

**Рекомендации по  
применению силовых  
полупроводниковых  
приборов**

# Рекомендации по применению силовых полупроводниковых диодов и тиристоров

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС»

А. Ю. БОЛДЫРЕВ, А. М. СУРМА

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Силовые диоды .....	5
2.1. Определение .....	5
2.2. Конструкция .....	5
2.3. Основные электрические параметры и характеристики диодов .....	7
2.3.1. Непроводящее состояние .....	7
2.3.2. Проводящее состояние .....	9
2.3.3. Переходное состояние .....	10
2.4. Типы силовых диодов, выпускаемых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» .....	13
3. Силовые тиристоры .....	15
3.1. Определение .....	15
3.2. Конструкция .....	18
3.3. Основные электрические параметры и характеристики тиристоров .....	21
3.3.1. Закрытое состояние .....	22
3.3.2. Обратное непроводящее состояние .....	24
3.3.3. Открытое состояние .....	24
3.3.4. Характеристики управления .....	27
3.3.5. Включение тиристора .....	27
3.3.6. Выключение тиристора .....	29
3.4. Типы силовых тиристоров, выпускаемых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» .....	32
4. Виды конструктивного исполнения .....	34
4.1. Полупроводниковый элемент .....	34
4.2. Приборы таблеточной конструкции .....	34
4.3. Приборы штыревой конструкции .....	36
4.4. Приборы модульной конструкции .....	36
4.5. Бескорпусные приборы .....	37
5. Тепловые параметры приборов .....	39
5.1. Температуры .....	39
5.2. Тепловое сопротивление .....	39
6. Перегрузочные параметры приборов .....	42
7. Механические и геометрические параметры приборов .....	44
7.1. Прижимное усилие .....	44
7.2. Затяжка крепёжных винтов .....	46
7.3. Климатическое исполнение .....	46
7.4. Устойчивость к механическим воздействиям .....	46
8. Области применения силовых полупроводниковых приборов .....	47

9.	Технологии производства .....	49
10.	Испытания .....	52
11.	Руководство по использованию информационных листов .....	55
12.	Монтаж .....	59
12.1.	Приборы таблеточной конструкции .....	59
12.2.	Приборы штыревой конструкции .....	61
12.3.	Приборы модульной конструкции .....	62
12.4.	Бескорпусные приборы .....	63
13.	Эксплуатация .....	64
13.1.	Рекомендации по управлению .....	64
13.2.	Последовательное и параллельное соединение .....	65
14.	Охлаждение .....	69
14.1.	Общие технические требования к охладителям .....	69
14.2.	Воздушное охлаждение .....	70
14.3.	Жидкостное охлаждение .....	71
14.4.	Теплопроводящие материалы .....	72
15.	Хранение и транспортировка .....	74

## 1. Введение

Данный документ дает описание полупроводниковых изделий, выпускаемых предприятием АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», а также технологии их изготовления и рекомендации по их эксплуатации.

По всем дополнительным техническим вопросам можно обратиться в службу технической поддержки АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» по телефону: +7 (4862) 44-04-95 или оставить запрос в форме обратной связи на сайте [www.proton-electrotex.com](http://www.proton-electrotex.com).

## 2. Силовые диоды

### 2.1. Определение



Рисунок 1. Символическое обозначение диода.

Диод — это простейший полупроводниковый прибор, основанный на р-п-переходе. Это электронный компонент с двумя электродами, электрическое сопротивление которого существенно зависит от полярности приложенного напряжения и имеет асимметричную вольтамперную характеристику, зависящую от направления тока.

Основная функция диода – неуправляемый выпрямитель тока: при приложении к нему «прямого» напряжения (с более положительным потенциалом на аноде), диод переходит в состояние с высокой проводимостью и способен проводить большой «прямой» ток (в направлении от анода к катоду). При приложении обратного напряжения (с более положительным потенциалом на катоде) диод переходит в состояние с низкой проводимостью и способен «блокировать» высокое «обратное» напряжение проводя лишь малый обратный ток утечки.

### 2.2. Конструкция

Наиболее широко применяемым в силовой электронике типом диода является диод с р-п переходом. Типичное сечение полупроводниковой структуры такого прибора приведено на *Рисунок 2*.

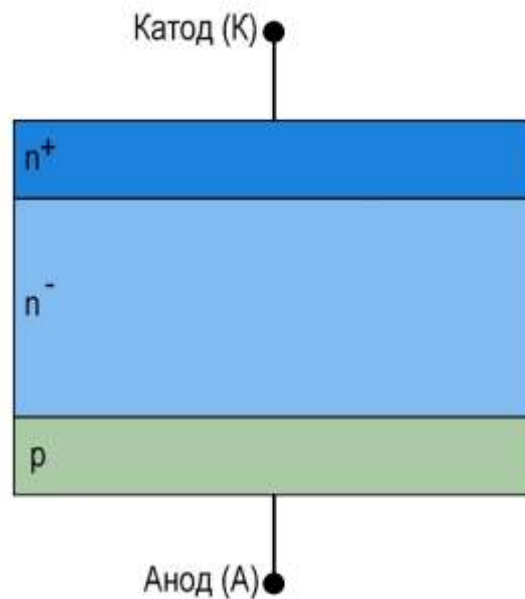


Рисунок 2. Типичное сечение полупроводниковой структуры силового диода с r-n переходом.

Характерной особенностью силового диода является наличие между r-n переходом и поверхностями структуры (анодной и катодной) по крайней мере одного слаболегированного (высокоомного) слоя. На Рисунок 2, соответствующем наиболее часто встречающемуся типу диодов, это слой «n-» - т. е. слой n-типа проводимости с относительно малой концентрацией легирующей донорной примеси (относительно высоким удельным сопротивлением).

Приповерхностные слои полупроводниковой структуры у диода с r-n переходом низкоомные (сильнолегированными атомами акцепторной (для анода) и донорной (для катода) примеси). Это необходимо для получения омического (невыпрямляющего) контакта с поверхностной металлизацией и достижения малого контактного сопротивления.

На периферии полупроводникового элемента диода его r-n переход выходит на поверхность, что создает опасность поверхностного пробоя при приложении высокого обратного напряжения. Для исключения поверхностного пробоя необходимо уменьшение напряженности электрического поля в области выхода r-n перехода на поверхность структуры. Наиболее часто применяемым для силовых диодов методом снижения электрического поля в этой области является профилирование или создание определенной геометрической формы поверхности полупроводникового кристалла в месте выхода r-n перехода. Обычно метод создания поверхности определенной формы состоит в шлифовке края кремниевой пластины под определенным углом, т. е. образовании так называемой фаски (Рисунок 3).



Рисунок 3. Краевая фаска диодного полупроводникового элемента.

## 2.3. Основные электрические параметры и характеристики диодов

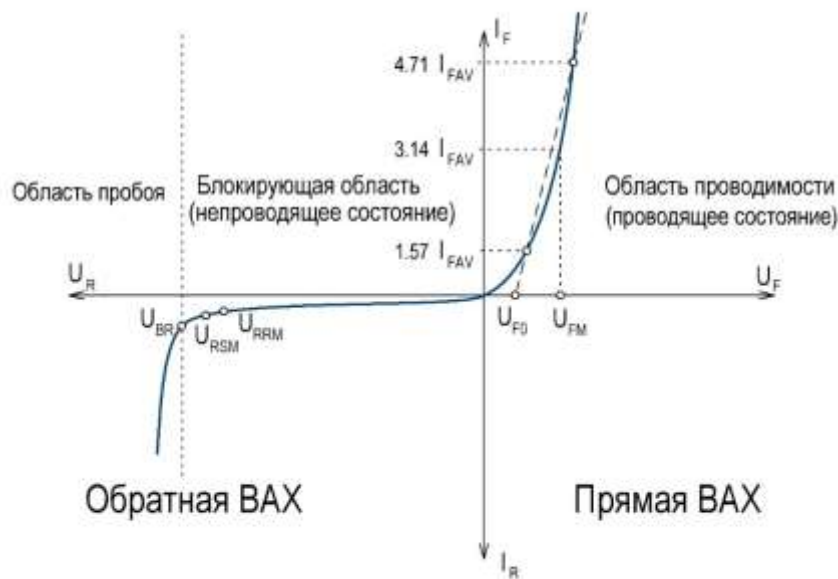


Рисунок 4. Типичная вольтамперная характеристика диода.

### 2.3.1. Непроводящее состояние

Основными характеристиками диода в непроводящем состоянии являются:

**$U_{RRM}$  — Повторяющееся импульсное обратное напряжение [В]** — наибольшее мгновенное значение напряжение, которое допускается прикладывать к диоду в обратном направлении, включая все повторяющиеся напряжения. Делённое на 100 значение  $U_{RRM}$  является классом прибора.  $U_{RRM}$  является основным параметром предельно допустимого рабочего режима в непроводящем состоянии: пиковые значения обратного напряжения при эксплуатации диода в штатных рабочих режимах не должны превышать этой величины.

**$U_{RSM}$  — Неповторяющееся импульсное обратное напряжение [В]** — максимально допустимое неповторяющееся пиковое значение обратного напряжения, которое можно приложить к диоду. Значение  $U_{RSM}$  всегда больше, чем  $U_{RRM}$ .

**$U_{BR}$  — Пробивное напряжение [В]** — напряжение, при котором начинается лавинный пробой полупроводниковой структуры диода.

Величина  $U_{BR} \geq U_{RSM}$ , поэтому для обычных диодов  $U_{BR}$  не является характеристикой, применимой для эксплуатационных режимов. Значение  $U_{BR}$  определяется при испытаниях и служит одной из «реперных точек», по которым, с учетом технологических запасов, диоду присваивается значение класса по обратному напряжению (т. е. для определения  $U_{RRM}$ ). Исключение составляют лавинные диоды, для которых допускается кратковременное вхождение в режим лавинного пробоя при эксплуатации. Для таких диодов в информационных материалах указано значение  $U_{BR}$ , соответствующее минимальному значению этой



величины для конкретного типа диода, при определённых значениях температуры перехода и обратного тока.

$I_{RRM}$  — **Повторяющийся импульсный обратный ток [мА]** — максимальное мгновенное значение обратного тока при приложении к диоду импульса обратного напряжения с амплитудой, равной  $U_{RRM}$ . Фактические значения  $I_{RRM}$  на приборах обычно контролируются заводом-изготовителем при максимально допустимой температуре перехода диода при проведении ПСИ.

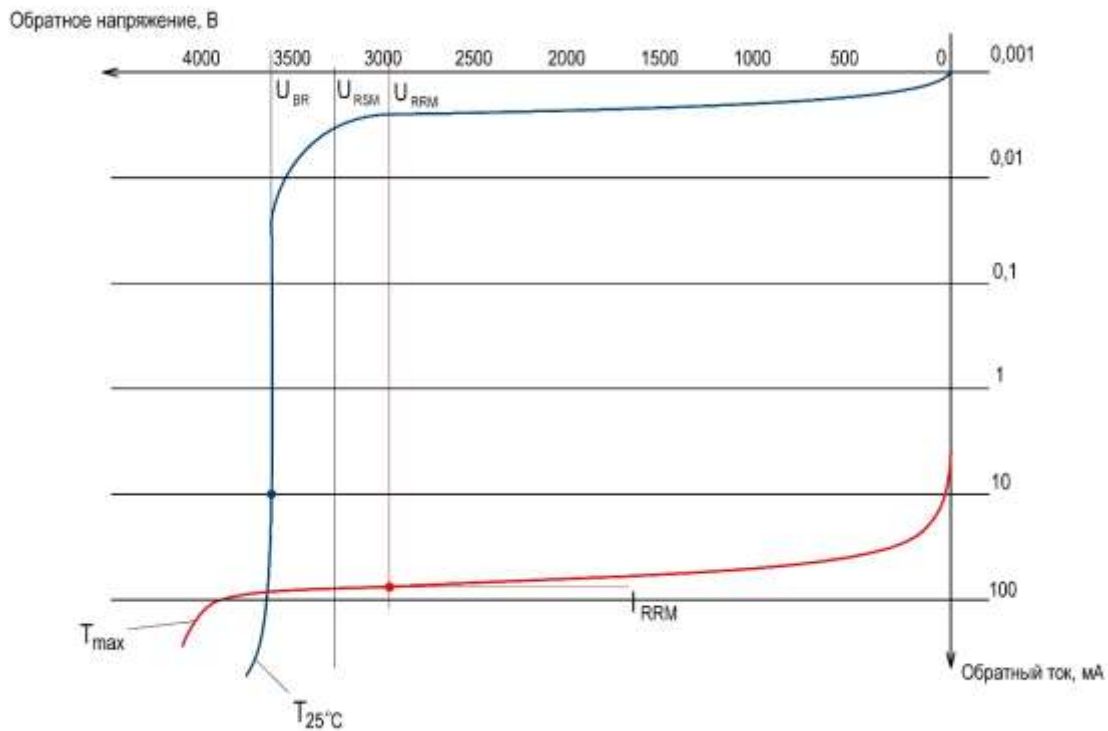


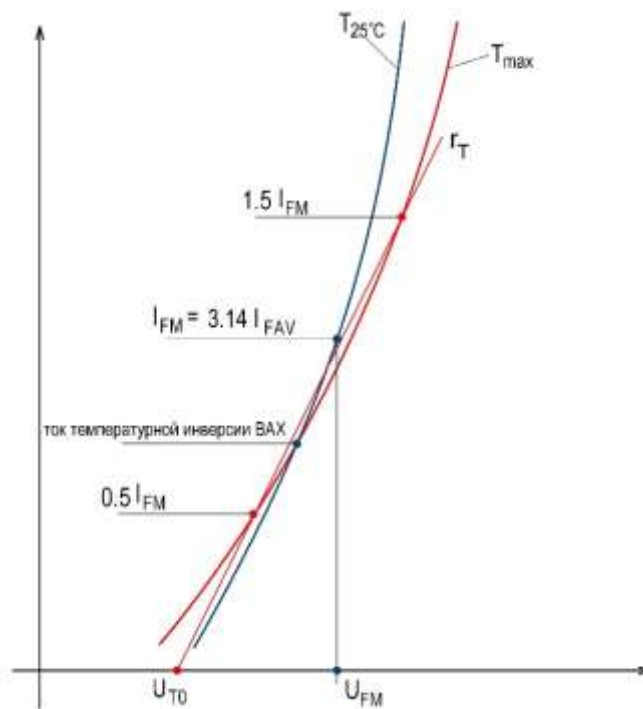
Рисунок 5. Типичная вольт-амперная характеристика в логарифмическом масштабе.

Температурные изменения обратной вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода показаны на Рисунок 5. Для наиболее распространенных сегодня силовых диодов на основе кремния имеют место следующие основные тенденции:

- Сильное увеличение обратного тока при росте температуры. Для комнатной температуры характерен уровень обратного тока кремниевых силовых диодов менее 0.1 мА, для максимальной рабочей температуры (125-190°C у разных типов приборов) характерен уровень от единиц до 200-300 мА. С ростом температуры ток растет приблизительно по экспоненциальному закону, удваиваясь через 7-10°C.
- Тенденция к увеличению  $U_{BR}$  при росте температуры. Для типичных кремниевых диодов  $U_{BR}$  изменяется на 10-15% при изменении температуры на 100°C.

### 2.3.2. Проводящее состояние

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» придерживается норм измерения параметров проводящего состояния указанных на *Рисунок 6*.



*Рисунок 6. Типичная прямая вольтамперная характеристика силового диода.*

Основными характеристиками диода в проводящем состоянии являются:

**$I_{FAV}$  — Средний прямой ток [А]** — средняя за период величина выпрямленного пульсирующего тока. Под  $I_{FAV}$  понимают максимально допустимое среднее значение прямого тока, длительно протекающего через диод. Обычно значения  $I_{FAV}$  приводятся для выпрямленного тока синусоидальной формы, тогда амплитудному значению тока  $I_{FM} = 3.14 \cdot I_{FAV}$  соответствует импульсное прямое напряжение ( $U_{FM}$ ) — мгновенное значение прямого напряжения.

**$I_{FRMS}$  — Действующий прямой ток [А]** — максимально допустимое действующее значение выпрямленного пульсирующего тока диода при оговоренной форме импульсов и условиях охлаждения.

$U_{FM}$  — Импульсное прямое напряжение [В] — максимальное мгновенное значение прямого напряжения при оговоренных амплитудном значении прямого тока и температуре перехода.

Для удобства расчета потерь в проводящем состоянии вводятся элементы кусочно-линейно аппроксимации ВАХ (пороговое напряжение  $U_{F(T_0)}$  и динамическое сопротивление  $r_T$ ). Смысл этих параметров ясен из *Рисунок 6*. Для их определения через точки ВАХ соответствующие значениям тока  $0.5 \cdot I_{FAV}$  и  $1.5 \cdot I_{FAV}$  проводится линия. Наклон этой линии соответствует  $r_T$ , а отрезок, отсекаемый на оси напряжений это –  $U_{F(T_0)}$ .

Зная элементы кусочно-линейно аппроксимации ВАХ ( $U_{T_0}$  и  $r_T$ ) можно произвести расчет мощности потерь диода при выбранном значении прямого тока:

$$P = U_{T_0} * I_{FAV} + r_T * I_{FRMS}^2$$

В информационных материалах АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» приведена более точная аппроксимация прямой ВАХ.

$$U_{FM} = A + B * U_{FM} + C * \ln(I_{FM} + 1) + D \sqrt{I_{FM}}$$

где А, В, С, D – константы.

Использование этой аппроксимации позволяет вычислить рассеиваемую мощность более точно, но требует применения численных методов.

Температурные изменения прямой ВАХ, характерные для силовых диодов на базе кремния, приведены на *Рисунок 6*. Характер изменения прямого напряжения зависит от тока: если он меньше так называемого тока температурной инверсии ВАХ, то напряжение уменьшается с ростом температуры, если больше – увеличивается.

При выборе режимов работы диодов желательно, чтобы диапазон рабочих токов лежал в основном выше тока температурной инверсии ВАХ. Силовые диоды, как правило, имеют большую площадь полупроводникового кристалла, поэтому при плотностях тока ниже точки температурной инверсии возможно возникновение неравномерного распределения плотности тока по площади кристалла, что может приводить к локальным перегревам.

Значения параметров  $I_{FAV}$  и  $I_{FRMS}$  можно рассчитать способом аналогичным расчёту значений  $I_{TAV}$  и  $I_{TRMS}$  для тиристоров (Раздел 3.3.3). При расчете коэффициент формы ( $k_f$ ) для диода всегда будет равен 1.41 для прямоугольной формы тока и 1.57 для синусоидальной формы тока.

### 2.3.3. Переходное состояние

Процесс перехода диода из проводящего состояния, когда к нему приложено прямое напряжение, в непроводящее состояние, когда приложено обратное напряжение, называется обратным восстановлением.

На Рисунок 7 изображены ток и напряжение на диоде непосредственно в процессе его обратного восстановления, при работе на активно-индуктивную нагрузку. Если диод восстанавливается на активно-индуктивную нагрузку, что характерно для основных применений силовых приборов, то значение его отрицательного тока линейно возрастает, доходит до некоего значения  $I_{rrM}$ , обусловленного конструктивно, а потом спадает до нуля. Для приборов производства АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», в соответствии с ГОСТ 24461-80, основные параметры обратного восстановления диода измеряют следующим образом: на спаде тока обратного восстановления проводится хорда от  $0.9 \cdot I_{rrM}$  до  $0.25 \cdot I_{rrM}$ . Отрезок времени между переходом тока через 0 и местом пересечения хорды через ось времени определяет время обратного восстановления  $t_{rr}$ .

Значение  $U_{rrM}$  — соответствует значению максимального выброса напряжения при коммутации диода.

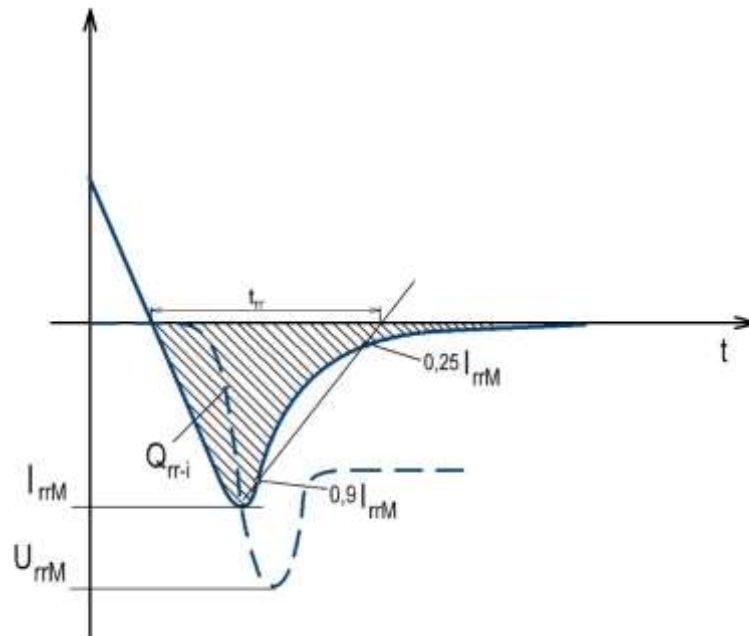


Рисунок 7. Обратное восстановление диода с p-n переходом.

