

**Высоковольтные тиристоры,  
адаптированные для применения  
в последовательных сборках  
и ключи на их основе  
для применения в аппаратах  
плавного пуска электродвигателей**

Д. А. Пресняков, И. Ю. Ветров, А. В. Ставцев, А. М. Сурма

## Введение

Несмотря на значительное развитие преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT, GTO, IGCT), сегодня, по – прежнему, технически оправданным и востребованным остается применение «традиционных» мощных тиристоров для ключей управляемых выпрямителей, а также устройств плавного пуска электродвигателей. Особенно актуально применение тиристоров в устройствах, рассчитанных на работу с сетью переменного тока 6/10 кВ и выше, т.к. здесь устройства на базе тиристоров и по ценовым характеристикам и по энергоэффективности (к.п.д) пока вне конкуренции.

Соответственно, актуальными являются разработка и производство высоковольтных мощных тиристоров. В течение последних нескольких лет рядом производителей сверхмощных силовых полупроводниковых приборов освоено производство тиристоров с напряжением диапазона 6500-8500 В, предназначенных, прежде всего, для комплектации высоковольтных вентиляторов электрических преобразователей, применяемых при напряжениях переменного тока 6 кВ и выше.

Сегодня не достигнут уровень блокирующего напряжения, который позволил бы изготавливать ключи таких устройств на базе единичного тиристора. Поэтому каждый ключ комплектуют несколько последовательно соединенных полупроводниковых приборов, что делает актуальными проблемы согласования (синхронизации) работы тиристоров в таком соединении.

К сожалению, вместе с ростом максимально допустимого блокирующего напряжения возрастает и заряд обратного, характерный для высоковольтного прибора. Это связано с необходимостью обеспечения приемлемого низкого напряжения во включенном состоянии. Для приборов с напряжением 6500-8500 В значения заряда обратного восстановления и максимального значения тока обратного восстановления достигают весьма значительных величин, даже при не очень больших значениях скорости спада тока.

На рис.1 приведены типичные значения этих величин для высоковольтных тиристоров, производства различных фирм. Эти величины для тиристоров на напряжения 6500-8500 В достигли уже тех значений, когда начинают возникать определенные трудности в подборе демпфирующих и согласующих RC-цепей.

Расчеты и эксперименты показывают, полная энергия потерь в демпфирующей RC-цепи, обеспечивающей ограничение импульсного выброса обратного напряжения при восстановлении типичного высоковольтного тиристора на уровне  $0,75-0,8U_{RRM}$  в цепи с напряжением  $U_{DC} \sim 0,5U_{RRM}$ , связана с зарядом обратного восстановления полуэмпирическим соотношением:

$$E_R \sim 1,5Q_{rr} * U_{DC}$$

где  $E_R$  – энергия, рассеиваемая в резисторе RC-цепи в цикле «включение-выключение тиристора». Воспользовавшись данными, приведенными на рис. 1, легко получить, что мощность, рассеиваемая демпфирующей цепью

высоковольтного тиристора по порядку своей величины становится сравнимой с полной мощностью потерь самого тиристора, что не внушает оптимизма, как с точки зрения усложнения системы охлаждения ключа, так и с точки зрения его к.п.д.

