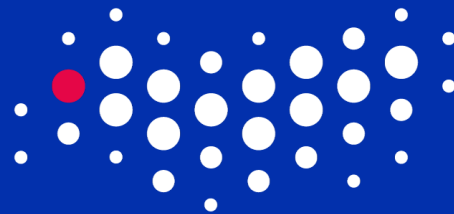


УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург, 2021



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Электронные приборы с
отрицательным
дифференциальным
сопротивлением.

Санкт-Петербург, 2021

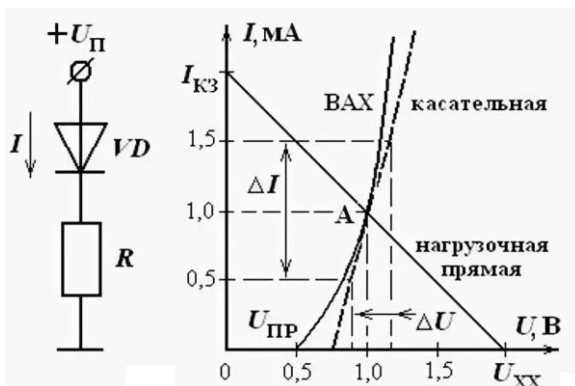


Темы, освещенные в презентации

- ✓ Туннельный диод
- ✓ Обращенный диод
- ✓ Генераторные диоды
- ✓ Тиристор

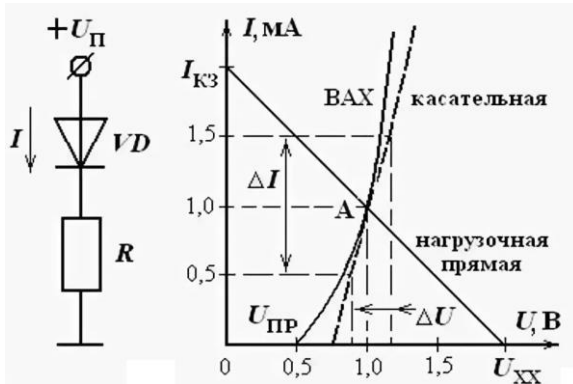
Статическое и динамическое сопротивление

Статическое сопротивление характеризует элемент (диод и др.) в неизменном режиме.



Статическое сопротивление можно определить тангенсом угла между соответствующей осью координат и прямой, соединяющей рабочую точку с началом координат (с нулевой точкой).

Статическое и динамическое сопротивление



Статическое сопротивление характеризует элемент (диод и др.) в неизменном режиме.

Статическое сопротивление можно определить тангенсом угла между соответствующей осью координат и прямой, соединяющей рабочую точку с началом координат (с нулевой точкой).

$$R_{CT} = \frac{U}{I}$$

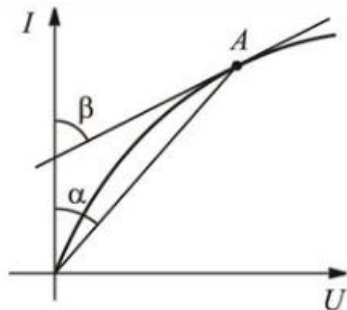
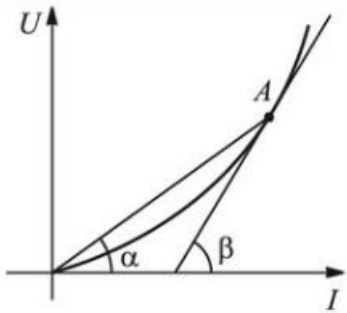
где U и I – берутся в точке пересечения BAX и нагрузочной линии.

Дифференциальное (динамическое)

сопротивление равно отношению бесконечно малого приращения напряжения на элементе к соответствующему бесконечно малому приращению тока.

$$R_D = \frac{dU}{dI}$$

Для линейных элементов статическое и динамическое сопротивления равны.