Основными характеристиками обратного восстановления диода являются:

$I_{rrM}$  — Ток обратного восстановления [А] — максимальный обратный ток, проводимый диодом в процессе обратного восстановления (Рисунок 7).

$U_{rrM}$  — Напряжение обратного восстановления [В] — максимальное обратное напряжение в процессе обратного восстановления диода.

$t_{rr}$  — Время обратного восстановления [мкс] — время протекания переходного процесса восстановления, т. е. время, в течение которого обратный ток через прибор существенно выше обратного тока утечки.

## $Q_{rr}$ — Заряд обратного восстановления [мкКл]

Обычно для оценки величины  $Q_{rr}$  используется следующая формула:

$$Q_{rr} = \frac{I_{rrM} * t_{rr}}{2}$$

т.е. приближенно считается, что ток обратного восстановления имеет форму треугольника.

Значение  $Q_{rr}$  зависит от количества избыточных электронно-дырочных пар, накопленных в полупроводниковой структуре диода при пропускании прямого тока, а также от условий обратного восстановления: скорости спада прямого тока, обратного напряжения источника.

Более точную оценку дает численное интегрирование эпюры тока обратного восстановления, в обозначение заряда обратного восстановления при этом обычно добавляют индекс "i":

$$Q_{rr-i} = - \int_{t_0}^{t_i} i dt$$

Где:

$t_0$  – момент перехода анодного тока через нулевое значение,

$t_i$  – момент окончания интегрирования.

Обычно значение  $t_i$  выбирается, как момент достижения обратным током некоторого малого значения, например 2% от значения  $I_{rrM}$ .

Значение  $Q_{rr}$  зависит от количества избыточных электронно-дырочных пар, накопленных в полупроводниковой структуре диода при пропускании прямого тока, а также от условий обратного восстановления: скорости спада прямого тока, обратного напряжения источника.

«Рассасывание» избыточных электронно-дырочных пар в процессе обратного восстановления определяется двумя процессами: их выносом из полупроводниковой структуры – за счет этого процесса возникает импульс обратного тока, а также за счет рекомбинации в полупроводниковой структуре – этот процесс «внешнего» тока не вызывает. Скорость рекомбинации характеризуется временем жизни носителей заряда ( $\tau$ ) – средним временем существования избыточных электрона или дырки в полупроводниковой структуре до акта рекомбинации.

При больших значениях скорости спада тока весь процесс обратного восстановления, от начала спада прямого тока до окончания спада обратного тока, становится очень коротким – меньше  $\tau$ . Поэтому рекомбинация практически не вносит вклада в уменьшение количества избыточных электронно-дырочных пар, вынесенный заряд которых ( $Q_{rr}$ ) зависит только от количества изначально накопленных при протекании прямого тока.

При малых значениях скорости спада тока, когда длительность интервала времени от начала спада прямого тока до перехода его через нулевое значение становится больше  $3\tau$ , вклад рекомбинации становится значительным. При этом прибор как бы «забывает» с какого значения прямого тока начался процесс восстановления –  $Q_{rr}$  при малых  $di/dt$  спада слабо зависит от значения прямого тока.

Таким образом при больших  $di/dt$  спада  $Q_{rr}$  зависит от прямого тока и слабо – от  $di/dt$ , а при малых  $di/dt$  спада  $Q_{rr}$  зависит от  $di/dt$  и слабо – от тока.

С ростом обратного напряжения  $Q_{rr}$  растет, что обусловлено расширением области пространственного заряда обратно смещенного р-п перехода и увеличением количества вынесенных из полупроводниковой структуры электронов и дырок. Общее количество вынесенных носителей заряда, однако, не может быть выше, чем количество электронно-дырочных пар, оставшихся в структуре на момент перехода тока через ноль, поэтому зависимость  $Q_{rr}(U_R)$  также стремится к насыщению при увеличении  $U_R$ .

**$E_{RQ}$  — Энергия потерь обратного восстановления [Дж]** — данный параметр не приводится в информационных материалах АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», однако его необходимо упомянуть в рамках данных рекомендаций.  $E_{RQ}$  является интегралом по времени от мощности потерь (произведение анодных тока и напряжения) в переходном процессе обратного восстановления. Значение энергии потерь обратного восстановления имеет большую важность при работе диода на повышенной частоте. Практика показывает, что уже при частоте несколько кГц доля общей мощности потерь диода, обусловленная обратным восстановлением, может стать сравнимой и даже выше, чем мощность потерь, рассеиваемая в проводящем состоянии. Энергия потерь обратного восстановления и заряд обратного восстановления диода имеют связь. Если обратное восстановление происходит в цепи с полностью индуктивной нагрузкой, диод не защищен RC цепями, демпфирующими выбросы напряжения, а изменениями значения напряжения источника в течение  $t_{rr}$  можно пренебречь, то справедлива формула:

$$E_{RQ} = Q_{rr-i} * U_R$$

где  $U_R$  – напряжение источника.

## 2.4. Типы силовых диодов, выпускаемых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС»

Компания АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» производит силовые полупроводниковые диоды следующих типов:

- Силовые выпрямительные диоды (Д)
- Быстровосстанавливающиеся диоды (ДЧ)
- Лавинные диоды (ДЛ)
- Быстровосстанавливающиеся лавинные диоды (ДЧЛ)
- Сварочные диоды (ДО)

**Силовой выпрямительный диод** — это прибор, предназначенный для работы в выпрямительных блоках, работающих на относительно небольшой частоте (обычно на промышленной частоте 50 или 60 Гц, реже на частотах до 500 Гц). Для этих приборов основное внимание уделяется минимизации мощности потерь в проводящем состоянии при обеспечении заданного обратного напряжения. Значения  $Q_{rr}$  и  $E_{RQ}$  для таких диодов может быть весьма большим, что, как правило, исключает возможность их применения на повышенной частоте и в частотно-импульсных режимах.

**Быстровосстанавливающийся диод** — это прибор с уменьшенными значениями  $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ ,  $E_{RQ}$ , предназначенный для работы на повышенных частотах или в частотно-импульсных режимах.

**Лавинный диод** — диод, работа такого диода допускается в режиме лавинного пробоя. Обычно этот прибор характеризуют значением пробивного напряжения  $U_{BR}$ , которое определяет величину минимального значения начала лавинного пробоя, а также энергетическими характеристиками пробоя: максимально допустимыми ударной пиковой рассеиваемой мощностью ( $P_{RSM}$ ) и/или энергией потерь при лавинном пробое.

**Быстровосстанавливающиеся лавинные диоды** — лавинные диоды, но с уменьшенным временем обратного восстановления.

**Сварочные диоды** — это диоды, предназначенные для работы в сварочном промышленном оборудовании. Так как при эксплуатации в сварочном оборудовании напряжение, протекающее через диод, довольно низкое, для обеспечения высокой мощности и большой плотности тока в сварочных диодах применяются полупроводниковые элементы минимальной толщины, изготовленные по сплавной технологии. Также малая толщина корпусов сварочных диодов позволяет обеспечить низкое тепловое сопротивление  $R_{th}$ .

## 3. Силовые тиристоры

### 3.1. Определение



Рисунок 8. Символическое обозначение тиристора.

Тиристор — полупроводниковый ключ с тремя электродами (анод, катод, управляющий электрод(УЭ)).

Тиристор может быть characterized тремя основными состояниями:

- закрытое состояние – тиристор находится в состоянии низкой проводимости при приложенном к нему прямом напряжении (с более положительным потенциалом на аноде);
- непроводящее состояние – тиристор находится в состоянии низкой проводимости при приложенном к нему обратном напряжении (с более положительным потенциалом на катоде);
- проводящее состояние – тиристор находится в состоянии высокой проводимости при приложенном к нему прямом напряжении (с более положительным потенциалом на аноде) и проводит ток в цепи анод-катод.

Тиристор – полууправляемый ключ – при прямом напряжении в цепи анод-катод он может находиться как в состоянии с низкой проводимостью, так и в состоянии с высокой проводимостью. Включение тиристора (переход из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости) происходит при прохождении в цепи УЭ – катод тока. Если после включения тиристор проводит ток в цепи анод-катод, то ток управления может быть снят, при этом тиристор останется в состоянии высокой проводимости, т. е. тиристор может быть включен коротким импульсом тока в цепи управления.

Обычный силовой тиристор по цепи управления может быть только включен. Для выключения ток в цепи анод–катод должен быть снят или уменьшен менее некоторого значения, называемого током удержания. Тогда через определенный промежуток времени, называемый временем выключения, тиристор перейдет из проводящего состояния в закрытое состояние.

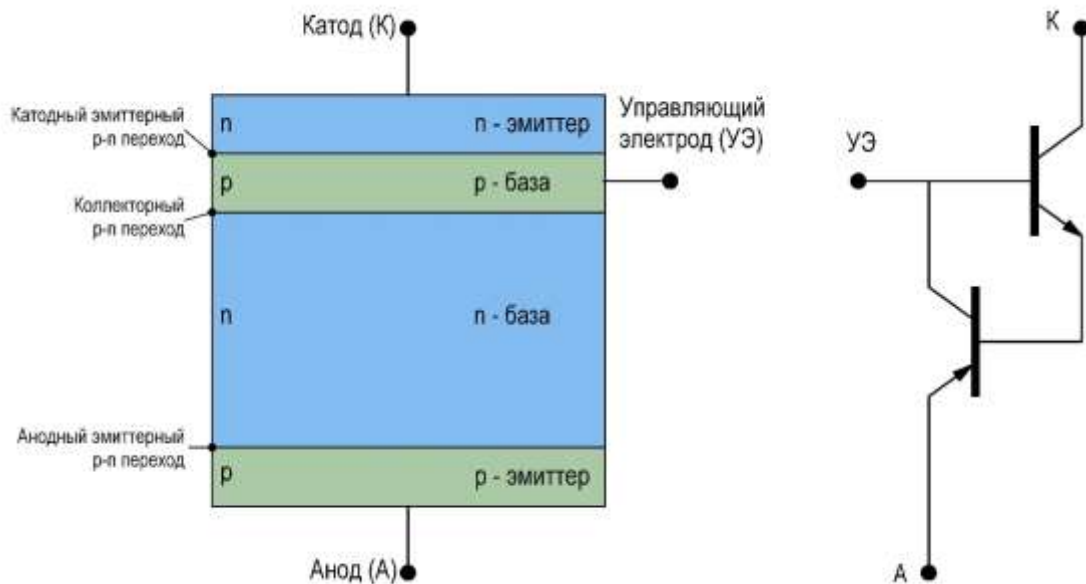
В отличие от диода полупроводниковая структура тиристора имеет четыре слоя с различным типом проводимости: n-эмиттер, p-база, n-база, p-эмиттер. Эти слои разделены тремя p-n переходами:

- катодный эмиттерный p-n переход находится между n-эмиттером и p-базой
- анодный эмиттерный p-n переход – между p-эмиттером и n-базой



- коллекторный р-п переход – между р- и п- базами

Сечение полупроводниковой структуры приведено на *Рисунок 9*



*Рисунок 9. Сечение полупроводниковой структуры тиристора и его эквивалентная схема.*

Физика процессов в этой полупроводниковой структуре такова, что приложение положительного потенциала на анод по сравнению с катодом приводит к появлению вольтамперной характеристики (ВАХ) с участком отрицательного дифференциального сопротивления (*Рисунок 10*). Механизм возникновения отрицательного участка ВАХ может быть объяснен следующим образом. Четырехслойную тиристорную структуру (*Рисунок 9*) можно представить, как две функционально объединенные трехслойные транзисторные структуры – п-р-п и р-п-р, причем, так как коллекторный р-п переход – общий для обоих этих «составляющих» транзисторов, то коллектор каждого из них оказывается подключен к базе другого. Так как транзисторы обладают усилительными свойствами, то такая эквивалентная схема их включения приводит к появлению положительной обратной связи по току, что и обуславливает появление участка ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

При приложении к тиристорному прямого напряжения (положительное смещение на аноде) общее напряжение анод-катод прикладывается в основном к коллекторному р-п переходу, т. к. эмиттерные переходы смещены в прямом направлении. Участок с отрицательным сопротивлением возникает при условии, что сумма дифференциальных коэффициентов усиления по току (в схеме с общей базой) «составляющих» транзисторов больше единицы. Коэффициенты усиления транзисторов не являются постоянными, причем в интервале тока коллектора от нуля до некоторого значения растут с увеличением этого тока. На начальном участке ВАХ тиристора (*Рисунок 10*) сумма коэффициентов усиления при малом общем токе коллектора меньше 1, поэтому ВАХ имеет положительное дифференциальное сопротивление. По мере увеличения тока коллектора (при отсутствии тока управления – за счет увеличения тока утечки обратносмещенного коллекторного р-п перехода при возрастании напряжения) сумма этих коэффициентов возрастает и при некотором значении напряжения (напряжении переключения) становится равной 1, а дифференциальное сопротивление ВАХ – равным нулю.



Рисунок 10. Вольтамперная характеристика тиристора.

В схемах силовой электроники тиристор, как правило, работает на нагрузку, эквивалентное сопротивление которой меньше, чем абсолютное значение отрицательного сопротивления его ВАХ. Поэтому, после достижения напряжения переключения, происходит «скачкообразное» изменение тока и напряжения тиристора: из «устойчивого» состояния с относительно малым током и относительно высоким напряжением (выключенное состояние) он переходит в другое «устойчивое» состояние с относительно малым напряжением и относительно большим током (включенное состояние). При этом «составляющие» транзисторы входят в насыщение, т. е. коллекторный р-п переход становится смещенным в прямом направлении (как и эмиттерные).

Наличие положительного тока управления, т. е. вызывающего увеличение тока коллектора соответствующего «составляющего» транзистора, приводит к уменьшению напряжения переключения. При некотором значении тока управления, т. н. токе управления «спрямления» ВАХ, отрицательный участок ВАХ вообще не возникает, т. е. тиристор находится во включенном состоянии при любых значениях положительного анодного напряжения.

При приложении к тиристорному обратного напряжения (смещение на аноде – отрицательное) запертыми оказываются эмиттерные р-п переходы, а на коллекторном – прямое смещение: т. е. оба «составляющие» транзисторы работают в «инверсном» режиме. Положительная обратная связь по току при этом не возникает, поэтому обратная ветвь ВАХ в целом подобна таковой для диода. Ток утечки обратно смещенных эмиттерных р-п переходов, однако, будет усиливаться, «составляющими» транзисторами, также и в инверсном состоянии.

Таким образом тиристор может быть характеризован двумя «статическими» состояниями – выключенным и включенным, а также двумя «динамическими» процессами – перехода из выключенного состояния во включенное и из включенного состояния в выключенное. В статических состояниях физические процессы, определяющие характеристики силового тиристора во многом схожи с таковыми для

силового диода. Динамические же процессы в тиристоре имеют ряд особенностей, наличие которых приводит к необходимости введения в полупроводниковую структуру тиристора ряда дополнительных элементов.

### 3.2. Конструкция

Сечение полупроводниковой структуры и её топология для типичного силового тиристора приведены на *Рисунок 11* и *Рисунок 12*. Основой является четырехслойная структура, аналогичная показанной на *Рисунок 9*. У современного силового тиристора, как правило, наиболее слаболегированным (высокоомным) слоем является п-база, в этот слой расширяются области пространственного заряда (ОПЗ) высоковольтных коллекторного и анодного р-п переходов при приложении прямого и обратного напряжений в выключенном состоянии (блокирующих напряжений). Управляющий электрод, как правило присоединен к р-базе и расположен на катодной стороне полупроводниковой структуры. Для этого на части катодной поверхности не формируется п+ эмиттерный слой, эти области р-типа, выходящие на поверхность, называются р-областями управления. Конструкция тиристора имеет следующие важные дополнительные элементы:

**Шунтировка катодного эмиттера.** Элементы шунтов выполнены в виде локальных областей р-типа, выходящих на катодную поверхность и имеющих общую металлизацию с п+эмиттером. Шунты вводятся для гарантированного уменьшения коэффициента усиления п-р-п «составляющего» транзистора, что необходимо для обеспечения высокого значения напряжения переключения тиристора (особенно при максимальной рабочей температуре), а также для повышения помехоустойчивости, улучшения некоторых динамических характеристик.

**Разветвленный управляющий электрод.** Включение тиристора током управления происходит первоначально лишь в относительно узкой (шириной 100-500 мкм) области, топологически прилегающей к краю р-области управления и управляющему электроду. Это обусловлено конечной величиной «поперечного» распространения тока управления в полупроводниковой структуре. Далее включенное состояние распространяется по всей площади тиристорной структуры с некоторой конечной скоростью, величина которой зависит от параметров слоев структуры, шунтировки, а также от амплитуды и скорости нарастания коммутируемого импульса анодного тока и, более не зависит от тока управления. Скорость распространения включенного состояния может составлять от нескольких единиц, до нескольких сотен микрон в микросекунду.

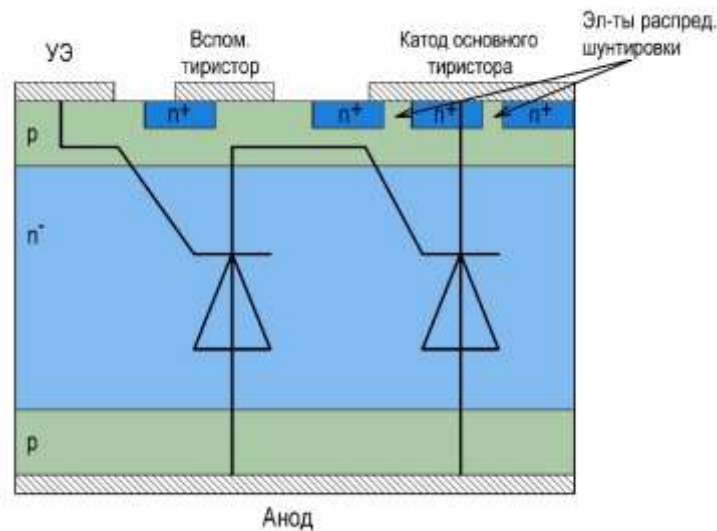


Рисунок 11. Сечение полупроводниковой структуры тиристора.