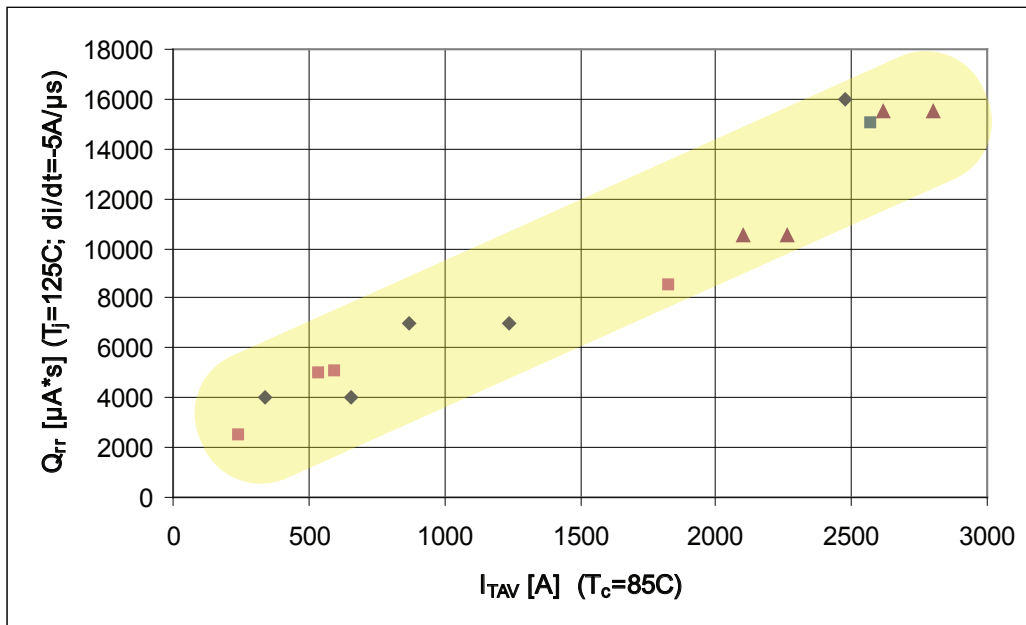


Рис. 1. Соотношение между средним током в открытом состоянии и зарядом обратного восстановления для высоковольтных (6500-8000В) тиристорov, производства различных фирм. (Средний ток: форма импульсов – полуволна синусоиды длительностью 10 мс, частота 50 Гц, температура корпуса тиристора 85С. Заряд обратного восстановления: температура полупроводниковой структуры 125С, скорость спада тока 5А/мкс, обратное напряжение  $UR(DC) \sim 0,5-0,8URRM$ ).

В связи с этим приобретает актуальность разработка высоковольтных тиристорov, специализированных для комплектации последовательных сборок обладающих рядом специфических характеристик при обратном восстановлении. Это:

- минимизированные по величине значения заряда и тока обратного восстановления (конечно, при условии обеспечения приемлемого малого уровня напряжения во включенном состоянии);
- «мягкий» характер обратного восстановления; применение тиристорov с мягким обратным восстановлением позволяет «облегчить» требования к RC – цепи в части обеспечения приемлемого уровня импульсного напряжения;
- идентичность зарядов обратного восстановления, а также и формы тока обратного восстановления, для тиристорov составляющих последовательную сборку; это позволяет снизить требования к согласующим RC-цепям, а, в перспективе, возможно и полностью от них отказаться.

Рассмотрим более подробно проблемы, возникающие при проектировании и изготовлении таких приборов и последовательных сборок-ключей на их основе, на примере тиристоров и ключей, производимых ЗАО «Протон-Электротекс».

## **Высоковольтные тиристоры, адаптированные для применения в последовательных сборках.**

Известно, что величина заряда обратного восстановления, в первую очередь, зависит от величины накопленного заряда избыточных электронов и дырок в n-базовом слое тиристора, а также от скорости рекомбинации этого накопленного заряда. Для высоковольтных тиристоров, которые восстанавливаются, при небольшой скорости спада анодного тока, более весомым является второй фактор. Действительно, в течение времени спада анодного тока, наибольшая часть избыточных носителей заряда успевает рекомбинировать. Таким образом, есть некоторое оптимальное значение эффективного времени жизни носителей заряда в n-базе тиристора, позволяющее получить малый заряд обратного восстановления при приемлемом малом значении падения напряжения во включенном состоянии.

Для получения оптимальной величины времени жизни носителей заряда в n-базе тиристора используются технологии облучения кремниевых элементов ускоренными электронами и протонами.

Существуют, однако, и дополнительные возможности снижения заряда обратного восстановления. Так, если уменьшить максимальную концентрацию атомов акцепторной примеси в р-базе тиристора, удастся снизить заряд обратного восстановления за счет выноса части избыточных электронов, накопленных в n-базе, прямо в n+ эмиттер, аналогично тому, как это происходит в диоде. В тиристоре с более сильно легированной р- базой, вследствие транзисторного эффекта происходит не вынос избыточных электронов из n-базы, а инжекция избыточных дырок в n-базу, что приводит к относительному увеличению заряда обратного восстановления.

Тиристоры производства «Протон – Электротекс» имеют весьма низколегированную р- базу (как правило максимальная концентрация акцепторов не превышает  $(1 \text{ или } 2) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ). Это позволяет в значительной мере уменьшить заряд обратного восстановления без влияния на падение напряжения во включенном состоянии.