Электронные приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением

Среди современных электронных приборов есть группа приборов, ВАХ которых имеет участки с отрицательной производной dI/dU (с отрицательной дифференциальной проводимостью и сопротивлением). На этих участках увеличение напряжения приводит к уменьшению тока. Формально можно считать, что в приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением мощность переменного тока не потребляется, а «вырабатывается». Последнее утверждение не означает, что ЭП с ВАХ, имеющей участок с отрицательной производной dI/dU , является источником энергии, так для того, чтобы проявилась «отрицательность», необходим внешний источник питания, который служит действительным источником энергии.

Туннельный диод

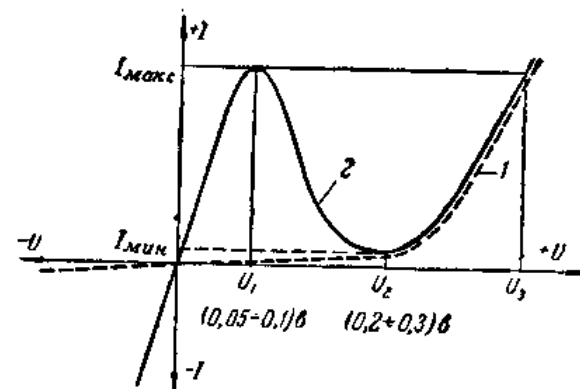
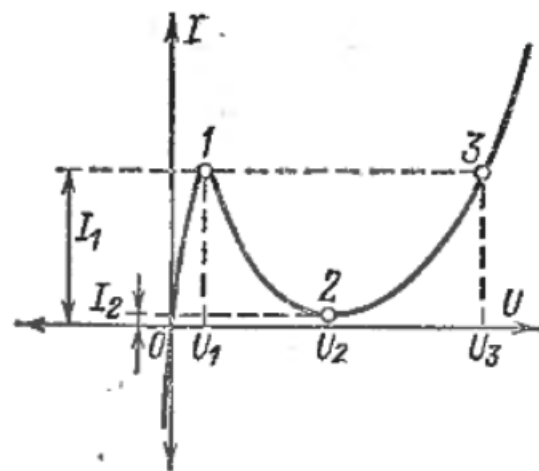
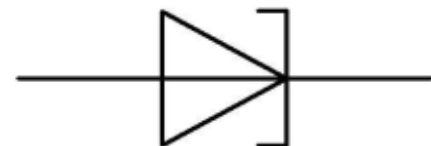
Разработаны в 1958-1959 гг. по предложению японского физика Есаки.

Условное обозначение туннельного диода показано на рисунке.

Туннельный диоды интересны тем, что будучи двухполюсниками, могут усиливать сигналы. Это объясняется наличием на их ВАХ участка с отрицательным сопротивлением.

Особенностью конструкции являются очень малые удельные сопротивления р- и n- слоев и соответственно очень малая ширина перехода. Концентрация примесей в слоях достигает 10^{19} см^{-3} и больше. Полупроводник вырождается, превращаясь в полуметалл.

VD



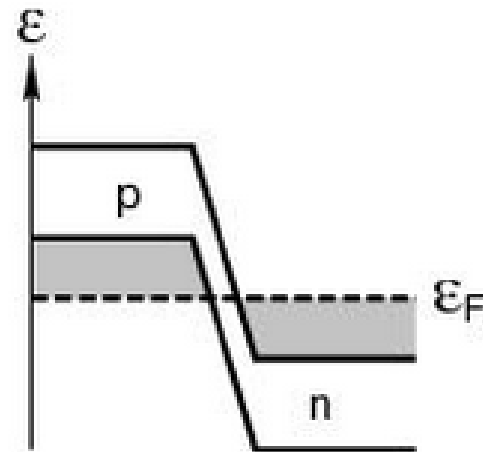
Туннельный диод

Уровни примесных атомов сливаются в зоны, а последние в свою очередь сливаются с соответствующими основными зонами слоев. В результате уровни Ферми, как и в металле, располагаются не в запрещенных зонах р- и n- слоев, а в разрешенных зонах: в валентной зоне р-слоя и зоне проводимости n-слоя.

