

Лекция 4 Курса «Силовая электроника».
Двадненко В.Я.

Тиристоры

Тиристор — полупроводниковый прибор, выполненный на основе монокристалла полупроводника с тремя или более p-n-переходами и имеющий два устойчивых состояния:

- «закрытое» состояние — состояние низкой проводимости;
- «открытое» состояние — состояние высокой проводимости.

Основное применение **тринисторов** (тиристоров с тремя электрическими выводами — анодом, катодом и управляющим электродом) — управление мощной нагрузкой с помощью слабого сигнала, подаваемого на управляющий электрод.

В двухвыводных приборах — **динисторах**, переход прибора в проводящее состояние происходит, если напряжение между его анодом и катодом превысит напряжение открывания.

Тиристор можно рассматривать как электронный выключатель (ключ). Также тиристоры применяются в ключевых устройствах, например, силового электропривода.

Существуют различные виды тиристоров, которые подразделяются, главным образом:

- по способу управления;
- по проводимости:
 - тиристоры, проводящие ток в одном направлении (тринистор);
 - тиристоры, проводящие ток в двух направлениях (например, симисторы — симметричные динисторы).

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) тиристора нелинейна и показывает, что сопротивление тиристора отрицательное дифференциальное. По сравнению, например, с транзисторными ключами, управление тиристором имеет некоторые особенности. Переход тиристора из одного состояния в другое в электрической цепи происходит скачком (лавиннообразно) и осуществляется внешним воздействием на прибор: либо напряжением (током), либо светом (для фототиристора). После перехода тиристора в открытое состояние он остаётся в этом состоянии даже после прекращения управляющего сигнала. Тиристор остаётся в открытом состоянии до тех пор, пока протекающий через него ток превышает некоторую величину, называемую током удержания.

□

Устройство и основные виды тиристоров

Устройство тиристоров показано на рис. 1. Тиристор состоит из четырёх полупроводников (слоёв), соединённых последовательно и отличающихся типами проводимости: $p-n-p-n$. $p-n$ -переходы между проводниками на рисунке обозначены как «J1», «J2» и «J3». Контакт к внешнему p -слою называется анодом, к внешнему n -слою — катодом. В общем случае $p-n-p-n$ -прибор может иметь до двух управляющих электродов (баз), присоединённых к внутренним слоям. Подачей сигнала на управляющий электрод производится управление тиристором (изменение его состояния).

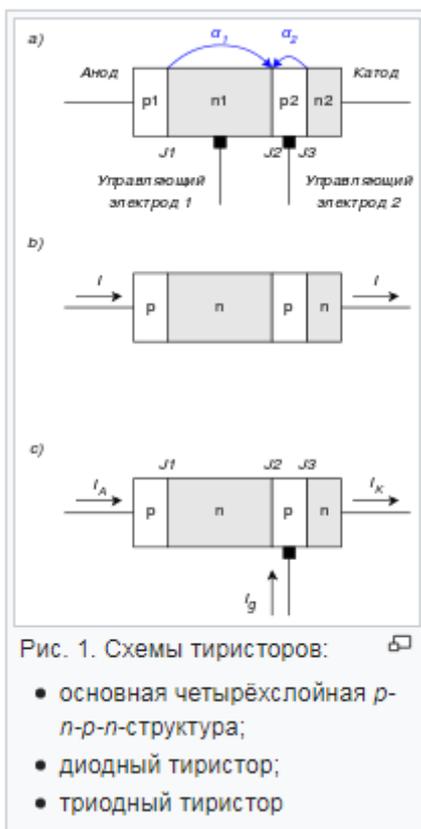


Рис. 1. Схемы тиристоров:

- основная четырёхслойная $p-n-p-n$ -структура;
- диодный тиристор;
- триодный тиристор

Прибор, не содержащий управляющих электродов, называется *диодным тиристором* или *динистором*. Такие приборы управляются напряжением, приложенным между основными электродами.

Прибор, содержащий один управляющий электрод, называют *триодным тиристором* или *тринистором*^[1] (иногда просто *тиристором*, хотя это не совсем правильно). В зависимости от того, к какому слою полупроводника подключён управляющий электрод, тринисторы бывают управляемыми по аноду и по катоду. Наиболее распространены последние.