Для обеспечения необходимой  $dU/dt$  – стойкости для тиристоров с низколегированной р- базой применена специальная топология распределенной катодной шунтировки.

Важной характеристикой является «мягкость» обратного восстановления  $S$ , характеристикой которой является отношение длительности времени спада обратного тока ( $t_f$ ) и времени задержки приложения обратного напряжения ( $t_s$ ) в процессе обратного восстановления тиристора:

$$S = t_f / t_s.$$

Известно, что увеличение мягкости обратного восстановления может быть

получено при снижении концентрации избыточных носителей заряда вблизи анодного р – эмиттера.

Для достижения этого есть два пути:

- уменьшение коэффициента инжекции анодного р – эмиттера; это может быть получено при снижении максимальной концентрации акцепторной примеси, а также времени жизни носителей заряда в высоколегированной части р- эмиттерного слоя;

- локальное снижение времени жизни в слоях n-базы и слаболегированного р-эмиттера, примыкающих к анодному р-п переходу.

В тиристорах производства «Протон – Электротекс» применяются технологии, позволяющие реализовать оба этих пути.

Во-первых, применяются относительно слаболегированные р – эмиттерные слои. Это позволяет уменьшить импульсный ток обратного восстановления, увеличить мягкость обратного восстановления. Кроме того, как показывают расчеты и эксперименты, для таких тиристоров характерны слабые температурные зависимости времени и заряда обратного восстановления.

Во-вторых, когда необходимо получить более мягкое обратное восстановление, может быть применена специальная технология регулирования времени жизни носителей заряда, базирующаяся на протонном облучении. Эта технология позволяет локально снизить время жизни носителей заряда в слоях, примыкающих к р-п переходу.

Исключительно важной является возможность получения тиристоров с идентичными характеристиками обратного восстановления. При этом важно получить не только одинаковые импульсные токи и заряды обратного восстановления, но также идентичный характер зависимости тока от времени. Это дает возможность в перспективе отказаться от согласующих RC-цепей при комплектации последовательных сборок.

Из сказанного выше следует, что для получения идентичных характеристик обратного восстановления необходимо обеспечить высокую воспроизводимость, как профиля легирования, так и распределения времени жизни носителей заряда в полупроводниковых структурах.

Идентичность распределения легирующих примесей обеспечивается высоким уровнем технологии производства полупроводниковых элементов, прецизионный контроль времени жизни носителей заряда осуществляется с помощью специальных технологий электронного и/или протонного облучения.

Для достижения малого разброса параметров обратного восстановления используется следующая технологическая схема:

Шаг 1. Исходная предпосылка для достижения малого разброса характеристик обратного восстановления – это обеспечение высокой идентичности профилей легирующих примесей в выпускаемых кремниевых элементах, что достигается за счет хорошо отработанной технологии.

На этом шаге обеспечивается повторяемость формы тока обратного восстановления, температурных зависимостей характеристик обратного восстановления.

Шаг 2. Прецизионное управление параметрами обратного восстановления

(время обратного восстановления, ток обратного восстановления, заряд обратного восстановления, мягкость) при помощи технологий электронного и протонного облучений.

На этом шаге дополнительно корректируются значения времени и заряда обратного восстановления, чтобы дополнительно уменьшить разброс этих характеристик в партии. Сочетание электронного и протонного облучений позволяет одновременно корректировать мягкость.

Шаг 3. Финишная разбраковка на установке, позволяющей провести испытания обратного восстановления двух или более последовательно соединенных тиристоров в режимах, близких к эксплуатационным.

Схема установки для таких испытаний приведена на рис. 2. Разбраковка осуществляется при испытании каждого тиристора в последовательном соединении с эталоном. Импульсный блок питания обеспечивает подачу на включенные тиристоры положительного напряжения, при этом ток, протекая через индуктивный реактор  $L$ , линейно возрастает до необходимого установленного значения. Затем полярность напряжения изменяется и происходит процесс обратного восстановления пары последовательно соединенных тиристоров