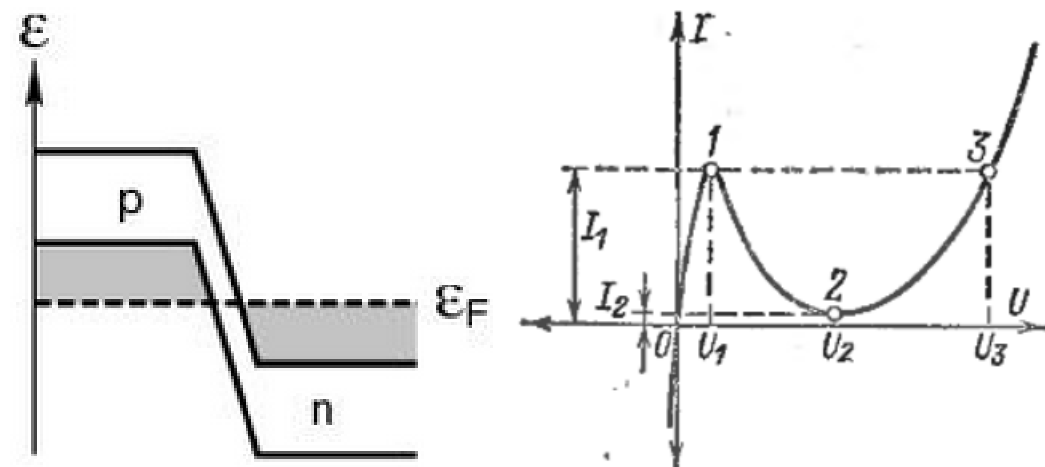
Носители зарядов имеют возможность переходить из одной области р-n перехода в другую без изменения своей энергии, т.е. не преодолевая потенциальный барьер.

Это явление представляет собой туннельный эффект, откуда и происходит название диодов.

В равновесном состоянии число электронов, переходящих за счет туннельного эффекта из n-области в р-область и обратно, одинаково. В этом случае ток через диод равен нулю.



При подаче на р-п переход положительного напряжения заштрихованные части зон начинают сходиться, возникает ток за счет туннельного перехода электронов из n-области в р-область. Туннельный ток достигает максимального значения при полном совмещении заштрихованных участков зон. При дальнейшем увеличении положительного напряжения на диоде заштрихованные участки зон начинают расходиться - туннельный ток уменьшается и при полном расхождении становится равным нулю. Однако при этом за счет увеличения прямого смещения начинает появляться и возрастать диффузионный ток. При подаче обратного смещения происходит туннелирование электронов из р-области в n-область – обратный ток резко возрастает (туннельный пробой).



«Падающий» участок (напряжение растет, а ток уменьшается), находящийся в начале прямой ветви вольтамперной характеристики туннельного диода, совсем небольшой. Поэтому у туннельного диода небольшие рабочее напряжение, ток и, соответственно, мощность.