Описанные выше приборы бывают двух разновидностей: пропускающие ток в одном направлении (от анода к катоду) и пропускающие ток в обоих направлениях. У последних ВАХ симметрична, поэтому соответствующие приборы

называются *симметричными*. Симметричные приборы изготавливаются из пяти слоёв полупроводников. *Симметричный триистор* называется также *симистором* или *триаком* (от *англ. triac*). Следует заметить, что вместо *симметричных динисторов*, часто применяются их схемотехнические аналоги^[2], в том числе и интегральные, обладающие обычно лучшими параметрами.

Тиристоры, имеющие управляющий электрод, делятся на запираемые и незапираемые. Незапираемые тиристоры не могут быть переведены в закрытое состояние (что отражено в их названии) с помощью сигнала, подаваемого на управляющий электрод. Такие тиристоры закрываются, когда протекающий через них ток становится меньше тока удержания. На практике это обычно происходит в конце полуволны сетевого напряжения.

Вольт-амперная характеристика тиристора

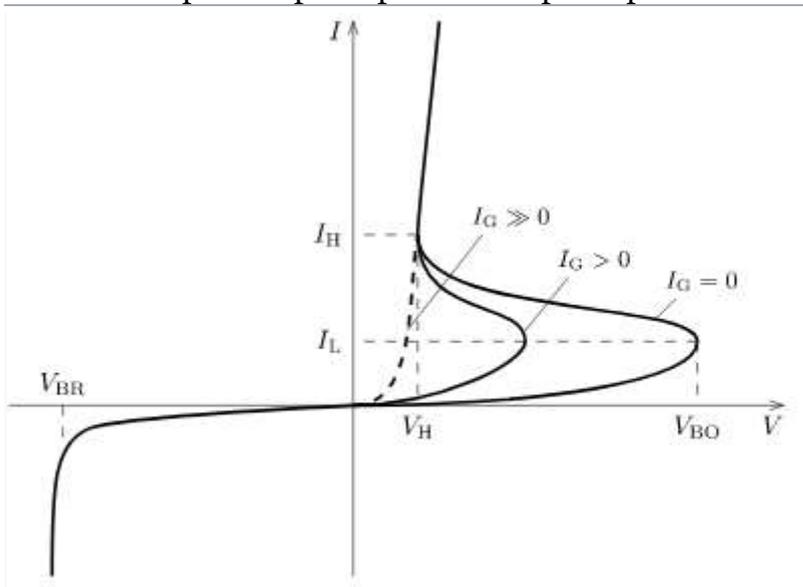


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тиристора

Типичная ВАХ тиристора, проводящего в одном направлении (с управляющими электродами или без них), приведена на рис. 2. Описание ВАХ:

- кривая ВАХ на участке, ограниченном прямоугольником с координатами вершин $(0;0)$ и $(V_{BO};I_L)$ (нижняя ветвь), соответствует высокому сопротивлению прибора (прямому запираению прибора);
- точка $(V_{BO};I_L)$ соответствует моменту включения тиристора (переключению динистора во включённое состояние);
- кривая ВАХ на участке, ограниченном прямоугольником с координатами вершин $(V_{BO};I_L)$ и $(V_H;I_H)$, соответствует переключению прибора во включённое состояние (неустойчивая область). Судя по тому, что кривая имеет S-образную форму, можно сделать вывод о том, что сопротивление тиристора отрицательное дифференциальное. Когда разность потенциалов между анодом и катодом тиристора прямой полярности превысит величину V_{BO} , произойдёт отпирание тиристора (динисторный эффект);
- кривая ВАХ от точки с координатами $(V_H;I_H)$ и выше соответствует открытому состоянию прибора (прямой проводимости);
- на графике показаны ВАХ с разными токами управления I_G (токами на управляющем электроде тиристора): $I_G=0$; $I_G>0$; $I_G>>0$. Чем больше ток I_G , тем

при меньшем напряжении V_{BO} происходит переключение тиристора в проводящее состояние;