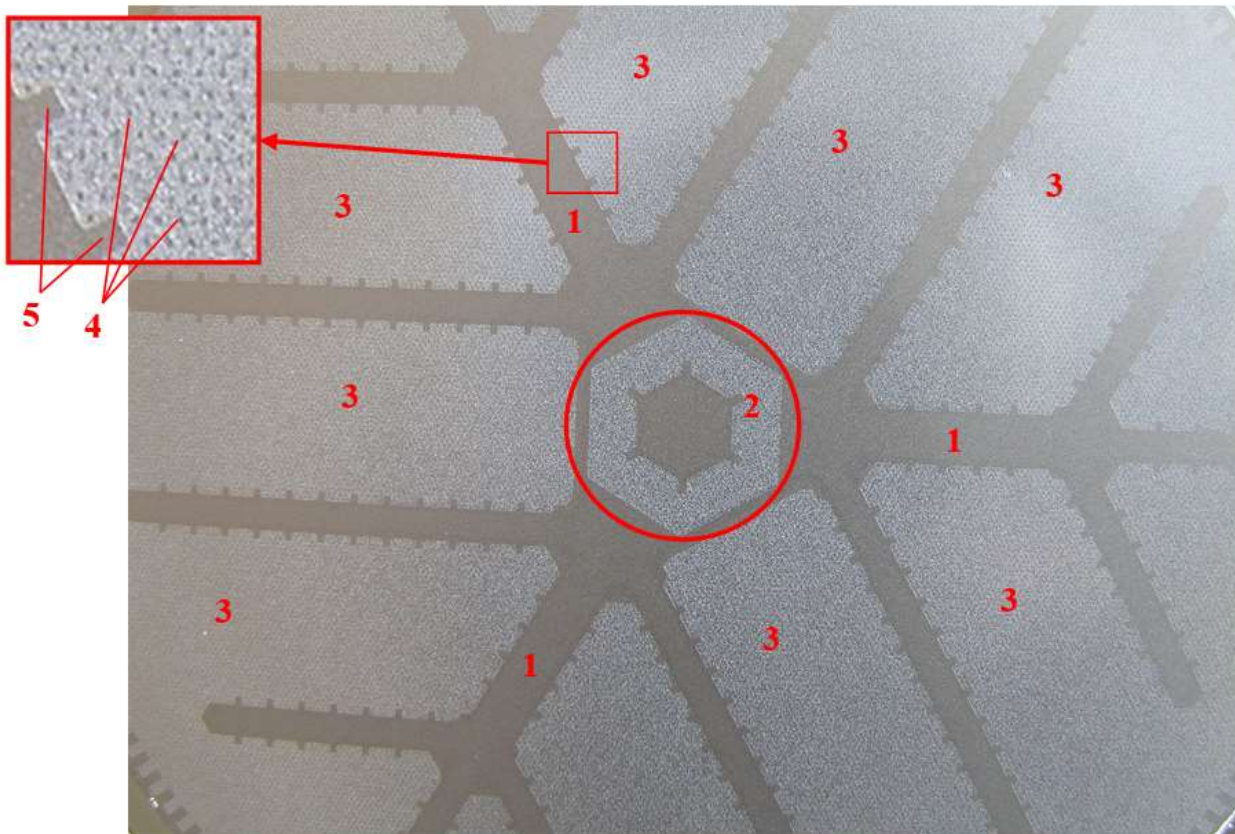


Рисунок 12. Топология полупроводниковой структуры современного тиристора (катодная металлизация удалена). 1. – разветвленная p-область управления, 2 – вспомогательный тиристор, 3 – катодная область основного тиристора, 4 – p-области элементов распределенной шунтировки, 5 – p-области элементов краевой шунтировки разветвленного управляющего электрода.

Так как площадь полупроводниковой структуры может быть весьма велика (до нескольких сотен квадратных сантиметров), то возникает проблема, как включить всю площадь тиристора за приемлемое малое время. Эту проблему и решает введение разветвленного управляющего электрода, топология (рисунок в плане) которого выбирается таким образом, чтобы снизить время распространения включенного

состояния по всей площади до разумного значения. По периметру разветвленной области управления часто располагают т. н. «краевые» элементы шунтировки, которые выполняют функции, аналогичные рассмотренным выше для распределенной шунтировки, а также способствуют более равномерному распределению тока управления по периметру разветвленной области, который может достигать десятков и даже сотен сантиметров.

**Вспомогательный (усилительный) тиристор.** Наличие в полупроводниковой структуре разветвленного управляющего электрода требует увеличения тока управления. Типичный ток управления, необходимый включения тиристорной структуры равномерно по всей длине периметра управляющего электрода, составляет около 1 А на 1 см длины периметра УЭ. Таким образом для включения тиристора с разветвленным управляющим электродом могут потребоваться импульсы тока управления амплитудой десятки и даже сотни ампер, что сильно усложняет блок управления прибором. Чтобы этого избежать вводится дополнительная вспомогательная тиристорная структура. Этот вспомогательный тиристор интегрирован в общую четырехслойную структуру (*Рисунок 11*) и имеет общий анод с основным тиристором, но свой управляющий электрод, а его катод соединен с металлизацией разветвленного управляющего электрода основного тиристора. Общая площадь катода и периметр управляющего электрода вспомогательного тиристора значительно меньше, чем у основного. «Внешний» терминал управляющего электрода всего тиристора подключается к металлизации УЭ вспомогательного тиристора, поэтому при запуске этот элемент включается первым и для его включения не требуется большого тока управления. Анодный ток включенного вспомогательного тиристора поступает на разветвленный управляющий электрод основного тиристора и приводит к включению основной структуры. Так как ток, протекающий через вспомогательный тиристор, проходит еще и через р-п переход «разветвленный УЭ – катод основного тиристора», то протекание этого тока сопровождается падением напряжения, большим, чем при протекании тока через основной тиристор, поэтому через некоторое время после включения основного тиристора вспомогательная структура, как правило, выключается.

**Область периферии полупроводникового элемента.** Также, как и для силовых диодов, для защиты от поверхностного пробоя высоковольтных р-п-переходов тиристора наиболее часто применяется профилирование краевой фаски. Так как тиристор имеет два высоковольтных р-п перехода, то профиль фаски сложнее, чем у диода (*Рисунок 13*). В полупроводниковых структурах с несимметричными р-п переходами различают прямую и обратную фаски в зависимости от того, имеет ли часть с уменьшенным объемом большую или меньшую концентрацию примеси соответственно. Для коллекторного р-п перехода структуры, показанной на *Рисунок 13* фаска является прямой, а для анодного – обратной. Эффективная защита от поверхностного пробоя для прямой и обратной фаски достигается при разных значениях угла  $\alpha$ : для прямой фаски этот угол должен быть как можно меньшим, для обратной – достаточно значений меньше  $40-50^\circ$ . Поэтому, с целью минимизации размера периферийной области, фаску для тиристорных структур формируют, обычно, двухступенчатой: угол  $\alpha_1$  составляет  $20-40^\circ$ , а угол  $\alpha_2$  –  $1-3^\circ$ .

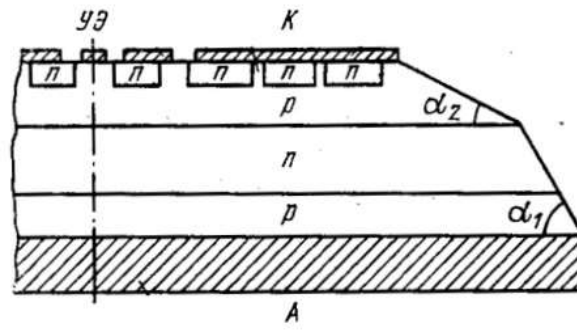


Рисунок 13. Типичный профиль краевой фаски полупроводникового элемента силового тиристора.

### 3.3. Основные электрические параметры и характеристики тириستоров

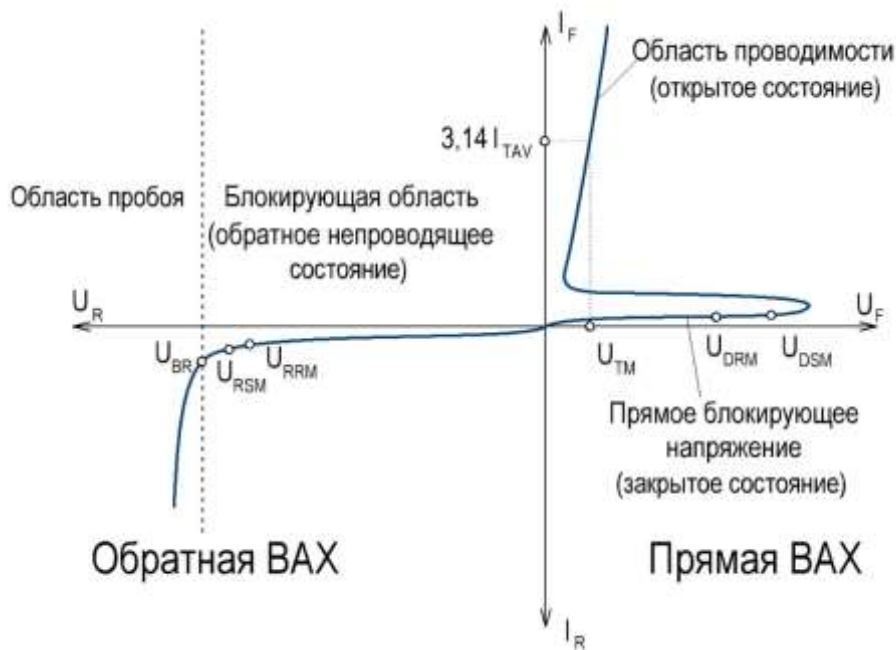


Рисунок 14. Вольтамперная характеристика тиристора.

### 3.3.1. Закрытое состояние

Современный тиристор спроектирован так, что его прямая ВАХ в закрытом состоянии близка к ВАХ обратносмещенного коллекторного р-п перехода: шунтировка катодного эмиттера и время жизни носителей заряда в п-базе выбираются так, чтобы при типичном уровне плотности тока утечки коллекторного р-п перехода коэффициенты усиления по току «составляющих» транзисторов были малы. Переключение без подачи тока управления при этом становится возможным только в режиме лавинного пробоя коллекторного р-п перехода, при уровне тока, значительно превышающем допустимый уровень тока утечки, и, как правило, приводит к выходу прибора из строя.

Таким образом, «рабочий» участок ВАХ тиристора в закрытом состоянии по своему общему виду, характерным участкам, реакции на изменения температуры и т. д. подобен обратной ВАХ диода, рассмотренной в разделе 2.3 стр 7.

Важной характеристикой закрытого состояния тиристора, определяющей его помехоустойчивость, является стойкость к быстрому нарастанию анодного напряжения ( $du/dt$  стойкость).

Прямое анодное напряжение, приложенное к закрытому тиристор, как правило, не постоянно и может претерпевать резкие скачки. При этом, за счет перезаряда барьерной емкости коллекторного р-п перехода, через него протекает импульс тока, амплитуда которого может быть намного большей, чем ток утечки. Если анодное напряжение во время скачка возрастает, то этот ток имеет «прямую» направленность и может привести к «нештатному» переключению тиристора.

Основной мерой борьбы с этим негативным эффектом является снижение эффективного сопротивления шунтировки катодного эмиттера. Рассмотрение физики переключения тиристора при коротком импульсном воздействии показало, что его можно характеризовать т. н. «критическим зарядом» ( $Q_{crit}$ ). Если импульс тока, протекающего через коллекторный р-п переход при каком-либо воздействии, очень короток (в пределе имеет вид  $\delta$ -функции), то для того, чтобы тиристор включился, интеграл этого тока по времени должен быть больше, чем некоторая величина, которая и называется критическим зарядом. При этом значение  $Q_{crit}$  примерно обратно пропорционально зависит от эффективного значения сопротивления катодной шунтировки, что и позволяет добиваться требуемых для приемлемой помехоустойчивости значений  $du/dt$ -стойкости.

К основным характеристикам тиристора в закрытом состоянии относятся:

$U_{DSM}$  — **Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии [В]** — наибольшее мгновенное значение любого неповторяющегося переходного напряжения в закрытом состоянии.

$U_{DRM}$  — **Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии [В]** — наибольшее мгновенное значение напряжения в закрытом состоянии, прикладываемого к тиристор, включая все повторяющиеся переходные напряжения.

$I_{DRM}$  — **Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии [мА]** — импульсный ток в закрытом состоянии, обусловленный повторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии.

$(du_D/dt)_{crit}$  — **Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии [В/мкс]** — этот параметр обозначает максимально допустимую скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, при подаче на выключенный тиристор напряжения экспоненциальной формы. Значение  $du/dt_{crit}$  определяется в соответствии с *рисунок 15*.

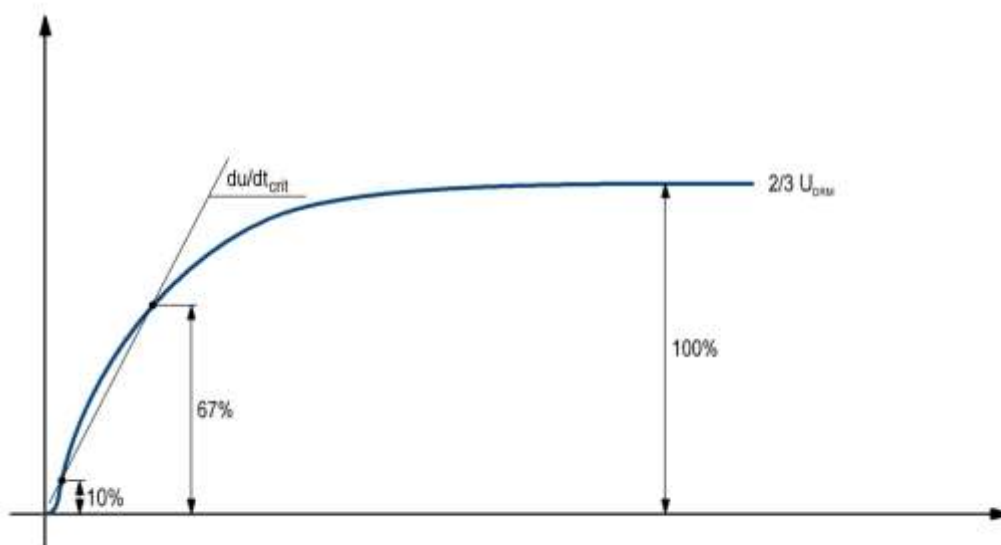


Рисунок 15. Определение  $du/dt$



### 3.3.2. Обратное непроводящее состояние

ВАХ тиристора в обратном состоянии близка к ВАХ обратносмещенного высоковольтного эмиттерного р-п перехода (анодный эмиттерный р-п переход) по тем же причинам, которые изложены выше для прямой ВАХ в закрытом состоянии.

К основным параметрам и характеристикам тиристора в обратном непроводящем состоянии относятся:

**$U_{RSM}$  — Неповторяющееся импульсное обратное напряжение [В]** — наибольшее мгновенное значение неповторяющегося переходного обратного напряжения, прикладываемого к тиристор.

**$U_{RRM}$  — Повторяющееся импульсное обратное напряжение [В]** — наибольшее мгновенное значение обратного напряжения, включая только повторяющиеся переходные напряжения.

**$I_{RRM}$  — Повторяющийся импульсный обратный ток [мА]** — обратный ток тиристора, обусловленный повторяющимся импульсным обратным напряжением.

**$U_{(BR)}$  — Обратное напряжение пробоя [В]** — обратное напряжение тиристора, при котором начинается лавинный пробой полупроводниковой структуры тиристора.

### 3.3.3. Открытое состояние

Типичный диапазон «рабочей» плотности анодного тока тиристора составляет 100-300 А/см<sup>2</sup>. При таких плотностях тока n-база и большая часть р-базы тиристора «залиты» избыточными электронно-дырочными парами (т. е. концентрация избыточных электронов и дырок там много больше, чем концентрация равновесных).

Поэтому в диапазоне «рабочих» токов ВАХ открытого тиристора по своему общему виду и реакции на изменения температуры подобна рассмотренной выше прямой ВАХ диода. Аналогичным образом определяются элементы кусочно-линейной аппроксимации ВАХ и значения максимально допустимых среднего и действующего токов.

Важной характеристикой, определяющей функционирование тиристора при малых анодных токах, является ток удержания. Если уменьшать анодный ток включенного тиристора (не подавая ток в цепь управления), то точка устойчивого состояния будет «опускаться» по кривой ВАХ (Рисунок 10) до минимально возможного устойчивого состояния, а затем скачкообразно (через область неустойчивых состояний) перейдет в новое устойчивое состояние, но уже соответствующее выключенному тиристор.

Минимальный анодный ток, при котором возможно поддержание тиристора во включенном состоянии без тока в цепи управления и есть ток удержания. По мере приближения анодного тока к значению тока удержания включенное состояние стягивается в узкий «шнур», шириной до сотни микрон. Местоположение этого шнура не фиксировано какими-либо характерными точками структуры, а определяется наиболее «слабой» точкой, где в силу неконтролируемых технологически отклонений реализуется наименьшая плотность анодного тока, при которой тиристор еще может поддерживать включенное состояние. При дальнейшем уменьшении тока выключение (прерывание тока) происходит именно в этом шнуре.

В силовом тиристоре, обладающем значительной площадью катода, при уменьшении анодного тока ниже определенного предела начинается уменьшение площади структуры, находящейся во включенном состоянии, т. е. процесс, обратный распространению включенного состояния при включении.

К основным параметрам и характеристикам тиристора в открытом состоянии относятся:

**$I_{TAV}$  — Средний ток в открытом состоянии [А]** — наибольшее допустимое среднее за период значение тока в открытом состоянии при оговоренной форме импульсов и условиях охлаждения.

**$I_{TRMS}$  — Действующий ток в открытом состоянии [А]** — наибольшее допустимое действующее значение тока в открытом состоянии при оговоренной форме импульсов и условиях охлаждения.

**$U_{TM}$  — Импульсное напряжение в открытом состоянии [В]** — наибольшее мгновенное значение напряжения в открытом состоянии, обусловленное импульсным током заданного значения.

**$I_H$  — Ток удержания [мА]** — наименьший анодный ток, необходимый для поддержания тиристора в открытом состоянии.

Также как и для диода, для тиристора вводятся характеристики кусочно-линейной аппроксимации ВАХ ( $U_{T(TO)}$  и  $r_T$ ).

**$U_{T(TO)}$  — Пороговое напряжение [В]** — значение напряжения, определяемое точкой пересечения линии прямолинейной аппроксимации ВАХ открытого состояния с осью напряжения.

**$r_T$  — Динамическое сопротивление в открытом состоянии [мОм]** — сопротивление, определяемое по наклону прямой, аппроксимирующей ВАХ в открытом состоянии.

Значения  $I_{TAV}$  и  $I_{TRMS}$  могут быть вычислены исходя из значений температуры корпуса и формы импульсов тока.

Для температуры корпуса устанавливается некоторое определенное значение, обусловленное условиями охлаждения. Значения токов  $I_{TAV}$  и  $I_{TRMS}$  в этом случае будут соответствовать максимальным величинам синусоидального тока, измеряемого для одной полуволны, при котором температура перехода достигает максимально допустимой величины. Эти данные указывают примерное значение рабочего тока при выборе прибора потребителем. Они главным образом используются для сравнения различных видов продукции в соответствии с их характеристиками во включенном состоянии. Если производится сравнение

приборов, необходимо учитывать, что температура корпусов приборов может различаться в зависимости от их применения, что значительно влияет на номинальные показатели токов.

Потребитель самостоятельно может рассчитать значение тока  $I_{TAVM}$ , в зависимости от необходимой ему температуры или угла проводимости по следующей формуле:

$$I_{TAVM} = \frac{\sqrt{U_{T(T0)}^2 + 4 * k_{\phi}^2 * r_T \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thjc}} - U_{T(T0)}}}{2 * k_{\phi}^2 * r_T}$$

где:  $k_{\phi}$  — коэффициент формы, который применяется для расчета разных форм тока. Данный коэффициент для синусоидальной формы тока можно рассчитать по формуле:

$$k_{\phi} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2\alpha)}{4}\right) * \frac{1}{2\pi}}}{-\frac{1}{2\pi} * (\cos(\alpha) - 1)}$$

где:  $\alpha$  – угол проводимости в радианах.

Для тока прямоугольной формы коэффициент формы рассчитывается следующим образом:

$$k_{\phi DC} = \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}}$$

В таблице ниже приведены значения коэффициента формы для различных углов проводимости для синусоидального тока и тока прямоугольной формы.

Таблица 1. Коэффициенты формы тока для различных углов проводимости.

$\alpha$ (град)	30°C	60°C	90°C	120°C	180°C
$k_{\phi}$	3,98	2,78	2,22	1,88	1,57
$k_{\phi DC}$	3,46	2,45	2,00	1,73	1,41

При расчетах потребитель может воспользоваться значениями коэффициента формы из Таблица 1. Для расчета  $k_{\phi}$  для каких-либо других углов проводимости необходимо использовать формулы, описанные выше.

$I_{TRMS}$  выражается через  $I_{TAVM}$  по следующей формуле при синусоидальной форме тока:

$$I_{TRMS} = I_{TAVM} \frac{\pi}{2}$$

### 3.3.4. Характеристики управления

По цепи управления тиристор описывается, обычно, тремя группами характеристик.

1. Характеристики, описывающие минимальные условия, достаточные для включения тиристора. К ним относится постоянный ток и напряжение управления, т. е. то минимальное значение постоянного тока управления и соответствующего ему напряжения управления, при котором тиристор (в оговоренных режимах испытаний) способен включиться.
2. Характеристики, описывающие максимально допустимые значения амплитуды импульсов тока управления, соответствующего напряжения управления и импульсной мощности потерь в цепи управления, применение которых не приводит к повреждению структуры тиристора. Значения максимальных импульсных тока и напряжения полезны также при подборе или разработке схемы управления (драйвера), т. к. дают информацию о требуемых напряжении холостого хода и тока короткого замыкания на выходе этой схемы.
3. Характеристики помехоустойчивости по цепи управления: максимально допустимые значения амплитуды импульсов тока и напряжения управления, которые не приводят к включению тиристора.

