы развития электроэнергетики и высоковольтного оборудования. Коммутационные аппараты, преобразовательная техника, микропроцессорные системы управления и защиты». М.: 2017.
3. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Плотников А., Масленников В., Конюхов А. Мощные тиристоры с прямым управлением светом и лазерные волоконно-оптические модули управления для высоковольтных применений // Силовая электроника. 2012. № 1.
4. Пешков М. В., Карпов В. Н., Матинян А. М., Алексеев Н. А. Опыт разработки и испытаний вентильного оборудования для поэтапной реконструкции КВПУ на ПС 400 кВ «Выборгская». III научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов». М.: 2018.