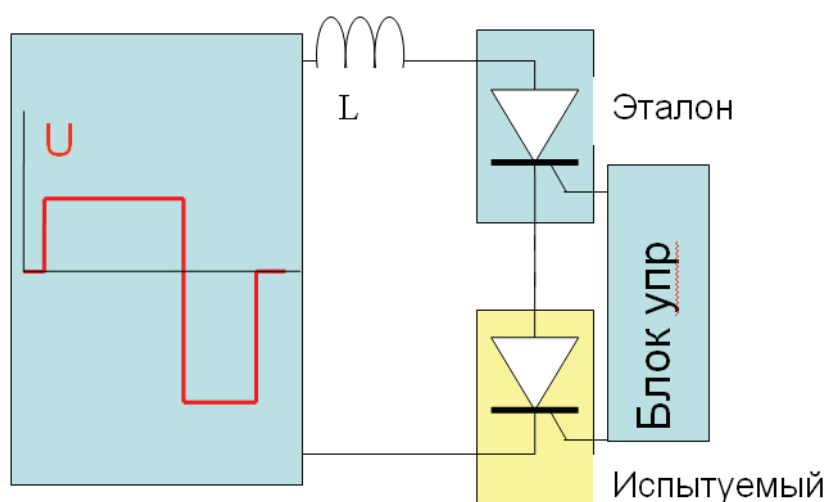


Рис. 2. Принципиальная схема установки финишной разбраковки тиристоров по характеристикам обратного восстановления.

При этом критерием соответствия характеристик обратного восстановления испытуемого прибора эталону является распределение напряжения, прикладываемого к тиристорам в течение всего процесса обратного восстановления, поровну между испытуемым и эталонными приборами. Типичные зависимости тока обратного восстановления и напряжений испытуемого и эталонного тиристоров приведены на рис. 3.