К основным параметрам и характеристикам тиристора по цепи управления относятся:

**$I_{GT}$  — Отпирающий постоянный ток управления [mA]** — наименьший постоянный ток управления, необходимый для включения тиристора.

**$U_{GT}$  — Отпирающее постоянное напряжение управления [V]** — постоянное напряжение управления, соответствующее отпирающему постоянному току управления.

**$I_{FGM}$  — Максимальный прямой ток управления [A]** — прямой ток, максимально допустимый для цепи управления тиристора. Величина  $I_{FGM}$  ограничивается мощностью потерь в управлении  $P_G$ .

**$U_{FGM}$  — Максимальное прямое напряжение управления [V]** — прямое напряжение, максимально допустимое для цепи управления тиристора, соответствующее максимальному прямому току управления  $I_{FGM}$ .

**$I_{GD}$  — Неотпирающий постоянный ток управления [mA]** — наибольший постоянный ток управления, не вызывающий включения тиристора.

**$U_{GD}$  — Неотпирающее постоянное напряжение управления [V]** — наибольшее постоянное напряжение управления, соответствующее току  $I_{GD}$ , не вызывающее включения тиристора.

### 3.3.5. Включение тиристора

Динамику перехода из выключенного состояния во включенное характеризует время включения тиристора, исчисляемое от начала импульса тока управления до момента достижения анодным током некоего значения (или момента спада анодного напряжения до оговоренного малого значения). При этом, время включения, обычно, делят на две фазы: время задержки включения и время нарастания.

В течение времени задержки не происходит сильных изменений анодного тока и напряжения. Если ток управления имеет резкий передний фронт (т. е. управляющее воздействие на тиристор можно считать импульсным), то время задержки примерно равно времени накопления в слаболегированных слоях структуры заряда избыточных электронно-дырочных пар, равно  $Q_{crit}$ , плюс время пролета электронов и дырок через сильнолегированные слои.

В течение времени нарастания происходит переход тиристора во включенное состояние, таким образом тиристор считается «замкнутым». Силовые тиристоры, как правило, работают в цепях с активно-индуктивной нагрузкой, в которых время нарастания тока после «замыкания» тиристорного ключа определяется индуктивностью нагрузки. Поэтому для определения конечной точки процесса включения тиристора обычно используют не момент нарастания анодного тока до оговоренной величины, а момент спада анодного напряжения на тиристоре до оговоренного значения, много меньшего, чем напряжение источника, т. е. момента, когда тиристорный ключ можно условно считать «замкнутым».

Следует отметить, что момент «окончания» включения как правило не соответствует «физическому» включению тиристора по всей площади. Процесс распространения включенного состояния, более длителен и может занимать до нескольких миллисекунд, тогда как время включения тиристора, определяемое по описанным выше правилам, занимает всего несколько микросекунд.

Для описания ограничений, накладываемых конечной скоростью распространения включенного состояния в тиристоре, применяют понятие  $di/dt$ -стойкость. На плотность тока проводимого тиристорной структурой в процессе «физического» включения влияют два фактора: скорость нарастания анодного тока, определяемая внешней схемой, и скорость распространения включенного состояния, определяемая в основном конструктивно-технологическими параметрами тиристорной структуры. Если увеличивать скорость нарастания анодного тока, то при некотором ее значении, за счет локального возрастания плотности тока на проводящих участках структуры, мощность потерь и перегрев достигнут критического значения, при превышении которого тиристор выйдет из строя. Такая скорость нарастания анодного тока называется критической -  $(di/dt)_{crit}$ . В режимах, где при включении тиристора может произойти нарастание тока со скоростью выше  $(di/dt)_{crit}$  эксплуатация тиристора недопустима.

Ограничение по  $(di/dt)_{crit}$  актуально только в переходном процессе включения тиристора. Если процесс распространения включенного состояния уже закончился, и структура включена по всей площади, быстрое нарастание анодного тока уже безопасно, даже если его скорость превышает  $(di/dt)_{crit}$ .

Если анодный ток снизится сначала до значения, близкого к току удержания, а потом произойдет его резкий рост без подачи тока в цепь управления, то это может привести к аварии тиристора даже при скорости роста анодного тока менее  $(di/dt)_{crit}$ . Причина: включенная область тиристора при первоначальном снижении тока стянулась в «шнур», площадь которого может быть значительно меньшей, чем площадь первоначального включения при «штатном» включении импульсом тока управления.

При включении со скоростью нарастания анодного тока меньшей  $(di/dt)_{crit}$  эксплуатация тиристора допустима, однако не следует забывать, что пока структура тиристора не полностью включена по площади, мощность локальных потерь во включенной области будет превышать таковую, рассчитанную по «статической» ВАХ для полностью включенного тиристора. Для учета этого фактора используется характеристика «энергия потерь при включении».

Для увеличения  $(di/dt)_{crit}$  и снижения энергии потерь при включении до необходимых значений в тиристоре применяется разветвленный управляющий электрод, увеличение длины периметра которого позволяет увеличить площадь первоначального включения основной тиристорной структуры и уменьшить время распространения включенного состояния.

К основным параметрам и характеристикам тиристора при включении относятся:

**$I_L$  — Ток включения [мА]** — наименьший прямой ток тиристора, необходимый для поддержания тиристора в проводящем состоянии непосредственно после окончания действия импульса тока управления после включения тиристора. Если при снятии импульса тока управления прямой ток тиристора будет меньше тока включения, то он упадет до нуля и тиристор перейдет в закрытое состояние.

**$t_{gd}$  — Время задержки включения [мкс]** — интервал времени между заданным моментом в начале импульса тока управления и моментом, когда основное напряжение понижается до заданного значения, близкого к начальному (например, 0.9 от начального)

**$t_{gt}$  — Время включения [мкс]** — интервал времени, в течение которого тиристор включается импульсом тока управления. (Интервал времени измеряют от момента в начале импульса тока управления до момента нарастания анодного тока до заданного значения.

**$(di/dt)_{crit}$  — Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии [А/мкс]** — наибольшее значение скорости нарастания тока в открытом состоянии, при котором тиристор остается в рабочем состоянии.

### 3.3.6. Выключение тиристора

Динамику перехода из включенного состояния в выключенное характеризуют два физических процесса: восстановление обратной и прямой блокирующих способностей.

Восстановление обратной блокирующей способности (обратное восстановление тиристора) в целом подобно процессу обратного восстановления диода и описывается аналогичными характеристиками. В случае тиристора происходит обратное восстановление его высоковольтного эмиттерного р-п перехода (обычно это анодный р-эмиттер), сопровождаемое расширением его ОПЗ и выносом части накопленных в слабелегированных слоях избыточных электронов и дырок. Так как тиристор, проводящий анодный ток «рабочей» плотности имеет «залитые» избыточными электронно-дырочными парами п- и р- базовые слои и схож по своему состоянию с диодом, фаза задержки обратного напряжения при его обратном восстановлении очень близка по протекающим процессам к таковой в диоде. В конце этой фазы от

избыточных электронно-дырочных пар освобождается часть р-базы. В результате этого создается препятствие для выноса электронов в n+ эмиттер, а прямосмещенный коллекторный р-п переход начинает инжектировать в n- базу дырки. За счет этого «транзисторного» эффекта происходит некоторое увеличение тока и заряда обратного восстановления в тиристоре по сравнению с аналогичной диодной структурой. Однако, этот эффект, как правило, становится значительным лишь в конце фазы спада тока обратного восстановления, что приводит к наличию более ярко выраженного, чем у диодов, тока «хвоста» обратного восстановления.

Эта «транзисторная» фаза протекания обратного тока продолжается и после установления обратного напряжения на тиристоре, близкого к напряжению источника. Вынос избыточных электронов из n-базы сильно сокращается, а поток избыточных дырок, уходящий через обратносмещенный анодный эмиттерный р-п переход, компенсируется потоком дырок, инжектированных прямосмещенным коллекторным р-п переходом. В итоге количество избыточных электронно-дырочных пар в n-базе сокращается, в основном, лишь за счет их рекомбинации.

Когда восстановление обратной блокирующей способности уже произошло (к тиристору приложено обратное напряжение), в n-базе всё еще сохраняется значительный заряд избыточных электронно-дырочных пар. Если полярность напряжения, прикладываемого к тиристору, поменяется, то произойдет процесс обратного восстановления коллекторного р-п перехода (т. к. он окажется под обратным смещением). Импульс тока восстановления этого р-п перехода может привести к повторному включению тиристорной структуры, т. е. прямая блокирующая способность еще не восстановлена.

Для того, чтобы тиристорная структура не переключилась, необходимо чтобы заряд обратного восстановления коллекторного р-п перехода был меньшим, чем  $Q_{crit}$ . Этот заряд пропорционален заряду избыточных электронно-дырочных пар в момент перемены полярности напряжения. Т.к. заряд избыточных электронно-дырочных пар в n-базе уменьшается со временем вследствие рекомбинации, то в некоторый момент времени это условие будет выполнено. Наименьший промежуток времени между моментом смены направления анодного тока при обратном восстановлении и моментом смены полярности анодного напряжения, когда тиристор не переключается, называется временем выключения -  $t_q$ , Рисунок 16.

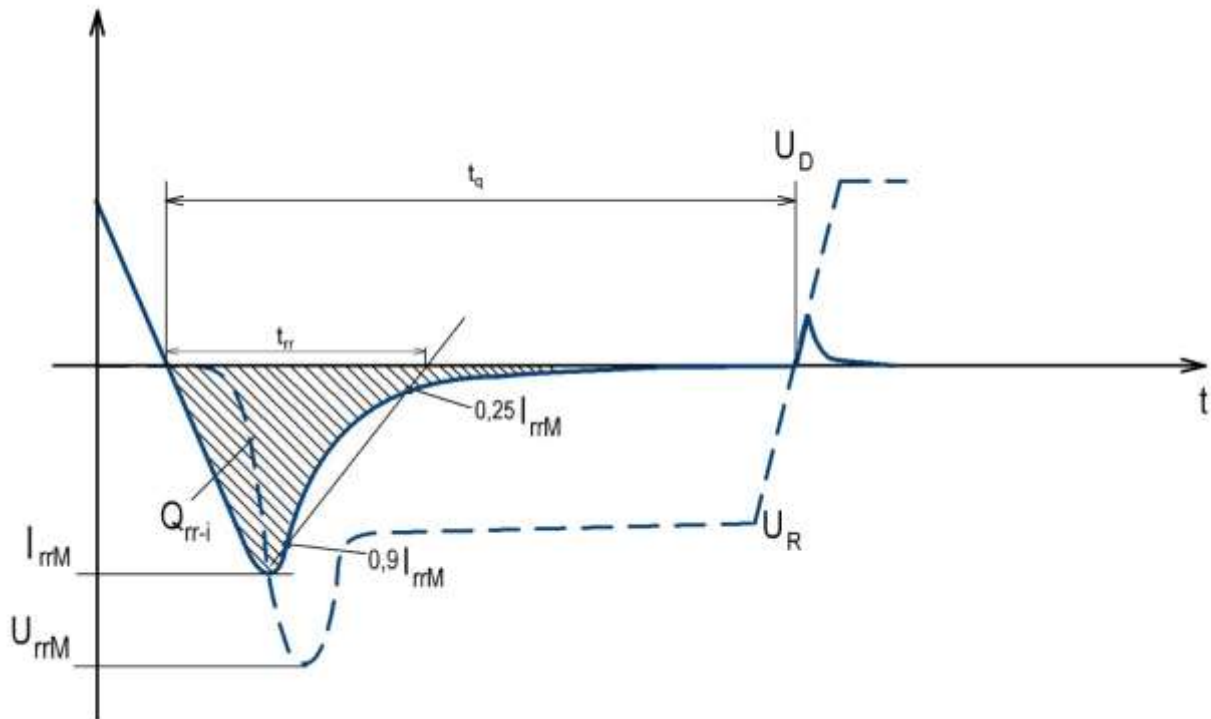


Рисунок 16. Обратное восстановление и выключение тиристора.

Так как заряд избыточных электронно-дырочных пар в n-базе уменьшается за счет рекомбинации, т. е. экспоненциально с постоянной времени спада, равной эффективному времени жизни избыточных электронно-дырочных пар  $\tau$ , то для времени выключения тиристора справедлива формула:

$$t_q = t_{rr} + \tau * \ln\left(\frac{K_{eff} Q_1}{Q_{crit}}\right)$$

где:

$Q_1$  – заряд избыточных электронно-дырочных пар в n-базе тиристора в момент окончания процесса обратного восстановления,

$K_{eff}$  – коэффициент пропорциональности между зарядом избыточных электронно-дырочных пар в n-базе тиристора и зарядом обратного восстановления коллекторного p-n перехода при смене полярности напряжения.

К основным параметрам и характеристикам тиристора при выключении (обратном восстановлении) относятся:

**$t_q$  — Время выключения [мкс]** — наименьший интервал времени между моментом, когда основной ток после внешнего переключения основных цепей понизился до нуля, и моментом, когда тиристор способен выдерживать напряжение в закрытом состоянии с определенной скоростью его нарастания.



$Q_{rr}$  — **Заряд обратного восстановления [мкКл]** — определяется так же как и для диода, по хорде между точками  $0.9 \cdot I_{rrM}$  и  $0.25 \cdot I_{rrM}$ .

$t_{rr}$  — **Время обратного восстановления [мкс]** — интервал времени между моментом, когда основной ток проходит через нулевое значение, изменяя направление от прямого на обратное, и моментом, когда обратный ток уменьшается с его амплитудного значения до заданного значения, или когда экстраполированный обратный ток достигает нуля.

$I_{rrM}$  — **Ток обратного восстановления [А]** — максимальный обратный ток тиристора, протекающий во время обратного восстановления.

### 3.4. Типы силовых тиристорov, выпускаемых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС»

Компания АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» производит силовые полупроводниковые тиристоры следующих типов:

- Низкочастотные тиристоры (Т)
- Быстродействующие тиристоры (ТБ)
- Тиристоры быстродействующие импульсные (ТБИ)
- Тиристоры быстродействующие частотные (ТБЧ)
- Лавинные тиристоры (ТЛ)

**Низкочастотные тиристоры.** Эти тиристоры предназначен для работы в аппаратуре, работающей на относительно небольшой частоте (обычно на промышленной частоте 50 или 60 Гц, реже на частотах до 500 Гц): управляемых выпрямителях, устройствах плавного пуска электродвигателей, инверторах тока и т. д. Для этих приборов основное внимание уделяется минимизации мощности потерь в проводящем состоянии при обеспечении заданного прямого и обратного блокирующего напряжения. Эти приборы часто используются в преобразователях, для напряжений 6-10 кВ и выше, где необходимо последовательное соединение отдельных тиристорov. Поэтому для таких тиристорov достаточно актуальным является повышение допустимых блокирующих напряжений, а также обеспечение синхронного включения и обратного восстановления. Значения  $Q_{rr}$  и  $E_{RQ}$  для тиристора для применения на промышленной частоте может быть весьма большим, что, как правило, исключает возможность их применения на повышенной частоте и в частотно-импульсных режимах. Время выключения как правило составляет от 80 до 1000 мкс, в зависимости от среднего тока и класса тиристора.

**Быстродействующие тиристоры** — это приборы с уменьшенными значениями  $t_q$ ,  $t_{rr}$ ,  $Q_{rr}$ ,  $E_{RQ}$ , предназначенные для работы на повышенных частотах или в частотно-импульсных режимах. Характеристики  $U_{TM}$ ,  $t_q$ ,  $Q_{rr}$ , тиристора связаны между собой, уменьшение значения  $t_q$  и  $Q_{rr}$  ведёт к увеличению  $U_{TM}$ . Для оптимизации сочетания  $U_{TM}$ ,  $t_q$ ,  $Q_{rr}$ , как и в бысторовосстанавливающихся диодах,

применяются технологические методы, позволяющие контролируемо снизить  $\tau$  в слоях полупроводниковой структуры: легирование атомами тяжелых металлов (золото, платина и др.), облучение высокоэнергетическими частицами ( $\gamma$  – кванты, электроны, протоны, альфа-частицы и др.). Также применяются методы управления коэффициентом инжекции р-эмиттера. Для уменьшения  $t_d$  также применяется более эффективная распределенная шунтировка катодного эмиттера (с меньшими расстояниями между шунтами, чем у низкочастотных тиристоров). Частотный диапазон для использования ТБ до 10кГц.

Так как работа на повышенных частотах часто сопровождается увеличенной скоростью на фронте импульсов анодного тока, к быстродействующим тиристорам часто предъявляются требования импульсных тиристоров: повышенная  $di/dt$  – стойкость, малое время включения.

**Быстродействующие импульсные тиристоры** – это тиристоры, для которых дополнительно нормируется заряд обратного восстановления  $Q_{rr}$ . Кроме того, данные приборы, адаптированы для коммутации импульсов тока с высокой скоростью нарастания на фронте и высокой амплитудой. Оптимальный частотный диапазон для использования ТБИ, как и ТБ, до 10кГц.

**Тиристоры быстродействующие частотные** – это тиристоры, которые применяются для работы на повышенных частотах до 30кГц. Особенностью таких тиристоров является высокая степень разветвлённости управляющего электрода, что в свою очередь обеспечивает малое время распространения включенного состояния.

**Лавинные тиристоры** – тиристор, работа которого допускается в режиме лавинного пробоя.

## 4. Виды конструктивного исполнения

### 4.1. Полупроводниковый элемент

Основой силовых приборов, производимых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», являются диодные (Рисунок 17) или тиристорные полупроводниковые элементы (ППЭ) (Рисунок 18). Конструкции ППЭ описаны в разделах 2.2 и 3.2. Различные ППЭ, определяющие параметры прибора, размещаются внутри корпуса (таблеточного, штыревого или модульного) для защиты от воздействия внешней окружающей среды. Корпус обеспечивает герметичность и механическую прочность всей конструкции.



Рисунок 17. Диодный полупроводниковый элемент.

Отличительной особенностью тиристорного ППЭ является наличие области управления (ОУ), расположенной «поверх» катодной поверхности прибора. Для быстродействующих тиристоров и тиристоров больших диаметров область управления имеет разветвления, распространяющиеся от центра к периферии ППЭ, как говорилось ранее, это необходимо для равномерного включения прибора по всей площади.

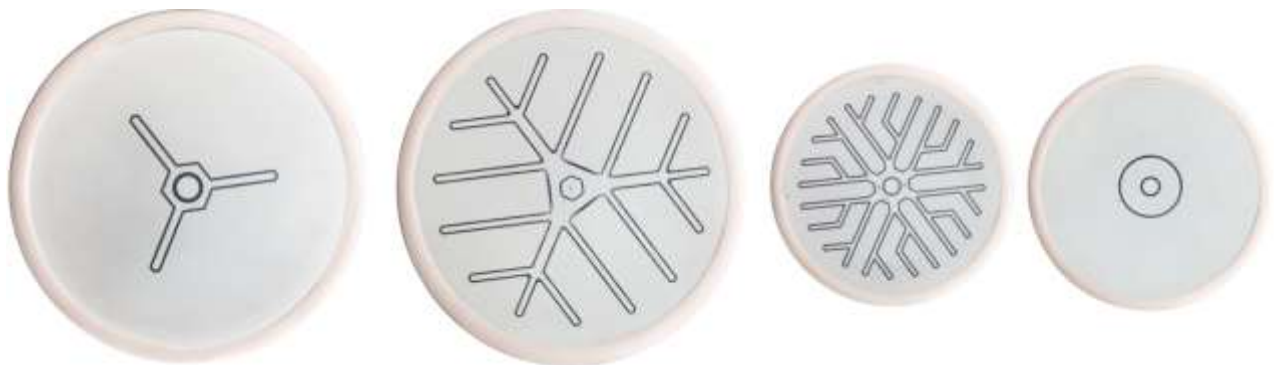


Рисунок 18. Тиристорные полупроводниковые элементы.

### 4.2. Приборы таблеточной конструкции

Приборы таблеточной конструкции представляют собой сборку полупроводникового элемента (тиристорного или диодного) в корпус, состоящий из двух медных оснований, разделённых изолирующей керамической вставкой с оребрением (*Рисунок 19*). Для тиристорных приборов на корпусе присутствуют управляющий электрод и дополнительный катодный вывод. АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» производит таблеточные приборы с диаметром контактной поверхности от 19 до 100 мм. Подробно габаритные размеры корпусов можно посмотреть в [каталоге](#), размещенном на сайте компании.



