

# Повышение качества измерений характеристик

## обратного восстановления высоковольтных тиристоров для последовательных сборок

**Алексей Сурма**  
**Игорь Ветров**  
**Рустам Паллаев**  
**Алексей Полещук**  
**Дмитрий Пресняков**  
**Александр Ставцев**

inbox@proton-electrotex.com

### Введение

Высоковольтные полупроводниковые ключи на базе последовательных тиристорных сборок сегодня находят массовое применение в устройствах плавного пуска мощных электродвигателей, в высоковольтных управляемых выпрямителях в промышленности и на транспорте, в преобразовательной аппаратуре линий постоянного

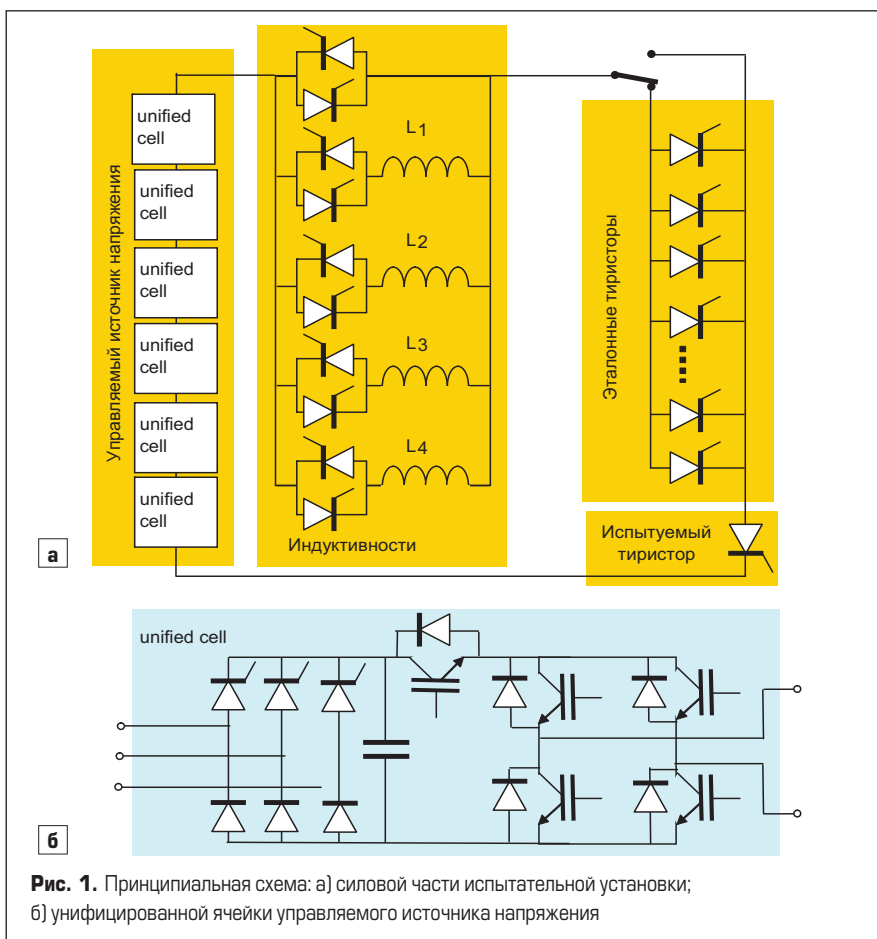
тока в электроэнергетике. К тиристорам в составе последовательных сборок предъявляется ряд специфических требований, к числу наиболее важных из них относятся требования синхронности функционирования всех тиристоров в сборке при включении и в процессе обратного восстановления.

Сегодня актуальна разработка специального оборудования, предназначенного для испытаний высоковольтных тиристоров (и их последовательных сборок) в режимах обратного восстановления, близких к характерным для реальной аппаратуры. Ниже описан такой комплекс оборудования, применяемый «Протон-Электротекс» для испытаний тиристоров, адаптированных для последовательных сборок.