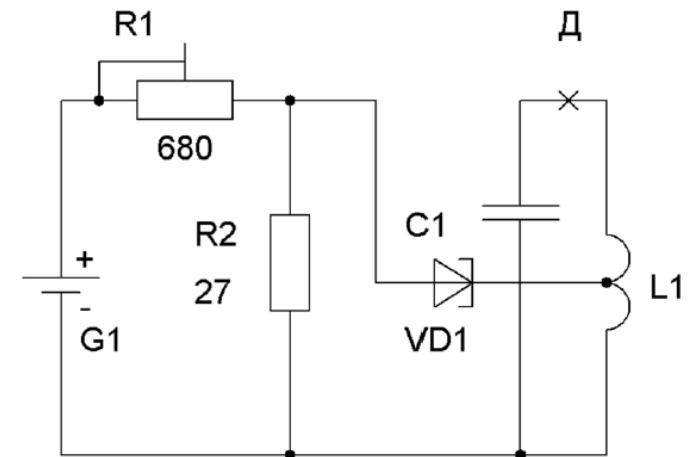
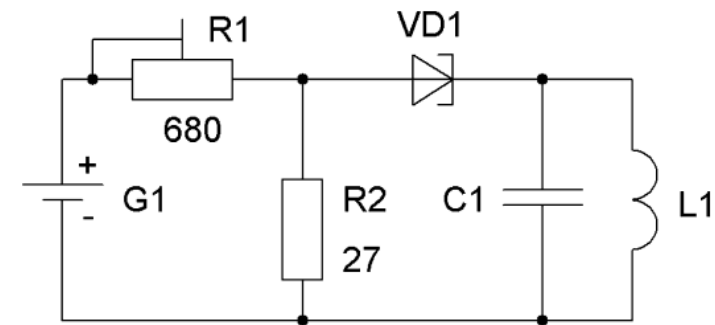
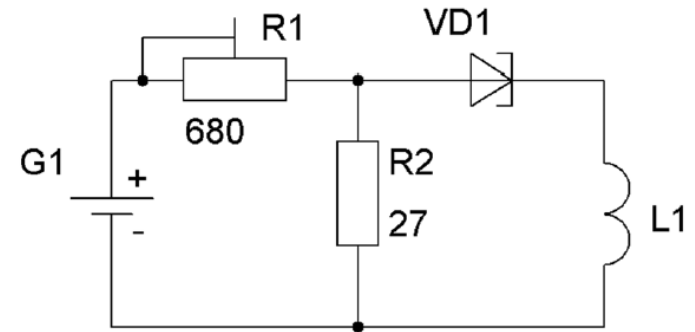
Генераторы на туннельных диодах

По схемотехнике генераторы могут выполняться по последовательной (верхний рисунок), параллельной (средний) и последовательно-параллельной (нижний) схемам.

Параллельная схема имеет наибольшую выходную мощность.

Последовательная схема наиболее простая и имеет наибольшую граничную частоты.

Последовательно-параллельная имеет наилучшую стабильность и форму выходного сигнала.



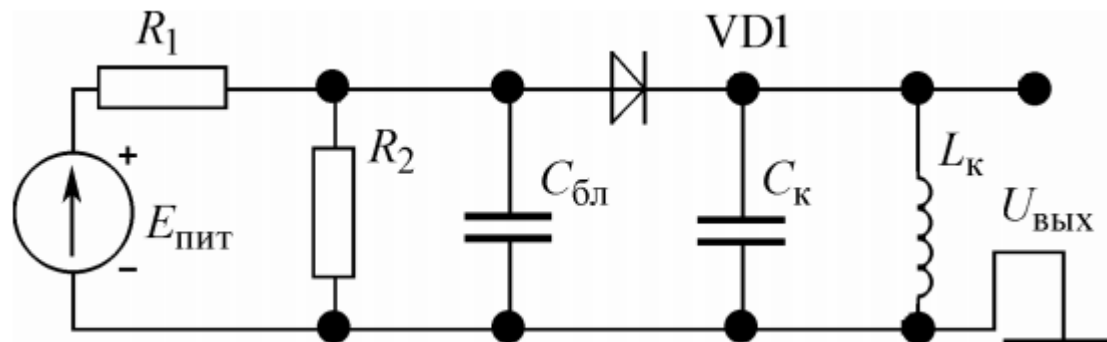


Генераторы на туннельных диодах

Так как на ВАХ туннельного диода имеется участок с отрицательным сопротивлением устойчивым по напряжению, то при подключении к нему параллельного колебательного контура он может генерировать. При этом отрицательное сопротивление диода будет компенсировать потери, и в контуре могут возникнуть и поддерживаться незатухающие колебания. Однако из-за небольшой величины участка ВАХ диода с отрицательным сопротивлением мощность, отдаваемая им на любых частотах, составляет доли милливатт. Чтобы форма генерируемых колебаний не искажалась, как правило, применяют частичное включение диода в контур генератора. **Основным условием генерации** является превышение величины сопротивления потерь контура над величиной отрицательного сопротивления туннельного диода.