*Рисунок 19. Приборы таблеточной конструкции.*

Таблеточная (прижимная) конструкция силового полупроводникового прибора создана с целью повышения его стойкости к термоциклическим воздействиям, так как не имеет паяных и сварных соединений с ППЭ. Данная особенность дает возможность внутренним элементам с различными температурными коэффициентами расширения перемещаться независимо друг от друга. Масса и габариты таблеточных приборов, а также их симметричность, позволяют уменьшить габариты преобразовательной техники и упростить их конструкцию. Однако, если силовой полупроводниковый прибор находится в несжатом состоянии, такой конструкцией прибора не обеспечивается надежное электрическое соединение внутренних элементов между собой — возможно даже полное отсутствие контакта. Тестирование и эксплуатация силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа недопустимы без применения устройств, создающих внешнее прижимное усилие. Любое электрическое воздействие на прибор, находящийся в несжатом состоянии, может привести к разрушению полупроводникового элемента или нанести повреждения, существенно сокращающие срок его службы. Величина осевого усилия сжатия является одним из параметров силового полупроводникового прибора. Наиболее подходящим устройством, обеспечивающим необходимое прижимное усилие, является стандартный охладитель. Его конструкция обеспечивает равномерное распределение усилия по всей поверхности электродов силового полупроводникового прибора и не создает их перекосов. Так же, за счет своей конструкции, таблеточные приборы позволяют осуществлять двухсторонний теплоотвод, что дополнительно повышает циклоустойкость и надёжность приборов.

### 4.3. Приборы штыревой конструкции



Рисунок 20. Приборы штыревой конструкции.

Штыревая конструкция силового полупроводникового прибора (Рисунок 20) — основание, которого изготавливается из меди совместно с нарезным болтом для обеспечения электрического и теплового контакта с охладителем. Приборы с плоским основанием корпуса, имеют медный фланец для крепления прибора к охладителю при помощи зажимного устройства. Крышки корпусов в обоих типах выполняются в металлокерамическом исполнении. Верхний силовой вывод может быть выполнен в виде металлического (медного) плетеного жгута (гибкий вывод). Штыревые приборы, выпускаемые АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», также как и таблеточные, имеет прижимную конструкцию ППЭ. Прижим внутри корпуса обеспечивается элементами самого корпуса.

### 4.4. Приборы модульной конструкции



Рисунок 21. Приборы модульной конструкции.

Модульная конструкция силового полупроводникового прибора (Рисунок 21) — это гибридные интегральные приборы, содержащие, как правило, по два ППЭ. Конструкция корпуса модуля создается таким образом, чтобы наиболее точно удовлетворить требования заказчика. При изготовлении модулей полупроводниковые элементы помещаются в различные типы корпусов, от миниатюрного F до большого D, а также корпуса типа А, В, С и Е. АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» изготавливает модули со следующими схемами соединения двух кристаллов: встречно-параллельное, с общим катодом и с общим анодом. Подробнее со схемами включения ППЭ внутри модулей, а так же с габаритно-присоединительными размерами всех типов приборов можно ознакомиться в [каталоге](#), размещенном на сайте компании. Также как таблеточные или штыревые приборы, модули, выпускаемые АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», имеют прижимную конструкцию ППЭ. Прижим ППЭ внутри модуля обеспечивается элементами конструкции модуля. Приборы модульной конструкции имеют изолированное основание, что позволяет размещать несколько приборов на одном охладителе.

Все типы модулей имеют стандартизированные габаритно-присоединительные размеры, что облегчает их монтаж и замену аналогов в существующих преобразователях.

#### 4.5. Бескорпусные приборы



Рисунок 22. Бескорпусной сварочный диод.

Бескорпусные сварочные диоды сконструированы с уменьшенным числом тепловых контактов для обеспечения минимального теплового сопротивления (Рисунок 22). У таких диодов кремниевый кристалл со стороны катода соединён с медным электродом, который работает в качестве механического демпфера, а со стороны анода сплавлен с молибденовым термокомпенсатором, который также является оболочкой диодов. Хотя бескорпусные сварочные диоды более восприимчивы к влиянию внешних условий, у них есть неоспоримые преимущества — это более высокая плотность тока, меньший вес и меньшие геометрические размеры в сравнении с корпусными сварочными диодами.

Стандартный сварочный диод может работать при частотах до 7 кГц. Однако их оптимальный диапазон частот до 2 кГц.

Так как у бескорпусных приборов нет защищающей их «оболочки» то, при работе с ними, следует соблюдать рекомендации, указанные в разделе 12.4, стр. 63:

## 5. Тепловые параметры приборов

### 5.1. Температуры

$T_{stg}$  — **температура хранения [°C]** — диапазон температур хранения для приборов производства АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» приводится в информационных материалах и составляет: для приборов в металлокерамических корпусах от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ; для приборов в пластиковых корпусах от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$

$T_j$  — **температура р-п перехода [°C]** — диапазон рабочих температур для ППЭ, расположенного внутри корпуса прибора. Один из основных параметров, влияющих на надёжность прибора. Для тиристорov и диодов производства АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» нижний предел температуры составляет от  $-60^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}\text{C}$  для модульного исполнения), а верхний от  $125^{\circ}\text{C}$  до  $190^{\circ}\text{C}$ , в зависимости от типа прибора (допустимый диапазон указан в ИЛ или паспорте на прибор).

Нижняя температурная граница ( $T_{j\_min}$ ) обусловлена утратой механических и электрических характеристик ряда, применяемых в конструкции прибора материалов, например, заливочного диэлектрического компаунда модулей и защитного покрытия фаски ППЭ.

Верхний предел температуры перехода ( $T_{j\_max}$ ) обусловлен максимально допустимым уровнем тока утечки в закрытом состоянии, который определяется исходя из критерия гарантированной недопустимости развития теплового пробоя при длительной эксплуатации.

### 5.2. Тепловое сопротивление

$R_{thjc}$  — **тепловое сопротивление р-п переход – корпус [°C/Вт]** — тепловое сопротивление переход-корпус определяется площадью ППЭ, качеством контактных соединений и конструкцией корпуса. Этот параметр представляет собой отношение разности между температурой р-п перехода ( $T_j$ ) и температурой корпуса ( $T_c$ ) к общей рассеиваемой мощности ( $P_{tot}$ ):

$$R_{thjc} = \frac{T_j - T_c}{P_{tot}}$$

Тепловое сопротивление зависит от внутренней конструкции прибора. В информационных материалах приводятся несколько вариантов теплового сопротивления:

- $R_{thjc}$  – для одностороннего охлаждения для приборов модульной и штыревой конструкции;
- $R_{thjc}$  – для двухстороннего охлаждения (только для приборов таблеточной конструкции);
- $R_{thjc-A}$  – для охлаждения со стороны анода;
- $R_{thjc-K}$  – для охлаждения со стороны катода.



Так как  $R_{thjc}$  в большей степени зависит от конструкции устройства, оно устанавливается во время квалификационных испытаний, а также подтверждается на выборках приборов при проведении периодических испытаний.

$R_{thch}$  — **тепловое сопротивление корпус – охладитель [°C/Вт]** — отношение разности между температурой контактной поверхности (корпуса) прибора ( $T_C$ ) и температурой охладителя ( $T_H$ ) к общей рассеиваемой мощности ( $P_{tot}$ ):

$$R_{thch} = \frac{T_C - T_H}{P_{tot}}$$

Указанные значения данного параметра приводятся для установившегося режима и справедливы только при соблюдении требований к поверхности охладителя, указанные в рекомендациях по эксплуатации в паспорте на конкретный тип прибора.

$Z_{thcj}$  — **переходное тепловое сопротивление [К/Вт]** — параметр, который описывает процесс изменения теплового сопротивления во времени, обычно приводится в информационных материалах в виде графика (Рисунок 23). На графике изображены 3 кривых: ASC, CSC и DSC – для охлаждения со стороны катода, анода и двухстороннего охлаждения соответственно.

Для различных длительностей импульса тока параметр  $Z_{thjc}$  рассчитывается при помощи аналитической зависимости:

$$Z_{thjc} = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}})$$

где:

$i$  = от 1 до  $n$ ,  $n$  – число суммирующихся элементов.

$t$  = продолжительность импульсного нагрева в секундах.

$R_i$ ,  $\tau_i$  – расчетные коэффициенты, приведенные в информационных материалах на прибор

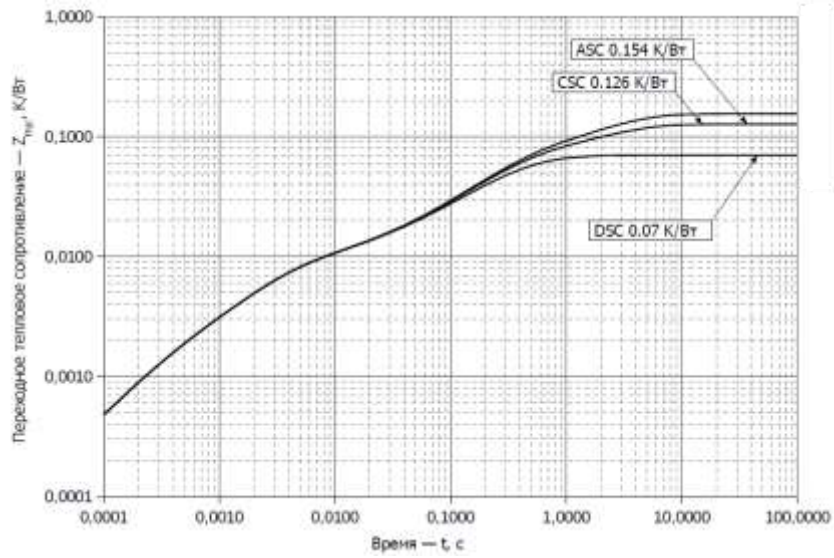


Рисунок 23. Зависимость переходного теплового сопротивления от времени.

## 6. Перегрузочные параметры приборов

Во многих случаях в преобразователях на основе силовых полупроводниковых приборов используются быстродействующие схемы защиты, исключающие воздействие напряжения на элементы схемы после срабатывания. Структура тиристора при пропускании аварийных импульсов тока может выдерживать кратковременно воздействие температуры, значительно превышающей максимально допустимую рабочую, при этом остается работоспособной после остывания до рабочей температуры. Для оценки возможности воздействия аварийных токов на полупроводниковый прибор используется значение ударного тока в открытом состоянии. Все формулы, приведённые в данном разделе, актуальны для полусинусоидальной формы тока.

**$I_{FSM/TSM}$  — Ударный ток [кА]** — наибольший прямой импульсный ток, протекание которого вызывает превышение максимально допустимой температуры перехода, но воздействие которого не приводит к выходу прибора из строя или ухудшению его характеристик после остывания. Воздействие ударного тока за время срока службы прибора предполагается редким, с ограниченным числом повторений.

В технической документации АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» приводятся амплитуды ударного тока с формой полуволны синусоиды длительностью 10 и 8 мс (половина периода для переменного тока с частотой 50 и 60 Гц, соответственно). Численные значения ударного тока, приведённые в разделе параметров в информационных материалах АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», приводятся для воздействия без приложения обратного напряжения.

Протекание ударного тока обычно обусловлено коротким замыканием в цепи нагрузки прибора. При этом предполагается, что к моменту окончания импульса успевает сработать устройство защиты преобразователя и питающая сеть отключается.

Значения ударного тока для всех типов приборов, выпускаемых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», подтверждаются экспериментально, в объеме квалификационных испытаний, путём воздействия на испытуемый прибор 10 импульсов ударного тока с заданной амплитудой.

**$I^2t$  – Защитный фактор [ $A^2c \cdot 10^3$ ]** — предельная нагрузка прибора при воздействии аварийных токов характеризуется джоулевым интегралом, определяемым как  $\int I_{F/T}^2 dt$  или фактором  $I^2t$ . Для синусоидальной формы тока это значение может быть определено через значение ударного тока  $I_{FSM/TSM}$  по следующей формуле:

$$I^2t = \int_0^{t_0} I_{F/T}^2(t) dt = \frac{I_{FSM/TSM}^2 * t_p}{2}$$

Значение параметра  $I^2t$  для плавкого предохранителя, защищающего прибор, должно быть ниже, чем максимальное значение  $I^2t$  для защищаемого прибора.

Для определения ударного тока и защитного фактора при последующем приложении обратного напряжения  $U_{rm} = 0.67 * U_{RRM}$  при  $T_j = T_{j,max}$  в информационных материалах для приборов приводятся специальные графики. На Рисунок 24 приведён пример графика зависимости  $I_{TSM}$  и  $I^2t$  от длительности

импульса  $t_p$  для тиристора Т123-250. Также в ИЛ на приборы приводится график зависимости  $I_{TSM}$  и  $I^2t$  от количества импульсов  $n_p$ .

Еще раз стоит отметить, что при воздействии вышеуказанных перегрузок происходит превышение температуры перехода выше, чем максимально допустимое значение, поэтому перегрузки допускаются ограниченное число раз за время срока службы прибора, как результат необычных, например аварийных, режимов работы преобразователей.

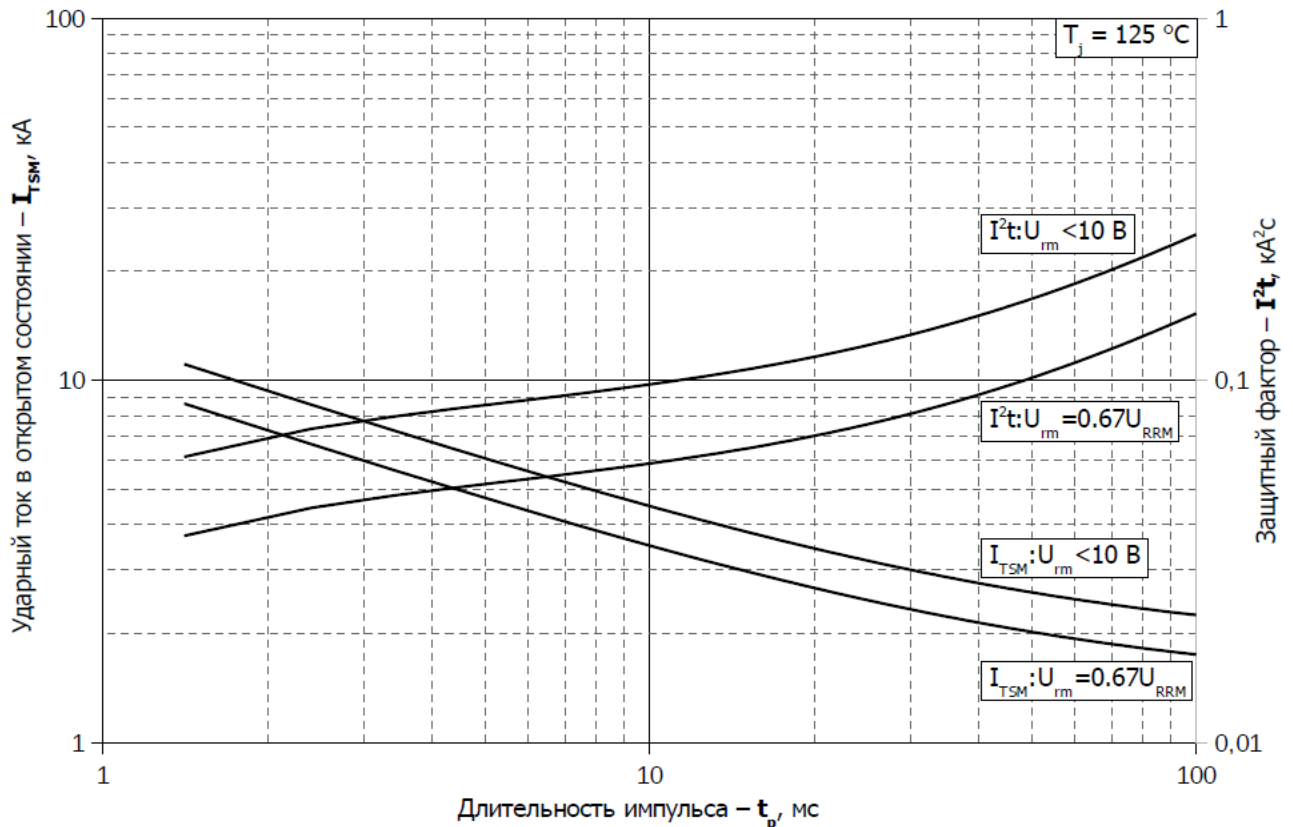


Рисунок 24. Зависимость максимальной амплитуды ударного тока в открытом состоянии  $I_{TSM}$  и защитного фактора  $I^2t$  от длительности импульса  $t_p$ .

### $P_{RSM}$ — Ударная обратная рассеиваемая мощности (Вт)

Основная характеристика перегрузочной способности лавинных приборов. Значение  $P_{RSM}$  нормируется при предельной температуре ( $T_j = T_{jmax}$ ) и длительности импульса обратного напряжения равном  $t_p = 100$  мкс.

## 7. Механические и геометрические параметры приборов

К механическим и геометрическим параметрам, описанным в информационных материалах на приборы, можно отнести следующие:

**F — монтажное усилие [кН]** — определяется как сила, возникающая при монтаже, величина которой, необходима для обеспечения требуемого теплового и электрического контакта.

Данный параметр рассматривается в зависимости от типа приборов. Для приборов таблеточной и штыревой конструкции монтажное усилие описано в разделе 7.1, а для приборов модульной конструкции в разделе 7.2.

**a — Ускорение [м/с<sup>2</sup>]** — ускорение определяется как допустимая величина ускорения в любом направлении, при условии, что прибору приложено номинальное монтажное усилие.

**w — масса [г]** — обозначает массу всего прибора.

**D<sub>s</sub> — Длина пути тока утечки по поверхности [мм]** — обозначает общее расстояние, определяемое как кратчайший путь по керамической поверхности корпуса, между фланцем анода и контактом управляющего электрода. (Рисунок 25)

**D<sub>a</sub> — Длина пути тока утечки по воздуху [мм]** — обозначает спрямленное расстояние, определяемое как кратчайший прямой путь между фланцем анода и контактом управляющего электрода (Рисунок 25).

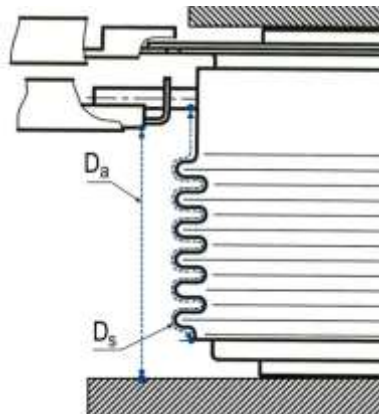


Рисунок 25. Полное и спрямлённое расстояния между анодом и управляющим электродом для таблеточного тиристора.

### 7.1. Прижимное усилие

Для обеспечения надёжного электрического и теплового контакта для всех приборов в таблеточном исполнении должно соблюдаться регламентируемое прижимное усилие. Величина необходимого прижимного усилия приводится в паспортах и информационных листах на конкретный тип прибора. Очень важно соблюдать рекомендуемое прижимное усилие, в противном случае, при недостаточном прижимном

усилии прибор может выйти из строя по причинам вызванным перегревом, а при превышении максимально допустимого значения прижимного усилия может произойти растрескивание полупроводникового элемента.

Для таблеточных приборов прижимное усилие регламентируется в зависимости от диаметра корпуса прибора. В *Таблица 2* и *Таблица 3* приведены номинальные диапазоны прижимных усилий для различных типов таблеточных приборов. Фактическое прижимное усилие должно находиться в указанных диапазонах.

Важным фактором является то, что величина прижимного усилия должна оставаться в указанном диапазоне значений при всех режимах эксплуатации, включая самые наихудшие. Слишком малое монтажное усилие приводит к росту теплового сопротивления и к возможности выхода прибора из строя из-за перегрева. Слишком высокое значение монтажного усилия ведёт к росту механической нагрузки на кремниевую пластину, в результате чего снижается ресурс срока службы прибора из-за преждевременного износа элементов, особенно при циклических нагрузках. Кроме того, важно обеспечить равномерное распределение усилия сжатия по всей площади прибора.

Штыревые приборы в корпусе типа SA1 (Типа Т(Д)х61) должны монтироваться в охладитель с крутящим моментом от 20 до 30 Н\*м.

Штыревые приборы в корпусе типа SB1, SB2 (Типа Т(Д)х71) должны монтироваться в охладитель с крутящим моментом от 25 до 35 Н\*м.

Штыревые приборы в корпусе типа SB3 (Типа Дх75 - фланцевые) должны монтироваться на охладитель с монтажным усилием от 1.5 до 2.5 кН.