### Комплекс оборудования для прецизионных измерений характеристик обратного восстановления высоковольтных тиристоров и последовательных сборок на их основе

Принципиальная схема силовой части испытательной установки изображена на рис. 1 и включает следующие основные блоки:

- Управляемый источник напряжения. Блок составлен из ряда последовательно включенных унифицированных ячеек. Выходное напряжение каждой ячейки  $U_{cell}$  может быть задано в пределах 0–500 В с шагом 100 В. При работе установки каждая ячейка может формировать три уровня напряжения — « $+U_{cell}$ »; «0»; « $-U_{cell}$ », смена уровня напряжения происходит в заданные моменты времени.
- Блок сменных индуктивных реакторов. Блок обеспечивает выбор пяти вариантов индуктивности испытательного контура, что предоставляет возможность в широких пределах варьировать скорость изменения анодного тока при включении и обратном восстановлении испытуемого тиристора.



**Рис. 1.** Принципиальная схема: а) силовой части испытательной установки; б) унифицированной ячейки управляемого источника напряжения

- Блок эталонных тиристоров. Этот блок, как будет показано ниже, обеспечивает прецизионную группировку испытуемых тиристоров в группы с малым разбросом характеристик обратного восстановления, пригодные для монтажа в последовательные сборки.

При испытаниях отдельных высоковольтных тиристоров или последовательно включенных пар приборов в состав управляемого источника напряжения входит до шести ячеек, что позволяет провести испытания в режимах, близких к полной нагрузке тиристоров по напряжению и току. При испытаниях с применением больших обратных напряжений можно подключать к тиристорам демпфирующие RC-цепи.

Установка может быть также использована для испытаний комплектных тиристорных сборок-ключей на напряжение 6–10 кВ, для чего увеличивается количество ячеек в составе управляемого источника напряжения.

Система управления установкой позволяет сформировать пять периодов времени (фаз) контролируемой длительности, в течение каждого из которых на ячейках источника напряжения поддерживаются те или иные выбранные уровни напряжения, как это показано на рис. 2. При испытаниях обратного восстановления обычно предусматриваются следующие фазы.

Фаза 1. Нарастание анодного тока испытуемого тиристора с контролируемой скоростью. Скорость нарастания определяется суммарным положительным напряжением ячеек управляемого источника и выбранным индуктивным реактором.

Фаза 2. Поддержание анодного тока на заданном уровне. Ячейки управляемого источника напряжения работают в режиме ШИМ, обеспечивая поддержание требуемого анодного тока с малыми колебаниями относительно заданного уровня.

Фаза 3. Стабилизация анодного тока перед началом процесса обратного восстановления. Суммарное напряжение ячеек источника имеет малое положительное или нулевое значение, что обеспечивает изменение анодного тока с малой скоростью для прецизионного «выхода» на заданное значение анодного тока, с которого начинается процесс обратного восстановления.

Фаза 4. Процесс обратного восстановления. Суммарное напряжение ячеек источника имеет отрицательное значение, соответствующее выбранному значению  $U_{RDC}$  для испытуемого тиристора, контролируемое значение скорости спада анодного тока определяется выбранным индуктивным реактором.

Фаза 5. Приложение к испытуемому тиристорному повторному прямого напряжения требуемой амплитуды. Применяется для подтверждения выполнения требований по норме времени выключения ( $t_q$ ) испытуемого тиристора.

В процессе испытания компьютеризированная система собирает и обрабатывает сигналы