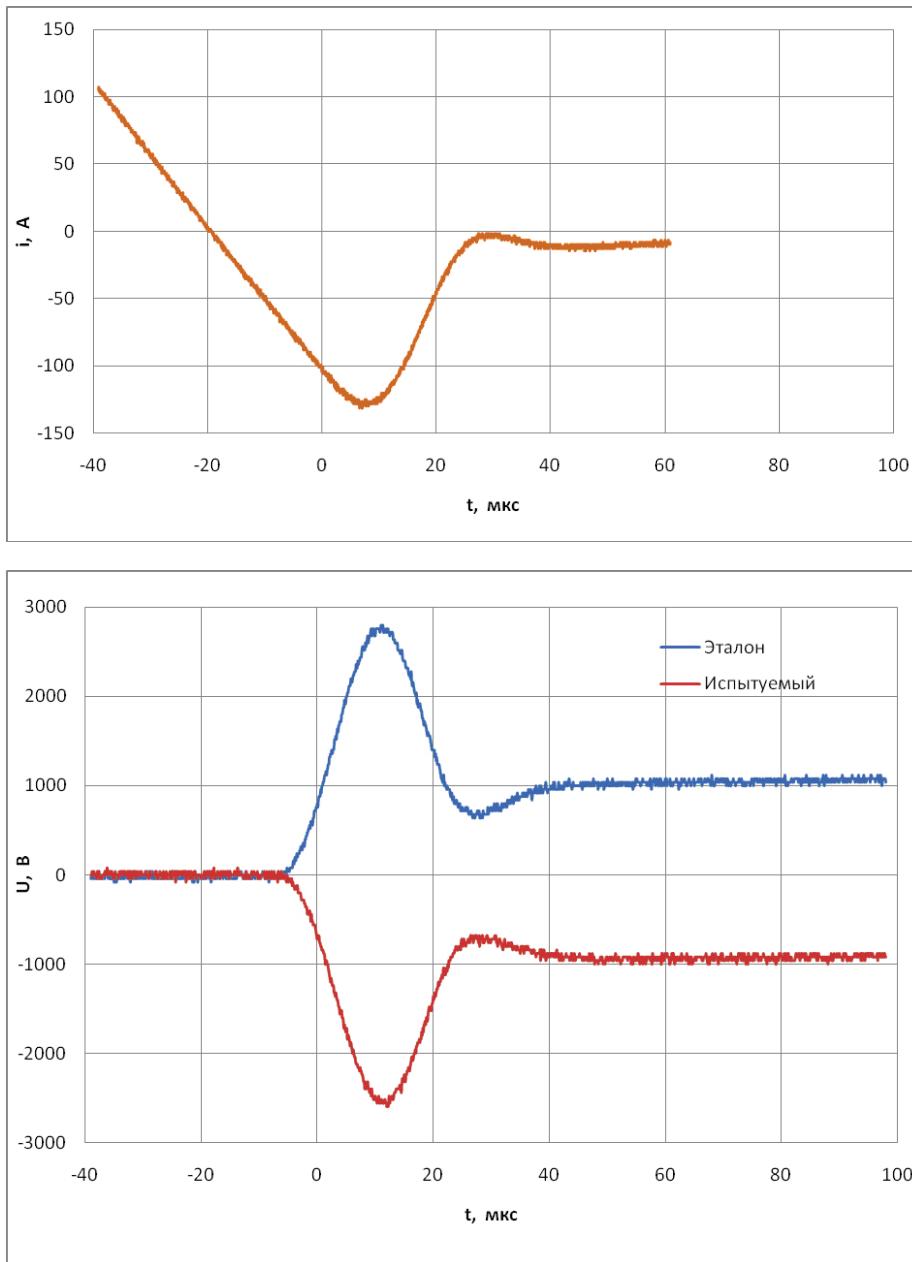


Рис. 3. Типичные зависимости тока, напряжений на эталонном и испытуемом тиристорах при испытаниях на установке финишной разбраковки по характеристикам обратного восстановления.

На этой же установке возможно также проводить испытания уже смонтированных высоковольтных вентилях на базе последовательных тиристорных сборок.

В результате применения упомянутых технологий в производстве удалось получить высоковольтные тиристоры с относительно малыми значениями зарядов обратного восстановления, малой температурной зависимостью, а



также повышенной мягкостью обратного восстановления. Типичные характеристики высоковольтных тиристоров, адаптированных для применения в последовательных сборках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип тиристора	T543-250	T653-500/630	T473-1000/1250
Диаметр кремниевого элемента, мм	40	56	80
Допустимый средний ток, А (импульсы тока в виде полуволны синусоиды, длительность 10 мс, частота 50 Гц, температура корпуса 85С)	250	500-630	1000-1250
Повторяющееся напряжение в закрытом состоянии, обратное напряжение, В	4600-6500	4600-6500	4600-6500
Заряд обратного восстановления, мкКл, (температура полупроводниковой структуры 125С, скорость спада тока 5А/мкс, обратное напряжение $U_{R(DC)} = 0,5U_{RRM}$ )	2500-3500	4000-6000	6000-8000
Разброс заряда обратного восстановления по партии тиристоров при поставке	В соответствии с требованиями заказчика от $\pm 5\%$ до менее 1%		
Мягкость обратного восстановления S	1,0-1,3	1,0-1,3	1,0-1,3

## Последовательные сборки-ключи для применения в устройствах плавного пуска электродвигателей.

Новые высоковольтные тиристоры, адаптированные для применения в последовательных цепях использованы для комплектации последовательных сборок – ключей КТ5.11-800, предназначенных для применения в устройствах плавного пуска электродвигателей, работающих от сети переменного тока промышленной частоты с напряжением 6 кВ (рис.4).

Ключ собран на тиристорах с блокирующим напряжением 6500В и представляет из себя законченное устройство – ключ переменного тока укомплектованный драйверами, источниками питания, согласующими цепями и охладителями, его принципиальная схема представлена на рис. 5. Управление группами тиристоров, составляющих прямой и обратный ключи устройства осуществляется отдельно по оптоволокну.

Основные характеристики ключа приведены в табл.2. Ключ может эксплуатироваться в сети переменного тока промышленной частоты с напряжением 6 кВ, а также в других сетях с максимальными амплитудными значениями прямого и обратного напряжений до 11 кВ, обеспечивает максимальные пусковые токи электродвигателя до 400 А.