*Таблица 2. Прижимные усилия сварочных диодов.*

Диаметр контактной поверхности	Тип корпуса	Прижимное усилие
44.4мм	D.Q1	От 30000 до 36000 Н
50мм	б/к	От 45000 до 50000 Н
57мм	D.W1	От 60000 до 70000 Н
58мм	б/к	От 60000 до 70000 Н

*Таблица 3. Соответствие прижимного усилия диаметру контактной поверхности таблеточных тиристоров\*.*

Диаметр контактной поверхности	Тип корпуса	Прижимное усилие
19 мм	T.A1	От 5000 до 7000 Н
25 мм	T.B2	От 9000 до 11000 Н
32 мм	T.B3	
34 мм	T.C3	От 14000 до 16000 Н
38 мм	T.C1; T.C2	
50 мм	T.D3; T.D5	От 24000 до 28000 Н
51 мм	T.D1; T.D2	
63 мм	T.E3; T.E4	От 33000 до 40000 Н
75 мм	T.F2; T.F5	От 40000 до 50000 Н
80 мм	T.F1	
		T.H1; T.H2
100 мм	T.G5; T.G6	От 70000 до 90000 Н

\*Для таблеточных диодов прижимные усилия являются аналогичными соответствующим корпусам.

## 7.2. Затяжка крепёжных винтов

Монтаж приборов модульной конструкции осуществляется при помощи крепёжных винтов. В таблице ниже приведены значения момента затяжки крепёжных винтов для каждого из типов модулей, производимых АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС». Важно соблюдать приведенные в информационных материалах моменты затяжки для обеспечения надёжного теплового контакта и избежание перегрева и выхода прибора из строя.

Таблица 4. Соответствие корпуса и момента затяжки крепёжных винтов модулей прижимной конструкции.

Тип корпуса	Момент затяжки крепёжных винтов основания	Момент затяжки винтов в силовых выводах	Монтажные габариты модуля (ш*д*в)
A2	6 Н*м (±15%)	12 Н*м (±15%)	60x149x52
B0	6 Н*м (±15%)	12 Н*м (±15%)	50x101x52
C1	6 Н*м (±15%)	9 Н*м (±15%)	50*115*52
D	9 Н*м (±15%)	18 Н*м (±15%)	77*180*84
E	6 Н*м (±15%)	18 Н*м (±15%)	70*176*90
F	6 Н*м (±15%)	6 Н*м (±15%)	34*94*30

## 7.3. Климатическое исполнение

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» производит приборы различного климатического исполнения. Тип климатического исполнения маркируется на приборе и состоит из буквенной и цифровой частей, буквенная часть обозначает климатическую зону, а цифровая – категорию размещения прибора:

У – умеренный климат (-40...+40°C);

УХЛ – умеренный и холодный климат (-60...+40°C);

Т – тропический климат (+1...55°C);

1 – на открытом воздухе;

2 – под навесом или в помещении, где условия такие же как на открытом воздухе, за исключением солнечного излучения или атмосферных осадков;

Климатическое исполнение приборов соответствует российским стандартам ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1, а также DIN IEC 60721.

## 7.4. Устойчивость к механическим воздействиям

Штыревые и таблеточные приборы проходят испытания по российскому стандарту ГОСТ 17516.1, являются механически прочными и сохраняют свои параметры в пределах норм после воздействия на них

механических нагрузок по группе M25 (ГОСТа): синусоидальная вибрация 0.5-100 Гц; амплитуда ускорения  $10\text{ м/с}^2$  (1g) и одиночные удары с длительностью импульса 50мс и ускорением  $40\text{ м/с}^2$  (4g).

Приборы модульной конструкции проходят испытания по методам российского стандарта ГОСТ 20.57.406 (метод 103-1.6) и являются механически прочными и сохраняют свои параметры в пределах норм после воздействия на них синусоидальной вибрации на частоте  $50\pm 2$  Гц с максимальной амплитудой ускорения  $50\text{ м/с}^2$  (5g) и одиночных ударов с длительностью импульса 50 мс и ускорением  $40\text{ м/с}^2$  (4g).

## 8. Области применения силовых полупроводниковых приборов.

Спектр применения силовых полупроводниковых приборов невероятно широк. Силовые полупроводниковые диоды и тиристоры могут применяться в преобразователях электроэнергии, а также в цепях постоянного и переменного тока различных силовых установок. Исходя из типа приборов, они могут применяться в качестве выпрямителей, в системах возбуждения мощных турбогенераторов и синхронных компенсаторов, в низковольтных выпрямителях сварки и гальванического оборудования, для комплектования преобразовательных устройств линий электропередачи постоянного тока, для работы в бесконтактной коммутационной и регулирующей аппаратуре и других устройствах.

Ниже приведён список отраслей и аппаратуры для силовых полупроводниковых приборов производства АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС».

<p><b>Индукционный нагрев и плавка металла</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Высокомощные инверторы (свыше 1МВт)</li> </ul>	<p><b>Приводы для нефтегазового комплекса</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Станции управления насосами</li> </ul>	<p><b>Сварочное оборудование</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Выпрямители для установок резистивной сварки</li> </ul>
<p><b>Атомная промышленность</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Инверторы</li> <li>Выпрямительно-зарядные устройства</li> </ul>	<p><b>Сетевые блоки для различных применений</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Выпрямители</li> <li>Ключи переменного тока</li> <li>Импульсные сборки</li> </ul>	<p><b>Электроприводы общего назначения</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>УПП</li> <li>Электропривод постоянного тока</li> <li>Преобразователи частоты</li> </ul>
<p><b>Импульсные разрядные системы</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Намагничиватели</li> <li>Дефектоскопы</li> <li>Системы накачки лазеров</li> <li>Кроубары</li> <li>Устройства сейсмолокации</li> </ul>	<p><b>Системы электропитания и хранения энергии</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ИБП</li> <li>Системы хранения энергии</li> <li>Выпрямители для гальваники и электролиза</li> <li>Источники электропитания вторичных цепей</li> </ul>	<p><b>Железнодорожный транспорт и метрополитен</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Зарядно-разрядные устройства</li> <li>Тяговый электропривод</li> <li>Тяговые подстанции</li> <li>Преобразователи для собственных нужд электроподвижного состава</li> </ul>
<p><b>Карьерная и шахтная спецтехника</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Тяговый электропривод постоянного тока карьерных самосвалов</li> <li>Привод управления ковша экскаватора</li> <li>Привод подвижных механизмов (подъёмные механизмы, конвейерные линии)</li> <li>Аппаратура управления и контроля насосными станциями (шахтная автоматика)</li> </ul>	<p><b>Электрогенерация и передача электрической энергии</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Статические компенсаторы</li> <li>Оборудование линий постоянного тока</li> <li>Блоки аварийного ввода резерва</li> <li>Управляемые тиристорами шунтирующие ректоры</li> <li>Статические тиристорные компенсаторы</li> <li>Компенсаторы просадок напряжения</li> <li>Системы возбуждения генераторов</li> </ul>	<p><b>Преобразователи для медицины и испытательное оборудование</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Импульсные генераторы</li> <li>Источники тока</li> </ul>





## 9. Технологии производства

На предприятии АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» реализован полный цикл производства биполярных полупроводниковых приборов, начиная от шлифовки кремния и заканчивая маркировкой и отгрузкой готовой продукции.

Условно, весь производственный цикл изготовления полупроводникового прибора можно разделить на 5 больших стадий:

1. Изготовление кремниевых пластин – формирование круглой фаски, шлифовка, отмывка.
2. Изготовление диффузионных пластин - формирование слоёв ППЭ и формирование его топологи
3. Изготовление ППЭ – сплавление кремниевых пластин с молибденовым термокомпенсатором, напыление контактной металлизации, формирование периферийных областей (фаска).
4. Измерение ППЭ – Проведение испытаний набора параметров при комнатных и максимальных температурах.
5. Сборка ППЭ в таблеточные, модульные или штыревые корпуса, а также силовых сборок с охладителями – операции сборки, приёмосдаточные испытания (ПСИ), маркировка и упаковка.

На *Рисунок 26* приведена блок-схема, в которой показан весь путь по изготовлению силового полупроводникового тиристора в компании АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС».

Для оптимизации сроков изготовления и загрузки участков на нашем производстве с большим количеством технических переходов используется ERP-система. Разработанная собственная логика ERP-системы позволяет решать специфические задачи в рамках производства СПП АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», повышает «прозрачность» производственных процессов и оптимизирует взаимодействие с поставщиками комплектующих. Всё это позволяет прогнозировать дату отгрузки готовой продукции с очень высокой точностью.

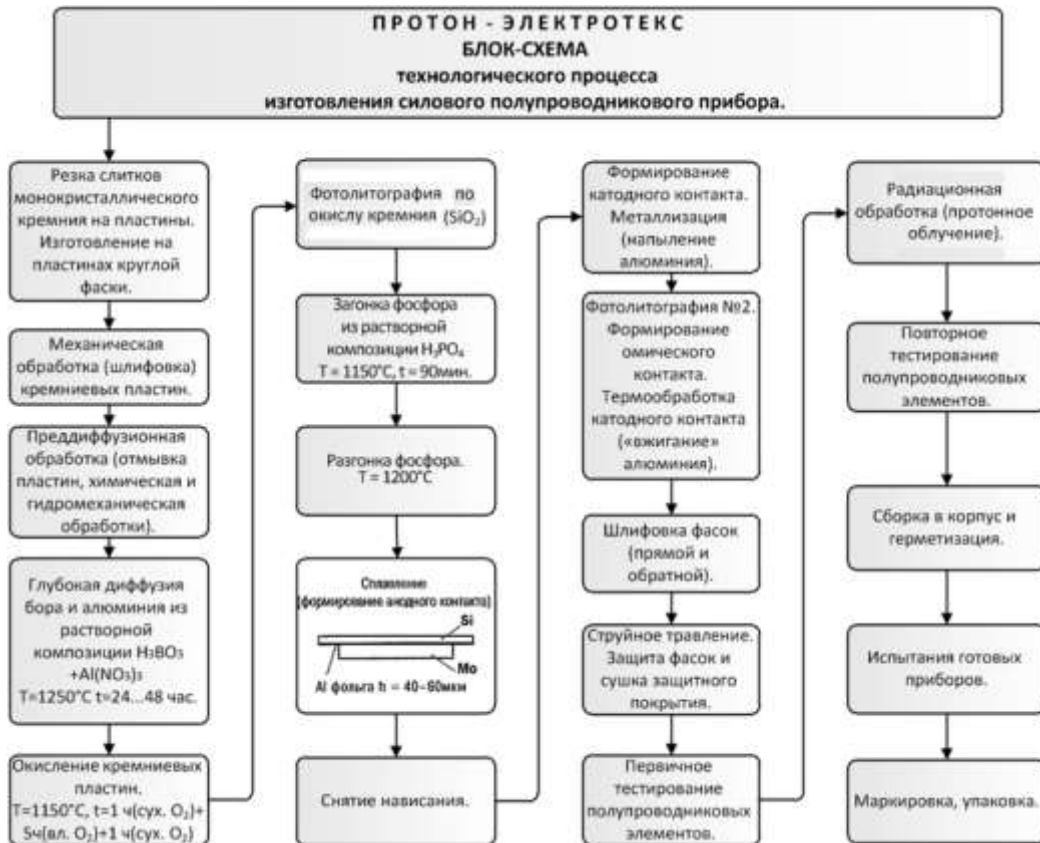


Рисунок 26. Блок схема технологического процесса изготовления силового тиристора.

## Кастомизация продукции

Для своих потребителей АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» предоставляет возможность изготовления СПП по **дополнительным требованиям**. Перечень дополнительных требований заказчиков довольно широк, например, от изготовления приборов с нестандартными выводами, до прецизионной группировки партий по параметрам.

К дополнительным требованиям можно отнести следующее:

- Отбор по  $Q_{г}$  (для обеспечения последовательного соединения)
- Отбор по  $U_T / U_F$ , включая измерения в нестандартном режиме.
- Отбор  $t_d$ .
- Модификации корпуса и/или выводов управления для тиристоров.
- Специальная маркировка.

Описанные выше требования не являются редкими, поэтому для обеспечения наших клиентов продукцией, адаптированной под дополнительные требования, на АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» предусмотрен специальный порядок рассмотрения и фиксации требований, который гарантирует их выполнение на соответствующих этапах производства, включая испытания.

В общих чертах порядок подготовки производства прибора в рамках дополнительных следующий:

1. Клиент предоставляет перечень требований к продукции.
2. Определение и согласование возможности изготовления необходимого прибора.
3. Построение маршрута производства и подготовка технической документации на продукцию (Паспорта, ИЛы, КД и т. п.).
4. Присвоение уникального кода структуры изделия.
5. Формирование плана и выпуск продукции.

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» старается учитывать интересы клиента, и если, по каким-то причинам, на этапе проверки возможности изготовления ПВГ (процент выхода годных) приборов слишком низкий или возникают какие-то другие проблемы с выпуском приборов по специальным требованиям, то все возможные варианты решения проблем обсуждаются с клиентами.

## 10. Испытания

В рамках постоянного контроля качества выпускаемых приборов и соответствия их характеристик заявленным в технических условиях, АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» проводит испытания продукции на всех этапах производства.

Компанией АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» были разработаны несколько видов измерительных комплексов широкого спектра действия:

- КИП СПП

Комплекс измерения параметров силовых полупроводниковых приборов (КИП СПП) предназначен для измерения силовых полупроводниковых приборов. Он представляет собой организованную по модульному принципу систему. Модульность позволяет собирать нужную конфигурацию системы под конкретные измерительные задачи. Такой подход упрощает организацию процесса измерений так как не возникает необходимость приобретать широкодиапазонный лабораторный измеритель, а можно использовать оборудование, строго соответствующее требуемой задаче.



Рисунок 27. Измерительный комплекс КИП СПП.

Подробнее про КИП можно узнать в [статье «Измерительное оборудование «Протон-Электротекс» на сайте компании.](#)

- АКИМ

Автоматизированный комплекс для испытания силовых полупроводниковых модулей (АКИМ) представляет собой сложный, роботизированный комплекс, предназначенный для измерения таких параметров как: электрическая прочность изоляции; блокирующее напряжение; затворные характеристики;  $U_{TM/FM}$  при минимальной и максимальной температурах. На АКИМе проводятся измерения приборов в модульном исполнении в различных корпусах и для всех типов схем соединения ППЭ внутри модулей.



Рисунок 28. Измерительный комплекс АКИМ.

Измерения происходят для комнатной и максимальной рабочей температур. Перемещение самих модулей внутри комплекса осуществляется при помощи роботизированного манипулятора.

Подробнее про АКИМ можно узнать [в статье «Работа для робота» на сайте компании.](#)

Использование подобных автоматизированных систем измерений позволяет минимизировать влияние человека на процесс измерения параметров, уменьшить количество ошибок и брака, и повысить качество производимой продукции.

Испытания СПП проводятся в соответствии с российскими стандартами, по методикам согласно ГОСТ и ТУ.

1. Квалификационные испытания

Квалификационные испытания проводят на установочной серии приборов или первой промышленной партии по программе и плану контроля для периодических испытаний.

## 2. Испытания на надёжность

Надёжность тиристоров подтверждается проведением испытаний на безотказность, сохраняемость, проверкой ресурса и срока службы. Виды и периодичность испытаний на надёжность:

- Испытание на безотказность — 1 раз в 3 года
- Проверка срока службы — 1 раз в год, обработка информации из эксплуатации.
- Проверка ресурса — 1 раз в год, обработка информации из эксплуатации.
- Проверка срока сохраняемости — при квалификационных испытаниях.

## 3. Приёмо-сдаточные испытания (ПСИ).

ПСИ для всей выпускаемой продукции проводятся в соответствии с двухступенчатым планом контроля. Перечень ПСИ приводится в ТУ на конкретный тип прибора, так как для разных типов приборов перечень измеряемых параметров может варьироваться.

## 4. Периодические испытания

Периодические испытания проводят по плану двухступенчатого выборочного контроля в зависимости от типа прибора.

## 5. UL-сертификация

Все приборы модульной конструкции, выпускаемые АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС», проходят сертификацию на стандарт UL-1557. Данная сертификация позволяет применять приборы в оборудовании для поставки в США. Информацию о сертифицированной продукции можно найти на официальном [сайте UL](#), номер UL-секции E255404.

## 11. Руководство по использованию информационных листов

Все буквенные обозначения тиристоров и диодов соответствуют стандартам:

- IEC 60747-1 – Общее (буквенные обозначения и термины)
- ГОСТ25529-82 (IEC 60747-2) — Диоды
- ГОСТ20332-84 (IEC 60747-6) — Тиристоры
- Маркировка приборов производится в соответствии с ГОСТ 20859.1-89.

Первое, что можно увидеть в информационном листе (ИЛ) на прибор – это его основные параметры, по которым происходит первичный подбор прибора при проектировании: средний прямой ток, импульсное напряжение, время выключения (для тиристоров), перечень возможных классов по напряжению и рабочий диапазон температур прибора.

Высокая стойкость к электротермоциклированию  
Низкие статические и динамические потери  
Разработан для промышленного применения

**Низкочастотный  
Тиристор  
Тип Т353-1600-18**

Средний прямой ток	$I_{TAV}$	1600 А							
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии	$U_{BDM}$	1000 ÷ 1800 В							
Повторяющееся импульсное обратное напряжение	$U_{BOM}$								
Время выключения	$t_q$	160, 200, 250, 320, 400, 500 нкс							
$U_{BDM}, U_{BOM}, В$		1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1800
Класс по напряжению		10	11	12	13	14	15	16	18
$T_c, ^\circ C$		-60 ÷ 125							

Рисунок 29. Общая информация о приборе в ИЛ

Все основные параметры прибора закодированы в его условном обозначении (маркировке). Структуры условных обозначений приборов приведены ниже.

Например:

### Маркировка таблеточных тиристоров

T[1][2][3]-[4]-[5]-[6][7]-[8][9]

[T] – Обозначение вида прибора по ГОСТ 20859.1 (Т — Тиристор, ТБ — Тиристор Быстродействующий и т. п.)

[1] – Порядковый номер модификации конструкции

[2] – Обозначение максимального диаметра корпуса по ГОСТ 20859.1

[3] – Обозначение конструктивного исполнения корпуса по ГОСТ 20859.1

[4] – Максимально допустимый средний прямой ток

[5] – Класс по ГОСТ 20856.1

[6] – Группа по критической скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии  $(du_D/dt)_{crit}$

[7] – Группа по времени выключения  $t_q$

[8] – Климатическое исполнение по ГОСТ 15150

[9] – Категория размещения по ГОСТ 15150



## Маркировка модульных приборов

MT[1]-[2]-[3]-[4]-[5][6]

[MT] – Обозначения вида модульного прибора (MT — модуль тиристорный, MD — модуль диодный, MT/D — модуль тиристорно-диодный, MD/T – модуль диодно-тиристорный)

[1] – Обозначения вида схемы соединения приборов по ГОСТ 30617

[2] – Максимально допустимый средний ток

[3] – Класс модуля по ГОСТ 30617

[4] – Модификация модуля (A2, C1, D и т. п.)

[5] – Климатическое исполнение по ГОСТ 15150

[6] – Категория размещения по ГОСТ 15150

## Маркировка таблеточных диодов

D[1][2][3]-[4]-[5]-[6][7]

[D] – Обозначение вида прибора по ГОСТ 20859.1 (D — диод, ДЛ – диод лавинный и т. п.)

[1] – Порядковый номер модификации конструкции

[2] – Обозначение максимального диаметра корпуса по ГОСТ 20859.1

[3] – Обозначение конструктивного исполнения корпуса по ГОСТ 20859.1

[4] – Максимально допустимый средний прямой ток

[5] – Класс по ГОСТ 20856.1 (\*для Д0: класс 2 ( $U_{RRM} = 200$ ,  $U_{RSM} = 300$ ); класс 4 ( $U_{RRM} = 400$ ,  $U_{RSM} = 500$ ))

[6] – Климатическое исполнение по ГОСТ 15150

[7] – Категория размещения по ГОСТ 15150

Для низкочастотных тиристоров пункты структурного обозначения №6 и №7 являются необязательными и могут приводиться или не приводиться в маркировке прибора по желанию заказчика.