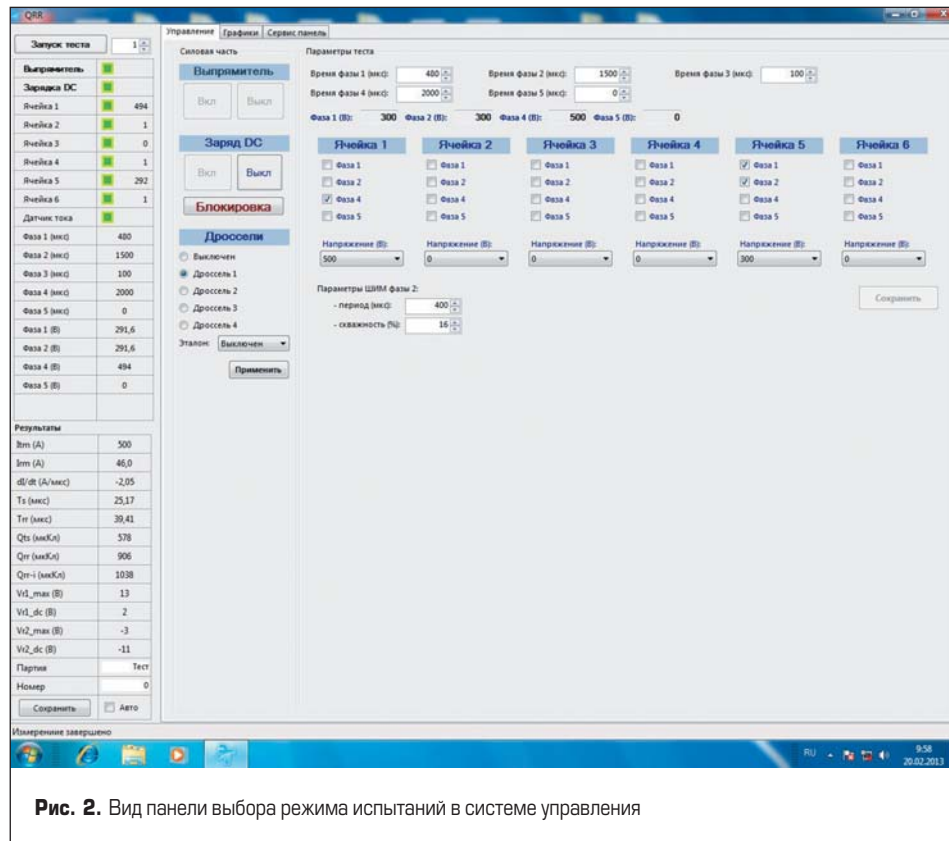


Рис. 2. Вид панели выбора режима испытаний в системе управления

датчиков анодного тока и напряжения тиристора и выдает на панель осциллограммы тока и напряжения, а также численные значения основных характеристик: времени обратного восстановления ( $t_{rr}$ ) и его фаз ( $t_s$  и  $t_f$ ), импульсного тока обратного восстановления ( $I_{rrM}$ ), аппроксимированного ( $Q_{rra}$ ) и интегрального ( $Q_{rri}$ ) зарядов обратного восстановления (рис. 3).

Типичное статистическое распределение ряда обратного восстановления для высоковольтных тиристоров, адаптированных для последовательного соединения, представлено на рис. 4. Значение среднеквадратичного отклонения  $Q_{rr}$ , нормированное на среднее значение, в больших партиях таких тиристоров составляет примерно 2,5%. Причем вклад в эту величину погрешности измере-