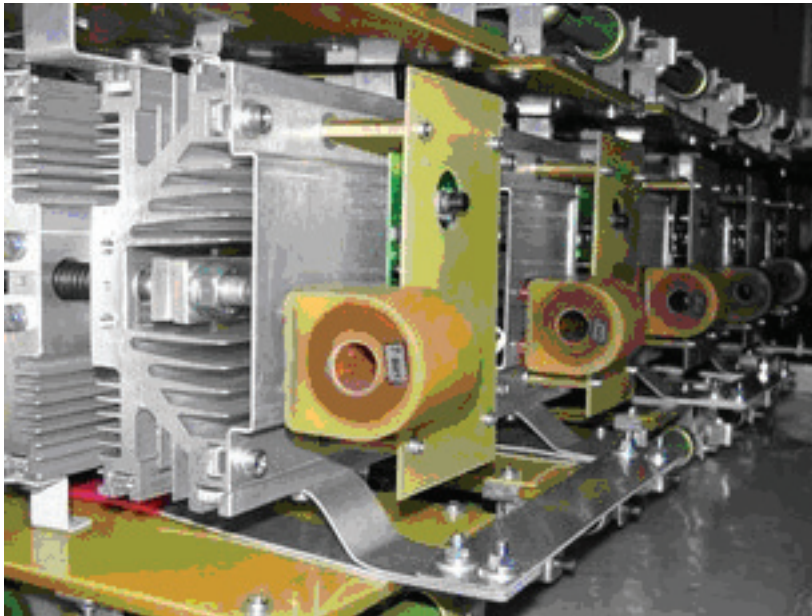


Рис. 4. Ключ КТ5.11-800 для применения в устройствах плавного пуска электродвигателей, работающих от сети переменного тока промышленной частоты с напряжением 6 кВ

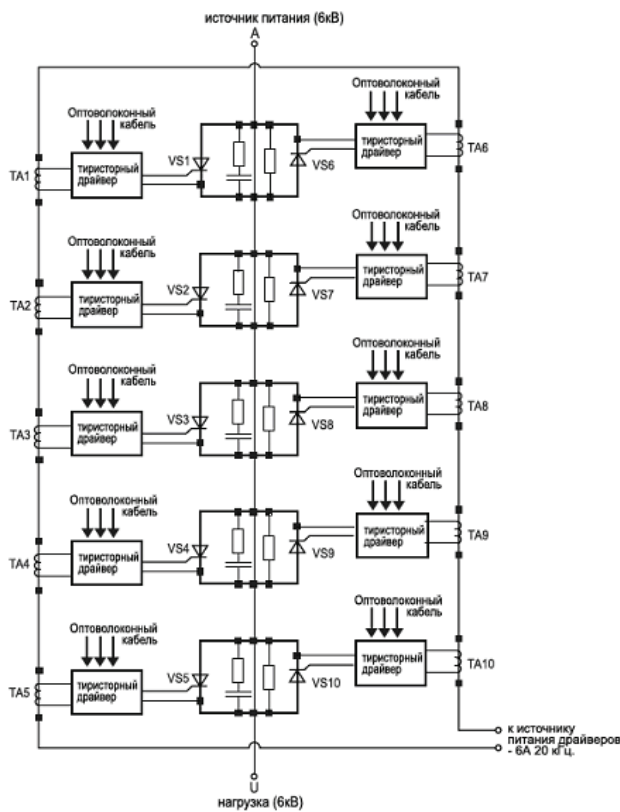


Рис. 5. Принципиальная схема ключа КТ5.11-800

Таблица 2

Параметр	Величина
Максимальное значение прямого статического (постоянного) блокирующего напряжения	U=11 кВ DC
Максимальное значение обратного статического (постоянного) блокирующего напряжения	U=11 кВ DC
Максимальное значение $di/dt$ при включении	10 А/мкс
Максимальный статический ток утечки при U=12 кВ DC, не более	500 мА
Максимальный статический ток утечки при U=4,2 кВ RMS 50 Гц, не более мА RMS	400 мА
Максимальное значение прямого тока (мгновенное значение) при приложении обратного (блокирующего) напряжения	800 А
Максимальное значение прикладываемого обратного напряжения при восстановлении (мгновенное значение), не более	U=11кВ DC
Максимальное значение $di/dt$ при восстановлении (при приложении обратного напряжения), не более	5 А/мкс
Максимальный ток при пуске двигателя, не более	400 А
Максимальное время пуска при максимальном токе, не более	120 сек
Минимальная рабочая температура окружающей среды	0 °C
Максимальная рабочая температура окружающей среды	+40 °C
Минимальная длительность сигнала управления (включения) тиристора (со стороны контроллера управления)	100мкс
Минимальная пауза сигнала управления (минимальное время между снятием сигнала управления до повторной подачи)	100мкс
Напряжения питания драйверов управления тиристорами	24В±10%
Управление прямой и обратной группой тиристоров	Опто-волоконное Раздельное