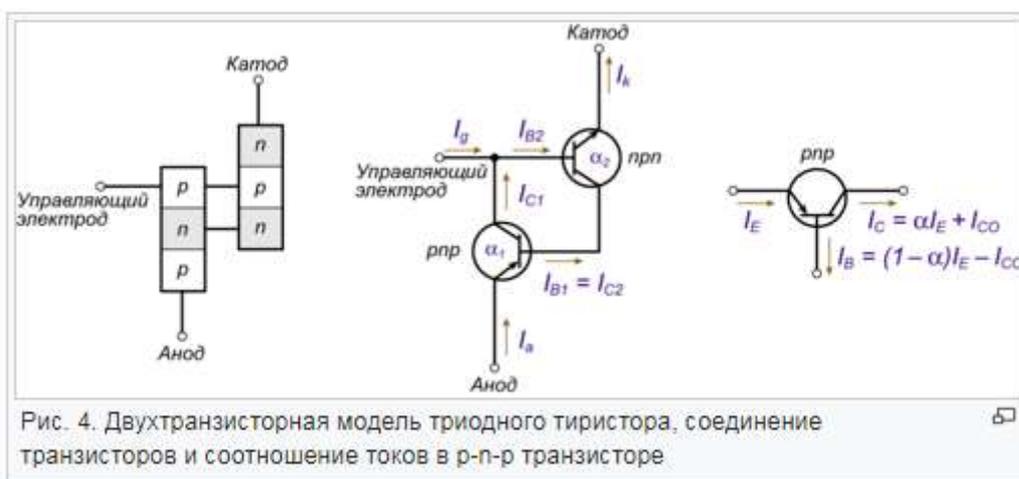
- пунктиром обозначена кривая ВАХ, соответствующая протеканию в цепи тока $I_G \gg 0$ — так называемого «тока включения спрямления». При таком токе тиристор переходит в проводящее состояние при минимальной разности потенциалов между анодом и катодом. Для перевода тиристора в непроводящее состояние необходимо снизить ток в цепи анод-катод ниже тока включения спрямления;
- кривая ВАХ на участке от V_{BR} до 0 соответствует режиму обратного запираания прибора;
- кривая ВАХ на участке от $-\infty$ до V_{BR} соответствует режиму обратного пробоя.

Вольтамперная характеристика симметричных тиристорov отличается от приведённой на рис. 2 тем, что кривая в третьей четверти графика (слева внизу) повторяет участки из первой четверти (справа вверху) симметрично относительно начала координат (см. ВАХ симистора).

По типу нелинейности ВАХ тиристор относят к S-приборам.

Двухтранзисторная модель тиристора

Для объяснения характеристик прибора в режиме прямого запираания используется двухтранзисторная модель. Тиристор можно рассматривать как соединение p-n-p транзистора с n-p-n транзистором, причём коллектор каждого из них соединён с базой другого, как показано на рис. 4 для триодного тиристора.



Классификация тиристорov

По проводимости и количеству выводов^{[3][4][5]}:

- тиристор диодный (доп. название «динистор») — тиристор, имеющий два вывода:
 - тиристор диодный, не проводящий в обратном направлении;
 - тиристор диодный, проводящий в обратном направлении;
 - тиристор диодный симметричный (англ. *en:DIAC*);
- тиристор триодный (доп. название «тринистор») — тиристор, имеющий три вывода:

- тиристор триодный, не проводящий в обратном направлении (доп. название «тиристор»);
- тиристор триодный, проводящий в обратном направлении (доп. название «тиристор-диод»);
- тиристор триодный симметричный (иначе, отечественное название — «симистор», англ. *en:TRIAC*^[6]);
- тиристор триодный асимметричный;
- запираемый тиристор (доп. название «тиристор триодный выключаемый»).

Ранее тиристоры назывались «управляемыми диодами».

Отличие динистора от тринистора

Принципиальных различий между динистором и тринистором нет, однако если открытие динистора происходит при достижении между выводами анода и катода определённого напряжения, зависящего от типа данного динистора, то в тринисторе напряжение открытия может быть специально снижено, путём подачи импульса тока определённой длительности и величины на его управляющий электрод при положительной разности потенциалов между анодом и катодом, и конструктивно тринистор отличается только наличием управляющего электрода. Тринисторы являются наиболее распространёнными приборами из «тиристорного» семейства.