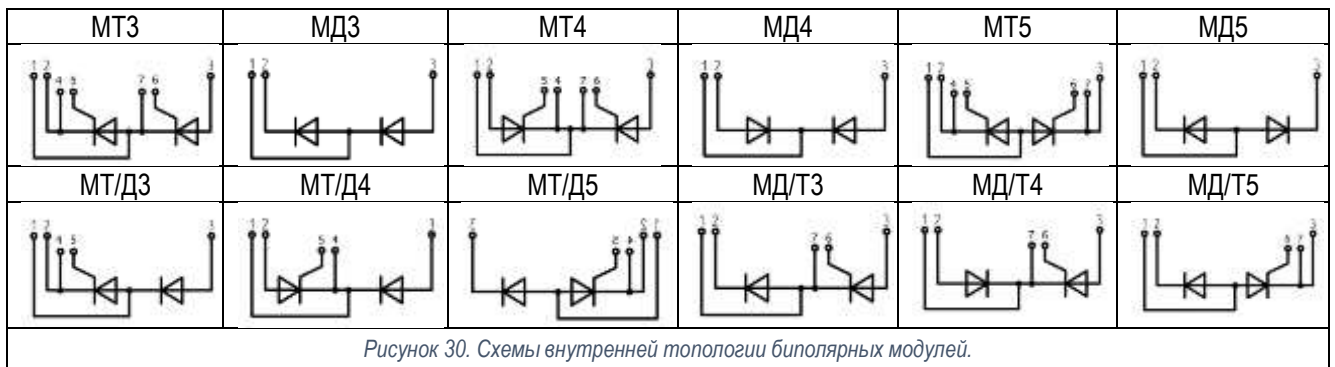
Конкретные обозначения приборов приведены в соответствующих ИЛ.

Для модульных приборов на первой странице ИЛ так же указаны возможные варианты внутренней топологии. Существует 4 основных варианта схем соединений ППЭ в двухпозиционных модулей (A2, C1, D и F) полупроводниковыми элементами, а именно:

- Тиристор-тиристор
- Диод-Диод
- Тиристор-Диод
- Диод-Тиристор

Возможные комбинации тиристорных и диодных элементов представлены на Рисунок 30.

Также в номенклатуре изделий АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» имеются однопозиционные модули E1 и B0.



Ниже приведены условные обозначения классов приборов, а также различных групп параметров (для тиристоров).

Условные обозначения классов приборов:

Класс по напряжению	1	2	3	4	...	15	16	18	...	52	54	56	58	60	65
$U_{DRM}$ $U_{RRM}$ , [В]	100	200	300	400	...	1500	1600	1800	...	5200	5400	5600	5800	6000	6500

Группы по критической скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии ( $du_D/dt$ )<sub>crit</sub>

Обознач. группы	0	P3	E3	A3	P2	K2	E2	A2	T1	P1	M1	K1	H1	E1	C1	B1
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	-	9	-	-	-	-	-
$(du_D/dt)$ <sub>crit</sub> [В/мкс]	Не нормируется	20	50	100	200	320	500	1000	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000

Группы по времени выключения  $t_q$  для низкочастотных тиристоров

Обозначение группы	0	B2	C2	E2	H2	K2	M2	P2	T2	X2	A3	B3
	0	-	-	1	-	-	2	-	3	-	4	-
$t_q$ , мкс	Не нормируется	800	630	500	400	320	250	200	160	125	100	80

Группы по времени выключения  $t_q$  для ТБ, ТБИ и ТБЧ

Обозначение группы	C3	E3	H3	K3	M3	P3	T3	X3	A4	B4	C4	E4
	1	2	3	4	5	6	7	8	-	9	-	-
$t_q$ , мкс	63	50	40	32	25	20	16	12,5	10	8	6,3	5

Группы по времени обратного восстановления ( $t_{rr}$ )

Обозначение группы	0	T3	X3	A4	B4	C4	E4	H4	K4	M4	P4	T4	X4	A5	B5	C5	E5	H5
	0	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	-	7	-	8	-	9
<b>t<sub>rr</sub>, мкс</b>	Не нормируется	16	12,5	10	8	6,3	5	4	3,2	2,5	2	1,6	1,25	1	0,8	0,63	0,5	0,4

Примеры записи условного обозначения тиристора Т143-500 шестнадцатого класса, с критической скоростью нарастания напряжения в закрытом состоянии по 7-ой группе (А2), временем выключения по 3-ей группе (Т2), климатического исполнения УХЛ, категории размещения 2 при заказе и в документации другого изделия:

- Тиристор Т143-500-16-А2Т2-УХЛ2
- Тиристор Т143-500-16-73-УХЛ2

Далее во всех информационных материалах на таблеточные, штыревые или модульные тиристоры и диоды приводятся предельно допустимые значения различных параметров и значения характеристик приборов.

### Предельно допустимые значения параметров

Максимальные значения параметров приборов, указанные в информационных листах, представляют собой предельные значения электрической, тепловой и механической нагрузки, допустимые без риска разрушения. При этом, даже при работе на номинальных параметрах или ниже, любой компонент подвержен эффектам старения. Все значения параметров определяются при строго регламентированных стандартами условиях. Эти условия приведены напротив каждого параметра в колонке «условия измерения». Превышение хотя бы одного значения из раздела предельно допустимых параметров может привести к выходу прибора из строя.

### Характеристики

Раздел характеристик описывает свойства приборов, полученные при определенных условиях. Условия получения характеристик, как правило, зависят от типа прибора. Характеристики приборов приводят в основном при 25°C и при  $T_j = T_{j\_max}$ . Фактические условия измерений указаны в колонке «условия измерения».

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» постоянно ведёт работу над повышением качества своих информационных материалов, выпускает ИЛ на новые приборы, обновляет старые ИЛ, создает расширенные листы с большим набором графиков зависимостей.

## 12. Монтаж

Обязательным условием для долгой и бесперебойной службы приборов является их правильный монтаж. Выполнение всех условий монтажа обеспечивает надежный как электрический, так и тепловой контакт и продлевает срок службы приборов.

### 12.1. Приборы таблеточной конструкции

Для обеспечения гарантии надежности и долговечности рекомендуем использовать для охлаждения приборов таблеточного типа охладители, разработанные и произведенные АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС». Радиаторы учитывают все особенности приборов и могут поставляться совместно с тиристорами или диодами в виде сборок в уже смонтированном виде.

При монтаже приборов, для обеспечения надёжного теплового и электрического контакта необходимо учитывать следующее:

- Контактные поверхности приборов и охладителей, а также изоляционный материал проводов управления, не должны иметь каких-либо повреждений и инородных включений.
- Контактная поверхность охладителя должна иметь:
  - Шероховатость не более 1,6 мкм
  - Отклонение от плоскостности не более 0,03 мм
- При необходимости контактные поверхности охладителей и приборов должны быть отполированы.
- Для избегания появления коррозии покрытие контактных поверхностей не должно быть нарушено. Перед сборкой контактные поверхности должны быть очищены с использованием этанола и мягкой безворсовой ткани. Сборку приборов с охладителем необходимо проводить в чистых условиях. В процессе сборки поверхности приборов и охладителя должны поддерживаться в чистом состоянии. При монтаже приборов не допускается касаться контактных поверхностей голыми руками. Рекомендуется производить монтаж в тканевых перчатках.
- Допускается монтаж и эксплуатация приборов без теплопроводящего материала.
- Контактная поверхность охладителя не должна быть меньше контактной поверхности монтируемого прибора.
- При монтаже приборов необходимо использовать центрирующие штифты. Штифты должны иметь правильные габариты т. к. приборы изготовлены из мягкого материала, слишком длинный штифт в момент затяжки может продавить корпус прибора и разрушить ППЭ внутри.
- Чтобы избежать перекоса прибора и неравномерного распределения прижимного усилия при монтаже (демонтаже), монтажные болты стягивающего устройства должны затягиваться попеременно, крест-накрест, постепенно увеличивая момент затяжки на каждом из них.
- Недостаточное усилие сжатия приборов приводит к увеличению теплового сопротивления и снижению допустимой токовой нагрузки прибора, а также ухудшению стойкости к термоциклированию.
- Усилие сжатия приборов должно находиться в пределах рекомендуемого диапазона усилий, приведенного в ИЛ и паспорте на прибор.
- Высокое усилие сжатия может привести к повреждению металлизации катодного слоя ППЭ, продавливанию области управления или разрушению ППЭ.

- Зажимное устройство, в которое монтируются приборы, должно обеспечивать равномерность распределения монтажного усилия. Неравномерное распределение усилия приводит к деформации корпуса и внутренним напряжениям внутри корпуса, что в итоге вызовет преждевременный отказ.
- Точка приложения прижимного усилия должна находиться по центру прибора, а расстояние от этой точки до контактной поверхности прибора должно обеспечивать равномерное распределение усилия по всей площади контактной поверхности прибора.
- Конструкция зажимного устройства должна выдерживать все уровни усилий, вызванных температурным расширением и сжатием приборов во время термоциклов. Зажимное устройство должно допускать температурное расширение и сжатие приборов без значительного изменения усилия сжатия и его распределения по контактной поверхности СПП.
- Для предотвращения смещения СПП их необходимо полностью сжать до присоединения к ним силовых шин.

Приборы в охладителях принудительного воздушного или водяного охлаждения, допускается монтировать в любом положении при условии того, что объем охлаждающего воздуха или жидкости является достаточным для отведения выделяющего тепла.

При естественном воздушном охлаждении ребра радиатора должны располагаться вертикально, для беспрепятственного прохождения воздуха. Для избежание взаимного нагрева приборов, расположенных рядом, при естественном охлаждении охладители должны располагаться на достаточном расстоянии друг от друга.

Так как охладители находятся под потенциалом, то они должны располагаться на достаточном расстоянии от поверхности земли или другого оборудования или иметь достаточную изоляцию.

Если приборы дополнительно нагреваются другим, установленным рядом оборудованием или компонентами (например, мощными резисторами, трансформаторами или предохранителями), то нагрузка на приборы должна быть снижена в соответствии с температурой.

Если несколько приборов объединены в сборку, то необходимо учитывать следующие моменты:

- При проектировании зажимного устройства, при последовательном соединении приборов может быть достигнуто напряжение, кратное блокирующему напряжению каждого отдельного прибора.
- При проектировании зажимного устройства, при параллельном соединении приборов, для каждого отдельного прибора должно быть спроектировано отдельное зажимное устройство, так как с учетом допусков по высоте приборов, сложно спроектировать единое зажимное устройство, обеспечивающее равномерное распределение усилия.

При подключении силовых шин необходимо учитывать дополнительное тепловое расширение приборов и других компонентов силовой цепи во всем диапазоне температур.

При подключении управляющих проводов клеммы не должны быть повреждены.

Контакты управления должны быть надёжно подключены для предотвращения случайного разъединения цепи управления в следствие, например, вибрационных воздействий.

Провода управления не должны прокладываться вблизи силовой части схемы и должны быть надёжно защищены от воздействия электромагнитных помех.

После окончания монтажа крепёжные детали необходимо дополнительно защитить от коррозии. Для этого подойдут такие антикоррозионные смазки как ЦИАТИМ221 (ГОСТ 9433) или ВНИИ НП-207 (ГОСТ 19774).

Допускается использование тонкого слоя смазки на контактных поверхностях, обеспечивающего долговременную химическую стойкость и уменьшающего коррозионное воздействие окружающей среды, однако такая смазка не должна ухудшать электрический и тепловой контакт.

## 12.2. Приборы штыревой конструкции

При монтаже приборов, для обеспечения надёжного теплового и электрического контакта необходимо учитывать следующее:

- Контактные поверхности приборов и охладителей, а также изоляционный материал проводов управления, не должны иметь каких-либо повреждений и инородных включений.
- Допускается монтаж и эксплуатация приборов без теплопроводящего материала.
- Контактная поверхность охладителя не должна быть меньше контактной поверхности монтируемого прибора.
- Недостаточный крутящий момент приводит к увеличению теплового сопротивления и снижению допустимой токовой нагрузки прибора, а также ухудшению стойкости к термоциклированию.

Дополнительно следует обратить внимание на рекомендации, описанные ниже:

Приборы штыревой конструкции должны монтироваться в охладитель при помощи динамометрического ключа. Диапазон значений крутящего момента для приборов штыревой конструкции указан в ИЛ и паспорте на прибор.

Не допускается монтаж приборов в охладители с отверстиями недостаточной глубины или с повреждённой резьбой. Это может повлечь за собой достижение необходимого крутящего момента без обеспечения полного контакта поверхности прибора и охладителя, что может привести к тепловой перегрузке прибора

Места контакта охладителей и приборов не должны иметь повреждений, следов коррозии или посторонних включений.

Шероховатость контактной поверхности охладителя не должна быть больше 3.2 мкм

Допускается монтаж приборов без применения теплопроводящего материала.

Рекомендации по расположению радиаторов идентичны рекомендациям для таблеточных приборов.

При монтаже нельзя допускать повреждения гибкого силового вывода и его изоляции.

Для фланцевых приборов зажимное устройство должно затягиваться так же, как и для таблеточных. Монтажные болты затягиваются поочередно, крест-накрест, с постепенным увеличением момента затяжки. Прижимное усилие для фланцевых приборов приведено в информационных материалах и паспорте на прибор.

### 12.3. Приборы модульной конструкции

При монтаже приборов, для обеспечения надёжного теплового и электрического контакта необходимо учитывать следующее:

- Контактные поверхности приборов и охладителей, а также изоляционный материал проводов управления, не должны иметь каких-либо повреждений и инородных включений.
- При необходимости контактные поверхности охладителей и приборов должны быть отполированы.
- Для избегания появления коррозии покрытие контактных поверхностей не должно быть нарушено. Перед сборкой контактные поверхности должны быть очищены с использованием этанола и мягкой безворсовой ткани. Сборку приборов с охладителем необходимо проводить в чистых условиях. В процессе сборки поверхности приборов и охладителя должны поддерживаться в чистом состоянии. При монтаже приборов не допускается касаться контактных поверхностей голыми руками. Рекомендуется производить монтаж в тканевых перчатках.

Дополнительно следует обратить внимание на рекомендации, описанные ниже:

Для работы модули должны устанавливаться на охладители или на любые поверхности устройств, способные обеспечивать оптимальный тепловой режим. Контактная поверхность охладителя не должна иметь шероховатость более 10 мкм и отклонение от плоскостности более 50 мкм.

Перед монтажом приборов модульной конструкции на поверхность охладителя или на основание модуля необходимо нанести теплопроводящий материал (Подробная информация про теплопроводящим материалам указана в разделе 14.4 на *стр.72*). Необходимая толщина слоя материала составляет  $75\pm 25$  мкм.

Все крепежные болты должны затягиваться крест-накрест, с постепенным увеличением крутящего момента до необходимого, указанного в ИЛ и паспорте на прибор.

Если несколько модулей соединены последовательно на одном охладителе, общее напряжение может превысить напряжение изоляции прибора. АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» не рекомендует использовать последовательное соединение модулей на одном радиаторе.

При подключении силовых шин, вывода силовых модулей не должны испытывать скручивающей нагрузки или нагрузки на излом.

## 12.4. Бескорпусные приборы

Общие требования по монтажу бескорпусных приборов аналогичны требованиям для таблеточных. Дополнительно следует обратить внимание на рекомендации, описанные ниже:

Допускается покрытие поверхности охладителя тонким слоем «серебро-никель», «чистое серебро», «золото» или «никель». Гальваническое покрытие контактной поверхности охладителя исключает электроэрозию контактных поверхностей и обеспечивает надёжный тепловой контакт.

Так как у бескорпусных приборов нет защищающей их «оболочки» то, при работе с ними, следует соблюдать следующие рекомендации:

- Для защиты приборов от воздействия окружающей среды рекомендуется применять кольцевой уплотнитель вокруг прибора (между поверхностями анодного и катодного охладителей). Кольцевое уплотнение должно быть выполнено из материалов устойчивых к повышенным температурам и воздействиям химических веществ.
- Так же для уменьшения воздействия влияния окружающей среды рекомендуется не извлекать приборы из вакуумной упаковки, до момента их монтажа в оборудование.

Анод бескорпусных приборов не имеет центрирующего отверстия. Центрирование осуществляется по внешним границам или только по катодному центрирующему отверстию.

Бескорпусные диоды восприимчивы к повреждениям, причиненными частицами, например такими как, мелкая стружка, попавшая на поверхность диода во время монтажа. При монтаже диодов необходимо предпринимать меры предосторожности для избегания попадания твердых частиц на контактные поверхность прибора.



## 13. Эксплуатация

### 13.1. Рекомендации по управлению

Тиристор является биполярным полупроводником, который управляется током, поэтому на его управляющий электрод необходимо подать сигнал определенной амплитуды, длительности и полярности. При этом амплитуда и длительность управляющего импульса ограничивается рядом требований. Ниже приведены требования для наиболее распространенных случаев применения тиристора. В случае специального применения рекомендуется обратиться к специалистам АО «ПРОТОН – ЭЛЕКТРОТЕКС» за консультацией.

Типовые формы тока и напряжения цепи управления приведены на *Рисунок 31*.

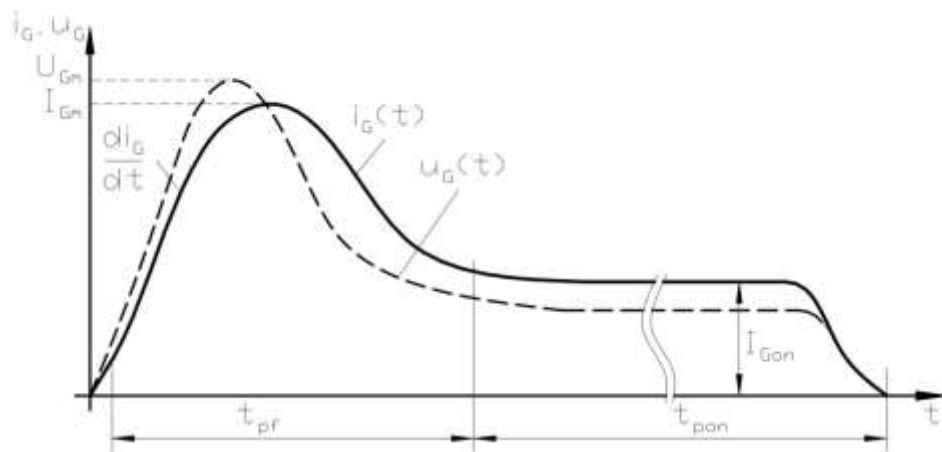


Рисунок 31. Диаграмма тока и напряжения цепи управления.

$I_{Gon}$  – уровень тока подпитки;  $I_{Gon} = (3 \div 5) \cdot I_{GT}$ ;

где  $I_{GT}$  – отпирающий постоянный ток управления (параметр берется для минимальной рабочей температуры, при которой будет эксплуатироваться тиристор).

$I_{GM}$  – амплитуда форсирующего импульса;  $I_{GM} = (10 \div 12) \cdot I_{GT}$

$di_G/dt$  – скорость нарастания тока управления;  $di_G/dt \geq 1$  А/мкс; для значения  $di_G/dt$  ограничений «сверху» не существует.

$t_{pf}$  – длительность форсирующего импульса управления;  $t_{pf} = (2 \div 3) \cdot t_{gd} \approx 10$  мкс  $\div$  20 мкс;

где  $t_{gd}$  – время задержки;

где  $t_{gt}$  – время включения, зависит от схемы включения прибора;

Длительность  $t_{\text{рон}}$  определяется характером нагрузки и условиями функционирования схемы, в которой находится тиристор. Ток за время  $t_{\text{рон}}$  выполняет функции страховки тиристора, если есть вероятность снижения анодного тока до значения тока удержания.

Для минимизации влияния индуктивности проводников управления на скорость нарастания тока управления необходимо, чтобы напряжение холостого хода драйвера управления находилось в пределах  $15 \div 30$  В.

Пиковое обратное напряжение управления для повышения уровня помехоустойчивости тиристора (управляющий электрод отрицателен по отношению к катоду) должно быть менее 5 В.

Рабочая точка нагрузки управляющего электрода должна находиться в зоне оптимального управления, а именно - не должна выходить за кривую, соответствующую максимально допустимой мощности потерь на управляющем электроде при принятой длительности и скважности импульсов управления, и не должна попасть в зону негарантированного включения тиристора. Вольтамперная характеристика управляющего электрода приведена в информационных материалах на соответствующий тиристор.

Запрещается подавать импульсы управления на тиристор если к тиристорному приложено обратное напряжение. Т. к. в этом случае проявляется транзисторный эффект и генерируется дополнительный ток утечки тиристора, чем больше обратное напряжение приложено в этот момент, тем выше ток утечки (может достигать нескольких ампер и более), причем этот ток протекает через область катода, прилегающую к управляющему электроду, т. е. локализован, в результате чего в малом объеме выделяется большая мощность, что может привести к шнурованию тока и пробую.