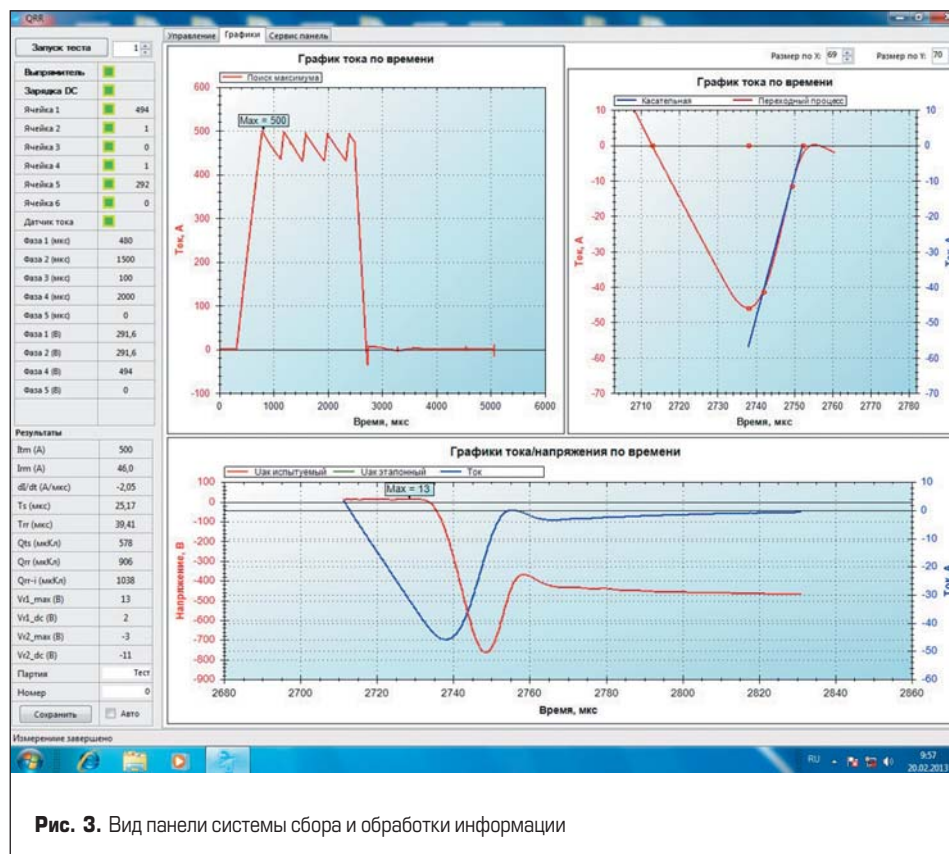
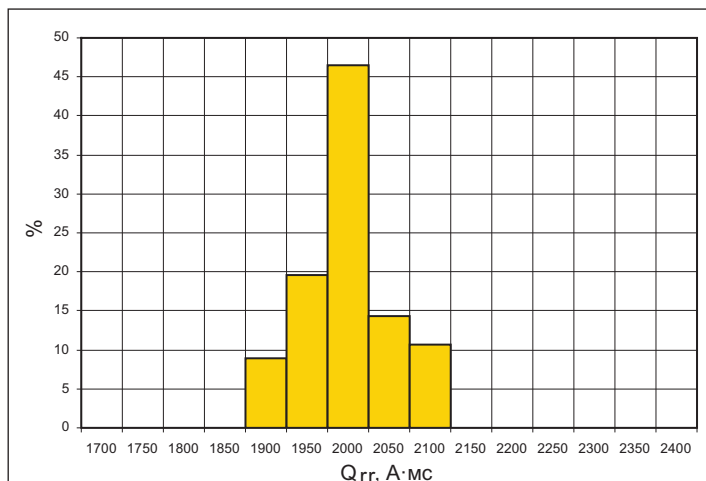
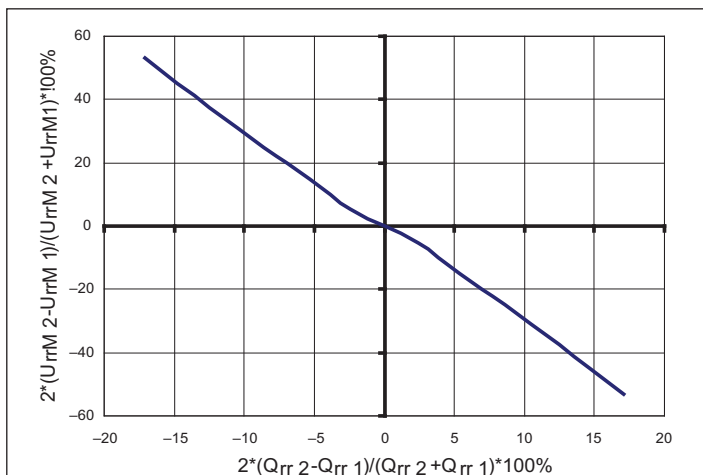


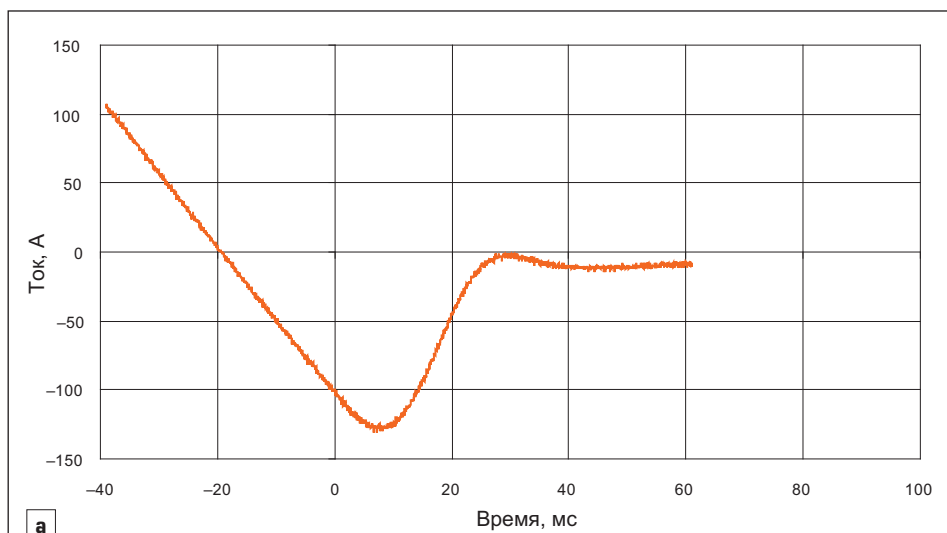
Рис. 3. Вид панели системы сбора и обработки информации