Отличие тиристора триодного от запираемого тиристора

Переключение в закрытое состояние обычных тиристоров производят либо снижением тока через тиристор до значения I_h , либо изменением полярности напряжения между катодом и анодом.

Запираемые тиристоры, в отличие от обычных тиристоров, под воздействием тока управляющего электрода могут переходить из закрытого состояния в открытое состояние, и наоборот. Чтобы закрыть запираемый тиристор, необходимо через управляющий электрод пропустить ток противоположной полярности, чем полярность, которая вызывала его открытие.

Симистор

Симистор (симметричный тиристор) представляет собой полупроводниковый прибор, по своей структуре является аналогом встречно-параллельного включения двух тиристоров. Способен пропускать электрический ток в обоих направлениях.

Характеристики тиристоров

Современные тиристоры изготовляют на токи от 1 мА до 10 кА; на напряжения от нескольких В до нескольких кВ; скорость нарастания в них прямого тока достигает 10^9 А/с, напряжения — 10^9 В/с, время включения составляет величины от нескольких десятых долей до нескольких десятков мкс, время выключения — от нескольких единиц до нескольких сотен мкс; КПД достигает 99 %. К распространённым отечественным тиристорам можно отнести приборы КУ202 (25-400 В, ток 10 А), к импортным — MCR100 (100-600 В, 0,8 А), 2N5064 (200 В, 0,5 А), С106D (400 В, 4 А), ТУН612 (600 В, 12 А), ВТ151 (800 В, 7,5-12 А) и другие. Также следует помнить, что не все тиристоры допускают приложение обратного напряжения, сравнимого с

допустимым прямым напряжением. Управляемая мощность через тиристор может достигать вплоть до 100 МВт.

Применение

Тиристоры применяются в составе следующих устройств:

- электронные ключи;
- управляемые выпрямители;
- преобразователи (инверторы);
- регуляторы мощности (диммеры);
- электронное зажигание.

Принцип действия тиристора

Тиристор является силовым электронным не полностью управляемым ключом. Поэтому иногда в технической литературе его называют однооперационным тиристором, который может сигналом управления переводиться только в проводящее состояние, т. е. включаться. Для его выключения (при работе на постоянном токе) необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие спадание прямого тока до нуля.

Тиристорный ключ может проводить ток только в одном направлении, а в закрытом состоянии способен выдержать как прямое, так и обратное напряжение.

Тиристор имеет четырехслойную p-n-p-n-структуру с тремя выводами: анод (A), катод (C) и управляющий электрод (G), что отражено на рис. 5

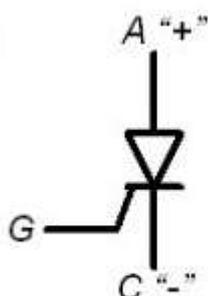


Рис. 5 Обычный тиристор



Тиристоры являются наиболее мощными электронными ключами, способными коммутировать цепи с напряжением до 5 кВ и токами до 5 кА при частоте не более 1 кГц.

Конструктивное исполнение тиристорov приведено на рис. 6.