Провода управления должны быть выполнены в виде витой пары и прокладываться вдали от источников электромагнитных помех. Для уменьшения влияния помех можно увеличить количество скруток проводов витой пары, не только проводов управления тиристора, но и других проводов цепи управляющего электрода. Так же, для уменьшения влияния помех, следует сократить длину проводов управления до минимально необходимой. При прокладывании проводов управления необходимо принимать меры по исключению их контакта с поверхностями, имеющими высокий электрический потенциал.

## 13.2. Последовательное и параллельное соединение

Максимальные значения токов и блокирующих напряжений выпускаемых СПП ограничены, и часто однотипные СПП приходится соединять в группы для увеличения общей мощности. Основные типы соединений при этом следующие:

- Последовательное — используется при необходимости увеличения максимального блокирующего напряжения;
- Параллельное — используется при необходимости увеличения максимального тока;

- Смешанное — параллельное + последовательное.

### Последовательное соединение

При последовательном соединении СПП необходимо стремиться к равному распределению блокирующего (прямого и(или) обратного) напряжения как в стационарном состоянии, так и в динамических режимах, а именно - при включении тиристоров и при восстановлении блокирующих свойств во время выключения тиристора или диода. Причины неравномерного распределения блокирующих напряжений могут быть следующие:

- Различия утечек в последовательно соединенных приборах, вследствие естественного технологического разброса и (или) различных рабочих температур из-за, например, отличающихся условий охлаждения (в среднем изменение температуры на 8°C приводит к изменению утечек в два раза). Перенапряжение возникает на приборах, имеющих меньшее значение тока утечки;
- Разброс времени включения отдельных тиристоров, соединенных последовательно в ветви, ведет к перераспределению напряжения между включившимися ранее и включающимися с запозданием тиристорами. Перенапряжение возникает на тиристорах, включающихся с опозданием;
- Разброс величин заряда обратного восстановления в последовательно соединенных приборах приводит к тому, что в момент восстановления такие приборы принимают обратное напряжение в различное время. Перенапряжение возникает на тиристорах, имеющих меньший заряд обратного восстановления.

Для выравнивания распределения блокирующих напряжений рекомендуется следующее:

- Для снижения влияния неравномерности токов утечки последовательно включенных СПП используют включение шунтирующих высокоомных резисторов параллельно каждому полупроводниковому прибору (диоду или тиристор). Чем выше требование к выравниванию напряжения в этом режиме, тем меньше должны быть значения сопротивления шунтирующих резисторов;
- Для уменьшения неравномерности распределения блокирующих напряжений, которое возникает из-за разброса значений зарядов обратного восстановления СПП, применяются снабберные RC-цепи, включенные параллельно каждому полупроводниковому прибору. Чем больше значение снабберной емкости, включенной параллельно прибору, тем меньше неравномерности распределения блокирующих напряжений. Однако увеличение емкости — это не всегда рациональный способ, поэтому необходимо подбирать приборы для последовательного соединения по заряду обратного восстановления. Как правило, разброс зарядов принимают равным не более 5% или 10%.
- Для уменьшения разброса времени включения СПП применяют мощные импульсы управления с крутым фронтом, что приводит к уменьшению времени задержки включения тиристора и минимизации влияния этого эффекта на распределение напряжения. Наличие снабберных RC-цепей параллельно каждому прибору оказывает положительное воздействие, так как до момента включения к тиристорам прикладывалось некоторое прямое напряжение, до которого также были заряжены снабберные конденсаторы. Это напряжение в первый момент времени после включения тиристора прикладывается к нему и обеспечивает равномерность распределения напряжения.

### Параллельное соединение

При параллельном соединении силовых полупроводниковых приборов, главной задачей становится равномерное распределение тока нагрузки по приборам, для этого необходимо учитывать следующие требования:

- Средний ток наиболее нагруженного СПП не должен превышать допустимого для него значения  $I_{TAV/FAV}$
- В режиме протекания аварийного тока распределение нагрузок должно быть таким, чтобы протекающий через любой СПП ток не превосходил допустимого значения  $I_{TSM/FSM}$
- При обрыве цепи или отключении одного или нескольких СПП в цепи распределение тока между оставшимися в работе приборами не должно существенно нарушаться.

Для решения поставленных задач необходимо обеспечить идентичность условий работы СПП и малый разброс элементов кусочно-линейной аппроксимации ВАХ, учитывая технологический разброс параметров. Для решения этой задачи необходимо соблюдать следующие рекомендации:

- Последовательно с каждым полупроводниковым прибором устанавливать индуктивные или омические делители тока;
- Осуществлять подбор полупроводниковых приборов по статическим потерям в рабочей точке (по значению  $U_{TM/FM}$  на рабочем токе). Следует заметить, что всегда существует определенный технологический разброс параметров СПП.
- Выбирать рабочие токи, находящиеся выше точки инверсии вольтамперной характеристики СПП. В этом случае выравнивание токов в параллельных ветвях будет происходить автоматически, так как в области ВАХ, лежащей выше точки инверсии, действует отрицательная обратная связь, то есть при увеличении температуры р-п перехода увеличивается его сопротивление и уменьшается прямой ток, что приводит к снижению температуры р-п переход (Рисунок 32);

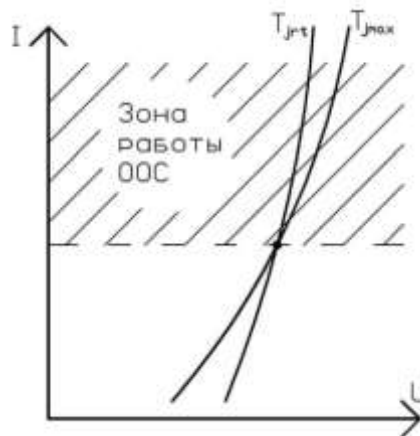


Рисунок 32. Точка температурной инверсии и зона работы с отрицательной обратной связью.

- Применять мощные импульсы управления с крутым фронтом, что приводит к уменьшению времени задержки включения тиристора и минимизации влияния этого эффекта на распределение тока по параллельным ветвям в первоначальный момент времени;
- В схемах, где применяются мощные высоковольтные тиристоры, тиристоры, выполненные на кристаллах больших диаметров (более 56 мм), а также при наличии больших индуктивностей в силовой части, которые ограничивают скорость изменения силового тока, необходимо дополнительно учитывать время распространения включенного состояния тиристора. Это связано

с тем, что мощные тиристоры в первоначальный момент времени включаются в ограниченной области вблизи управляющего электрода, после этого за ограниченное время происходит продольное распространение включенного состояния;

- Конструктивное расположение параллельных ветвей должно обеспечивать равенство сопротивлений токоведущих шин, включая предохранители;
- Для всех приборов, входящих в параллельное соединение, условия охлаждения должны быть одинаковы.

## 14. Охлаждение

### 14.1. Общие технические требования к охладителям

Общие требования к охладителям определяются прежде всего технико-экономическими параметрами СПП и преобразователями на их основе, т. е. количеством тепла, выделяемого прибором, его типом, конструктивными особенностями СПП и преобразователя, условиями, в которых предполагается эксплуатация, технологическими особенностями производства. Исходя из всего вышеперечисленного можно заключить, что общим техническим требованием к охладителю будет его способность обеспечивать нормальный тепловой режим работы приборов в заданных условиях при минимальных затратах материала, энергии и средств.

Для обеспечения всего вышеперечисленного требуются:

- Оптимизировать массогабаритные и стоимостные параметры охладителей при заданных значениях параметров.
- Стабилизировать тепловые контактные сопротивления СПП-охладитель ( $R_{th(c-h)}$ ), что достигается, в первую очередь, качеством обработки контактных поверхностей.

Рабочие контактные поверхности охладителей должны обеспечивать надёжный контакт металл-металл, что в свою очередь обеспечивает хорошие тепло- и электропроводящие условия в течение всего жизненного цикла оборудования. Так же охладители должны выдерживать термоциклические нагрузки и воздействия окружающей среды.

АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» рекомендует применять охладители с серебряным или никелевым покрытием. Не рекомендуется использовать медные или алюминиевые охладители без защитных покрытий так как в результате коррозии при протекании тока контактные поверхности могут быстро разрушаться.

Существует несколько типов охладителей основные из которых – это воздушные и жидкостные. В качестве стандартных охладителей АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» выпускает воздушные.

## 14.2. Воздушное охлаждение

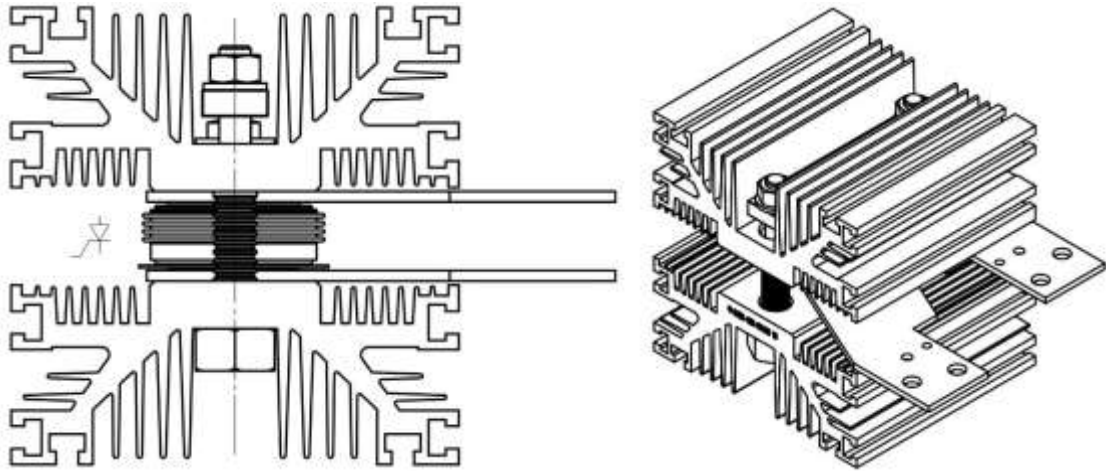


Рисунок 33. Пример сборки таблеточного тиристора с охладителем.

Для воздушного охлаждения силовых полупроводниковых приборов чаще всего применяются алюминиевые охладители, реже медные, с ребристой поверхностью (Рисунок 33). Оребрение охладителя значительно увеличивает площадь его поверхности, тем самым увеличивая площадь конвекции и теплового излучения, распределяя тепловой поток и ослабляя переходные тепловые процессы.

Воздушное охлаждение можно разделить на два типа: естественное (конвекционное) и принудительное.

Классические ребристые охладители подходят как для охлаждения путём конвекции (отведения тепловой энергии естественными воздушными потоками за счёт подъёма нагретого воздуха), так и для принудительного воздушного охлаждения (движение воздуха обеспечивается за счёт вентилятора). Конкретный тип охладителя может быть разработан и оптимизирован для определённого типа воздушного охлаждения.

В охладителях, предназначенных для конвекционного воздушного охлаждения, рёбра должны быть как можно выше. Это увеличивает площадь поверхности, с которой отводится тепло. При этом расстояние между рёбрами не должно препятствовать естественной циркуляции воздушного потока между ними.

Если охладители расположены вертикально, один над одним, то при естественном охлаждении необходимо учитывать, что до охладителей, расположенных выше остальных, воздух будет подходить уже подогретым. В таком случае рекомендуется установка охладителей под углом около  $30^\circ$ , чтобы отвести воздушный поток в сторону.

Для рассеивания большого количества тепловой энергии применяется принудительное воздушное охлаждение. При принудительном воздушном охлаждении, проходя через охладитель, воздух нагревается меньше. В этом случае воздушный поток может циркулировать через несколько вертикально расположенных охладителей, не снижая своей эффективности. Однако, большое число охладителей,

создает значительное сопротивление воздушному потоку, что снижает эффективность вентилятора. Значение теплового сопротивления  $R_{th(h-a)}$  сильно зависит от скорости воздуха, прокачиваемого через охладитель.

Проходя через ребра охладителя, поток воздуха становится турбулентным, что повышает эффективность переноса тепла от ребер к воздушному потоку

Радиатор охладителя условно можно разделить на две части:

- Основание радиатора, на которое происходит монтаж прибора и где происходит распределение тепловой энергии.
- Оребрение радиатора, от которого происходит основной отвод тепла при помощи излучения и конвекции.

Так как тепловое сопротивление охладителя зависит от разности температур между температурой самого охладителя и температурой окружающей среды, поэтому его значение не является постоянным. При увеличении рассеиваемой мощности происходит «лучший» нагрев охладителя тем самым увеличивается эффективная площадь теплообмена.

Для большинства таблеточных и штыревых приборов в номенклатуре АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» имеются стандартные охладители для воздушных систем охлаждения собственного производства, которые удовлетворяют всем вышеперечисленным требованиям.

### 14.3. Жидкостное охлаждение

Жидкостное охлаждение СПП применяется в случаях, когда принудительного воздушного охлаждения уже недостаточно. Жидкостное охлаждение позволяет отвести большее количество тепловой энергии от приборов чем воздушное. Как правило, в системах с жидкостным охлаждением, теплоносителем является вода или смесь воды и антифриза (прим. этиленгликоль), в более редких случаях — масло.

При использовании жидкостных охладителей необходимо обеспечивать однородность контактной поверхности прибора. Единичного водяного канала, проходящего через центр охладителя, может оказаться недостаточно для оборудования с большой выделяемой мощностью, также как и использования простого прямого пути охлаждения с ламинарным потоком. Использование охладителей с водяными каналами, создающими турбулентность предпочтительнее.

Для предотвращения накопления отложений в каналах жидкостного охладителя необходимо применять дистиллированную или деионизированную воду. Это позволит продлить срок службы охладителя. Также такая вода имеет высокое омическое сопротивление и снижает паразитные токи утечки.

Дополнительно, для избегания электрохимической коррозии в системе жидкостного охлаждения возможно установить жертвенный анод, который будет окисляться вместо охладителя. Такой электрод должен заменяться спустя определенное время.



Охладители должны выдерживать прилагаемое к приборам номинальное механическое усилие без деформации.

## 14.4. Теплопроводящие материалы

Теплопроводящие материалы (ТИМ), как правило, применяются для модулей, которые имеют изолированное основание. Если предполагается применение ТИМ для прижимного прибора (например, таблеточного тиристора), то такой материал должен быть электропроводящим. В противном случае лучше отказаться от использования ТИМ т. к. это не всегда приводит к улучшению тепловых характеристик системы СПП-охладитель.

Количество тепла, которое способна отвести от себя система СПП-охладитель, определяется ее общим тепловым сопротивлением. Значительный вклад в это сопротивление вносит материал термоинтерфейса, нанесенного между основанием модуля и охладителем. У любого материала, применяемого в качестве термоинтерфейса, собственное тепловое сопротивление  $R_{th}$  выше, чем у алюминия или меди, из которых изготавливаются охладитель и основание модуля. ТИМ компенсирует неровности, каверны и пустоты, вызванные неидеальностью совмещаемых поверхностей. Воздух, заполняющий эти неровности, препятствует нормальной теплопередаче, так как обладает низкой теплопроводностью.

В настоящее время существует множество разновидностей теплопроводящих материалов, среди которых можно выделить несколько основных, наиболее часто применяемых видов:

- Теплопроводящие пасты
- Теплопроводящие прокладки
- PCM (Phase-Change Material) материал с изменяющимся фазовым состоянием

При нанесении теплопроводящей пасты к ней можно сформировать следующие, общие требования:

- Термопаста не должна иметь в себе твердых включений.
- Термопаста должна сохранять свои свойства все время эксплуатации прибора;
- Максимальная температура пасты должна быть не ниже максимальной температуры прибора под нагрузкой (запас по температуре минимум 10%);

Перед нанесением термопасты поверхности прибора и радиатора необходимо очистить и обезжирить. Для очистки рекомендуется использовать безворсовую ткань и все работы проводить в перчатках. Следует избегать попадания пасты в резьбовые отверстия, поскольку это может привести к недостаточному моменту затяжки.

Толщину слоя пасты можно проконтролировать при помощи специального гребешка ("Wet film comb", см. Рисунок 34). Толщина пасты определяется как среднее между значением наибольшего «покрытого» (или «мокрого») зубца и значением наименьшего «непокрытого» (или «сухого») зубца.



Рисунок 34. Гребешок для измерения толщины теплопроводящей пасты.

Рекомендуется проводить замену силиконовой теплопроводящей пасты при каждом обслуживании приборов.

Для применения теплопроводящих подложек, в том числе и графитовых, никаких особых рекомендаций не требуется.

При применении РСМ в качестве теплопроводящего материала необходимо дать материалу равномерно распределиться между контактной поверхностью прибора и охладителем, поэтому не рекомендуется проводить первый запуск установки на номинальную мощность. При этом температура основания модуля должна быть выше температуры фазового перехода материала (как правило 45°C). После распределения материала (2-3 термоцикла) можно запускать установку на номинальную мощность.

## 15. Хранение и транспортировка

Все приборы производства АО «ПРОТОН-ЭЛЕКТРОТЕКС» поставляются в двух типах тары – внешней (транспортной) и внутренней. Транспортная тара соответствует российским стандартам ГОСТ 20859.1 и ГОСТ 23216.



Рисунок 35. Картонная транспортная тара с упакованной в нее внутренней тарой приборами

Во внутренней упаковке расположены картонные вкладыши, которые фиксируют приборы и предотвращают повреждения при транспортировке.



Рисунок 36. Модули во внутренней таре

Внутри упаковки таблеточных тиристоров больших диаметров находится пластиковое кольцо (Рисунок 37), предотвращающее вращение прибора внутри тары при воздействии вибраций в процессе транспортировки.



Рисунок 37. Таблеточный тиристор во внутренней таре.

Допускается транспортировка приборов всеми видами транспорта (наземным, воздушным, морским), условиях по группе хранения 4(Ж2) (по российскому стандарту ГОСТ 15150). Если по каким-то причинам приборы необходимо транспортировать без упаковочной тары, то следует соблюдать следующие требования:

- Не допускать попадания прямых солнечных лучей.
- Не допускать попадания атмосферных осадков, ветра, песка или пыли.
- Не допускать образования конденсата.

Производитель не несет ответственности при повреждении приборов при их транспортировке без транспортировочной тары.

При транспортировке нельзя допускать снижение температуры окружающей среды ниже минимально допустимой температуры хранения приборов, указанной в информационных материалах на соответствующий тип прибора (например, при транспортировке в негерметичных отсеках самолётов). Для большинства приборов нижний порог температуры хранения равен  $-60^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}\text{C}$  для приборов модульной конструкции). Более подробную информацию необходимо уточнять в ИЛ или паспорт на конкретный тип прибора.

Вся упаковка проходит испытания на воздействия вибрационных и ударных нагрузок при транспортировке по российским стандартам:

- ГОСТ 23216 (условия транспортирования Ж)

75g – 2000 ударов, 15g – 20000 ударов, 10g – 88000 ударов

- ГОСТ 20.57.406 метод 103-1.6 (без электрической нагрузки)

Частота –  $f = (50 \pm 2)$  Гц

Ускорение –  $a = 50 \text{ м/с}^2$  (5g) для испытаний в двух взаимноперпендикулярных направлениях и  $a = 100 \text{ м/с}^2$  (10g) для испытаний в трёх взаимноперпендикулярных направлениях

Суммарное время испытаний 6 часов – по 2 и 3 часа для двух и трёх направлений соответственно.

- ГОСТ 18425

Хранение приборов осуществляется в рамках требований, описанных в ГОСТ 15150 (группа 4 (Ж2)). Группа 4 (Ж2) допускает хранение приборов в навесах или помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе (например, в палатках, металлических хранилищах без теплоизоляции и т. п.), расположенных в макроклиматических районах с умеренным и холодным климатом в атмосфере первого типа.

На период длительного хранения приборы должны быть упакованы во внутреннюю упаковку и транспортную тару. Если по каким-то причинам невозможно хранить приборы в упаковочной таре, в которой они поставляются, то необходимо соблюдать те же требования, как и при транспортировке приборов без упаковочной тары.

В процессе хранения допускается увеличение значений повторяющегося импульсного тока в закрытом состоянии и повторяющегося импульсного обратного тока на 50%, импульсного напряжения в открытом состоянии — на 20%.

Лист регистрации изменений

Инициатор изменений	Контекст вносимых изменений	№ Версии	Дата
Болдырев А. Ю.	Вводится впервые	1	23.12.2020