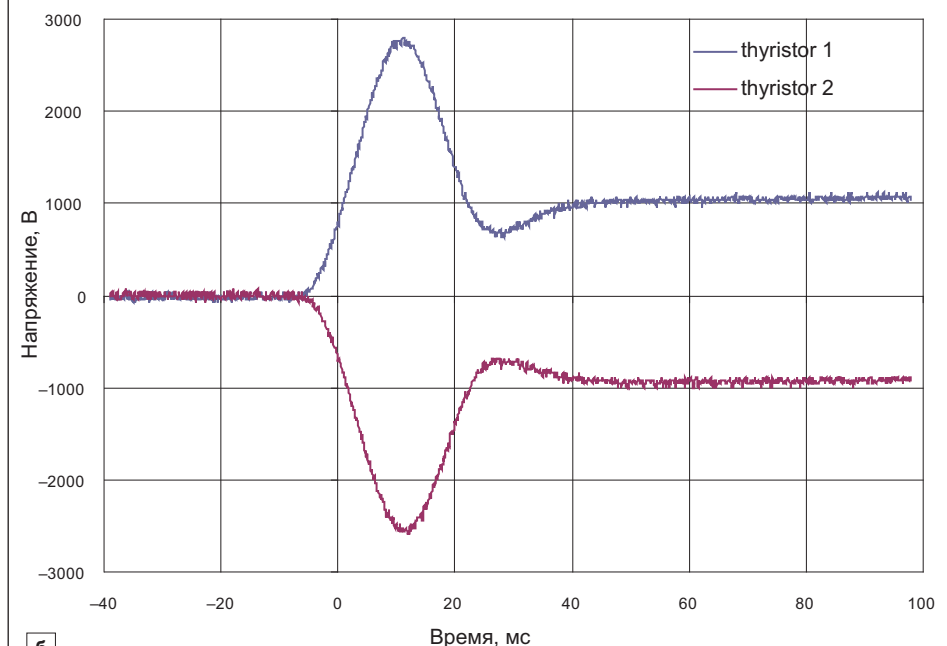
**Рис. 4.** Типичное статистическое распределение заряда обратного восстановления в партиях высоковольтных мощных тиристоров (в качестве примера взят тиристор T273-1250-44 на средний ток 1250 А, напряжение 4400 В)



**Рис. 5.** Типичная зависимость разброса значений максимальных импульсных напряжений  $U_{rrM}$  при обратном восстановлении пары последовательно соединенных тиристоров вследствие различия их зарядов обратного восстановления



**а**



**б**

**Рис. 6.** Синхронное обратное восстановление пары последовательно соединенных высоковольтных тиристоров: а) осциллограмма анодного тока; б) осциллограммы анодных напряжений

ния и реального разброса  $Q_{rr}$ , определяемого управляемостью технологического процесса, примерно равный.

Исключить влияние погрешности измерений и организовать более точный подбор групп тиристоров для последовательных сборок позволяют сравнительные испытания в паре с эталонами. Подобный метод основан на высокой «чувствительности» распределения анодных напряжений в процессе обратного восстановления пары последовательно соединенных тиристоров к различию значений  $Q_{rr}$  для этих приборов. Так, на рис. 5 приведена типичная зависимость разброса значений максимальных импульсных напряжений  $U_{rrM}$ , возникающих при обратном восстановлении пары последовательно соединенных тиристоров вследствие различия их зарядов обратного восстановления. Из рисунка видно, что при малых значениях разности зарядов обратного восстановления данная зависимость близка к линейной. Это позволяет, используя ряд эталонных тиристоров с последовательно возрастающими на 2–3% значениями  $Q_{rr}$ , группировать испытываемые тиристоры по указанному параметру с точностью, лучшей 0,5%. При такой точности группировки обратное восстановление тиристоров в последовательных сборках происходит синхронно, даже при отсутствии снабберных RC-цепей. Пример такого восстановления пары высоковольтных тиристоров T653-630-65 (средний ток 630 А, напряжение 6500 В) приведен на рис. 6.

**Заключение**

Применение рассмотренного комплекса испытательного оборудования в производстве высоковольтных тиристоров, адаптированных для последовательного соединения, позволяет повысить качество и надежность высоковольтных тиристорных ключей на основе последовательных сборок для комплектации аппаратуры силовой электроники в промышленности, на транспорте, в электроэнергетике.