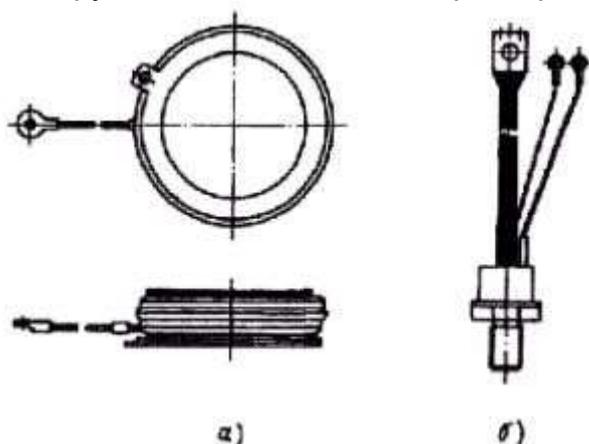


Рис.6. Конструкция корпусов тиристорov: а) – таблеточная; б) – штыревая

Тиристор в цепи постоянного тока

Включение обычного тиристора осуществляется подачей импульса тока в цепь управления положительной, относительно катода, полярности. На длительность переходного процесса при включении значительное влияние оказывают характер нагрузки (активный, индуктивный и пр.), амплитуда и скорость нарастания импульса тока управления i_G , температура полупроводниковой структуры тиристора, приложенное напряжение и ток нагрузки. В цепи, содержащей тиристор, не должно возникать недопустимых значений скорости нарастания прямого напряжения du_{AC}/dt , при которых может произойти самопроизвольное включение тиристора при отсутствии сигнала управления i_G и скорости нарастания тока di_A/dt . В то же время крутизна сигнала управления должна быть высокой.

Среди способов выключения тиристорov принято различать естественное выключение (или естественную коммутацию) и принудительное (или искусственную коммутацию). **Естественная коммутация происходит при работе тиристорov в цепях переменного тока в момент спада тока до нуля.**

Способы принудительной коммутации весьма разнообразны. Наиболее характерны из них следующие: подключение предварительно заряженного конденсатора C ключом S (рис 7, а); подключение LC-цепи с предварительно заряженным конденсатором CK (рис 7 б); использование колебательного характера переходного процесса в цепи нагрузки (рис 7, в).

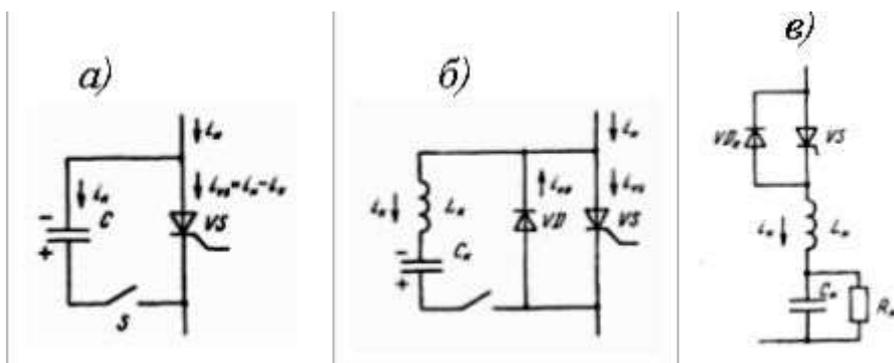


Рис. 7. Способы искусственной коммутации тиристоров: а) – посредством заряженного конденсатора С; б) – посредством колебательного разряда LC-контура; в) – за счёт колебательного характера нагрузки

При коммутации по схеме на рис. 3,а подключение коммутирующего конденсатора с обратной полярностью, например другим вспомогательным тиристором, вызовет его разряд на проводящий основной тиристор. Так как разрядный ток конденсатора направлен встречно прямому току тиристора, последний снижается до нуля и тиристор выключится.

В схеме на рис. 3,б подключение LC-контура вызывает колебательный разряд коммутирующего конденсатора C_k . При этом в начале разрядный ток протекает через тиристор встречно его прямому току, когда они становятся равными, тиристор выключается. Далее ток LC-контура переходит из тиристора VS в диод VD. Пока через диод VD протекает ток контура, к тиристоры VS будет приложено обратное напряжение, равное падению напряжения на открытом диоде.

В схеме на рис. 3,в включение тиристора VS на комплексную RLC-нагрузку вызовет переходный процесс. При определенных параметрах нагрузки этот процесс может иметь колебательный характер с изменением полярности тока нагрузки i_n . В этом случае после выключения тиристора VS происходит включение диода VD, который начинает проводить ток противоположной полярности. Иногда этот способ коммутации называется квазиестественным, так как он связан с изменением полярности тока нагрузки.

Тиристор в цепи переменного тока

При включении тиристора в цепь переменного тока возможно осуществление следующих операций:

- включение и отключение электрической цепи с активной и активно-реактивной нагрузкой;
- изменение среднего и действующего значений тока через нагрузку за счёт того, что имеется возможность регулировать момент подачи сигнала управления.

Так как тиристорный ключ способен проводить электрический ток только в одном направлении, то для использования тиристоров на переменном токе применяется их встречно-параллельное включение (рис. 8,а).

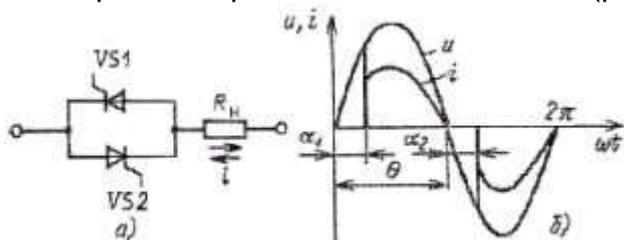


Рис. 8. Встречно-параллельное включение тиристоров (а) и форма тока при активной нагрузке (б)

Среднее и действующее значения тока варьируются за счёт изменения момента подачи на тиристоры VS1 и VS2 открывающих сигналов, т.е. за счёт изменения угла α и (рис. 8,б). Значения этого угла для тиристоров VS1 и VS2 при регулировании изменяется одновременно при помощи системы управления. Угол называется углом управления или углом отпирания тиристора.

Наиболее широкое применение в силовых электронных аппаратах получили **фазовое** (рис. 9,а,б) и **широтно-импульсное управление тиристорами** (рис. 4,в).

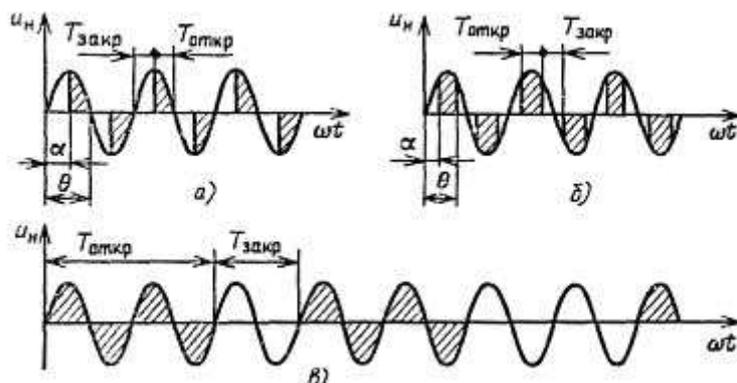


Рис. 9. Вид напряжения на нагрузке при: а) – фазовом управлении тиристором; б) – фазовом управлении тиристором с принудительной коммутацией; в) – широтно-импульсном управлении тиристором

При фазовом методе управления тиристором с принудительной коммутацией регулирование тока нагрузки возможно как за счёт изменения угла α , так и угла β . Искусственная коммутация осуществляется с помощью специальных узлов или при использовании полностью управляемых (запираемых) тиристоров.

При широтно-импульсном управлении (широтно-импульсной модуляции – ШИМ) в течение времени $T_{откр}$ на тиристоры подан управляющий сигнал, они открыты и к нагрузке приложено напряжение U_n . В течение времени $T_{закр}$ управляющий сигнал отсутствует и тиристоры находятся в непроводящем состоянии. Действующее значение тока в нагрузке

$$I = I_{н.м.} \frac{T_{откр}}{T_{откр} + T_{закр}},$$

где $I_{н.м.}$ – ток нагрузки при $T_{закр} = 0$.

Кривая тока в нагрузке при фазовом управлении тиристорами несинусоидальна, что вызывает искажение формы напряжения питающей сети и нарушения в работе потребителей, чувствительных к высокочастотным помехам – возникает так называемая электромагнитная несовместимость.

Запираемые тиристоры

Тиристоры являются наиболее мощными электронными ключами, используемыми для коммутации высоковольтных и сильноточных (сильноточковых) цепей. Однако они имеют существенный недостаток – неполную управляемость, которая проявляется в том, что для их выключения необходимо создать условия снижения прямого тока до нуля. Это во многих случаях ограничивает и усложняет использование тиристоров.



Для устранения этого недостатка разработаны тиристоры, запираемые сигналом по управляющему электроду G. Такие тиристоры называют запираемыми (GTO – Gate turn-off thyristor) или двухоперационными.

Запираемые тиристоры (ЗТ) имеют четырехслойную p-p-p-p структуру, но в то же время обладают рядом существенных конструктивных особенностей, придающих им принципиально отличное от традиционных тиристоров – свойство полной управляемости. Статическая ВАХ запираемых тиристоров в прямом направлении идентична ВАХ обычных тиристоров. Однако блокировать большие обратные напряжения запираемый тиристор обычно не способен и часто соединяется со встречно-параллельно включенным диодом. Кроме того, для запираемых тиристоров характерны значительные падения прямого напряжения. Для выключения запираемого тиристора необходимо подать в цепь управляющего электрода мощный импульс отрицательного тока (примерно 1:5 по отношению к значению прямого выключаемого тока), но короткой длительности (10-100 мкс). Запираемые тиристоры также имеют более низкие значения предельных напряжений и токов (примерно на 20-30 %) по сравнению с обычными тиристорами.

Основные типы тиристоров

Кроме запираемых тиристоров разработана широкая гамма тиристоров различных типов, отличающихся быстродействием, процессами управления, направлением токов в проводящем состоянии и т.д. Среди них следует отметить следующие типы:

- **тиристор-диод**, который эквивалентен тиристоры со встречно-параллельно включенным диодом (рис. 6.12,а);
- **диодный тиристор (динистор)**, переходящий в проводящее состояние при превышении определённого уровня напряжения, приложенного между А и С (рис. 6,б);
- **запираемый тиристор** (рис. 6.12,с);
- **симметричный тиристор или симистор**, который эквивалентен двум встречно-параллельно включенным тиристорам (рис. 6.12,д);
- **быстродействующий инверторный тиристор** (время выключения 5-50 мкс);
- **тиристор с полевым управлением по управляющему электроду**, например, на основе комбинации МОП-транзистора с тиристором;
- **оптотиристор, управляемый световым потоком.**

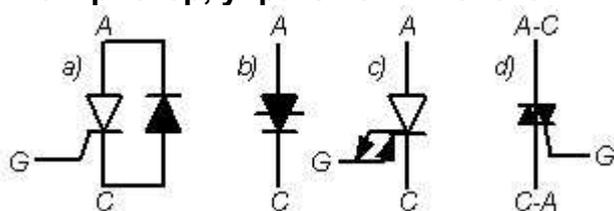


Рис. 6. Условно-графическое обозначение тиристоров: а) – тиристор-диод; б) – диодный тиристор (динистор); с) – запираемый тиристор; д) – симистор

Защита тиристоров

Тиристоры являются приборами, критичными к скоростям нарастания прямого тока di/dt и прямого напряжения du_{AC}/dt . Тиристорам, как и диодам, присуще явление протекания обратного тока восстановления, резкое спадание которого до нуля усугубляет возможность возникновения перенапряжений с высоким значением du_{AC}/dt . Такие перенапряжения являются следствием резкого прекращения тока в индуктивных элементах схемы, включая малые индуктивности монтажа. Поэтому для защиты тиристоров обычно используют различные схемы ЦФТП, которые в

динамических режимах осуществляют защиту от недопустимых значений di/dt и du/dt .

В большинстве случаев внутреннее индуктивное сопротивление источников напряжения, входящих в цепь включенного тиристора, оказывается достаточным, чтобы не вводить дополнительную индуктивность L_S . Поэтому на практике чаще возникает необходимость в ЦФТП, снижающих уровень и скорость перенапряжений при выключении (рис. 7).

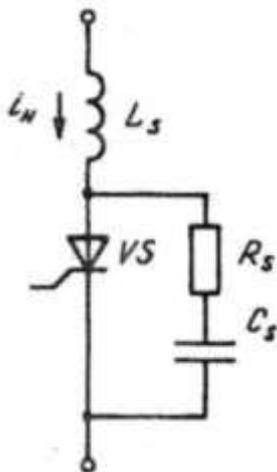


Рис. 7. Типовая схема защиты тиристора

Для этой цели обычно используют RC-цепи, подключаемые параллельно тиристорам. Существуют различные схемотехнические модификации RC-цепей и методики расчета их параметров для разных условий использования тиристоров. Для запираемых тиристоров применяются цепи формирования траектории переключения, аналогичных по схемотехнике IGBT транзисторов.