Схема генератора гармонических колебаний на туннельном диоде

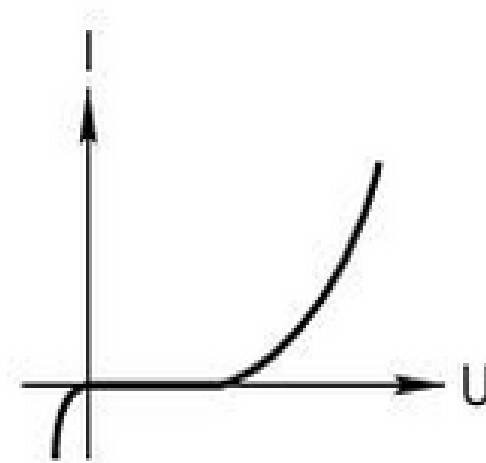
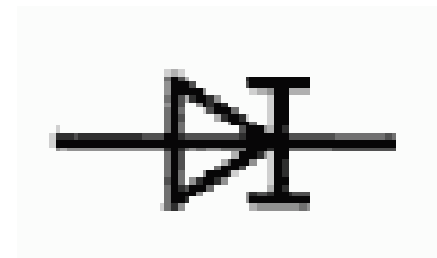
Туннельный диод, включенный параллельно колебательному контуру, компенсирует своим отрицательным сопротивлением сопротивление потерь колебательного контура, а потому колебания в нем могут продолжаться бесконечно долго.



Обращенный диод

Разновидностью туннельного диода является так называемый обращенный диод. Условное обозначение обращенного диода на схеме показано на рисунке. ВАХ диода приведена на рисунке, особенностью обращенного диода является отсутствие максимума тока на прямой ветви ВАХ.

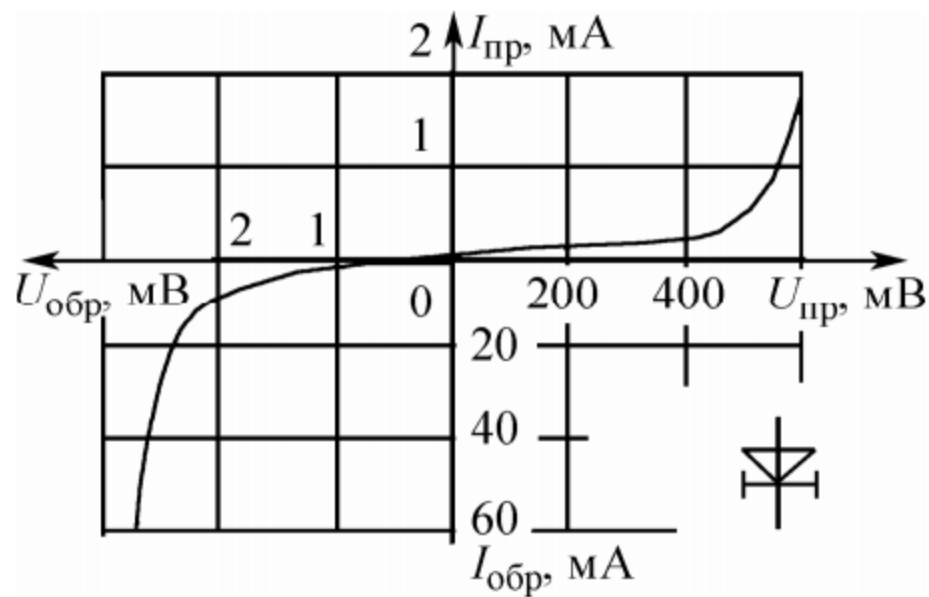
Иногда ВАХ туннельного диода называют N-образной характеристикой. Участок ВАХ, где с ростом напряжения происходит уменьшение тока, представляет отрицательное сопротивление.





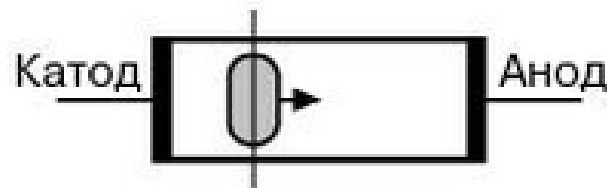
Обращенный диод

В обращенных диодах концентрация примесей несколько меньше, чем в туннельных. Благодаря этому у них отсутствует участок с отрицательным сопротивлением. На прямой ветви до напряжений 0,3 – 0,4 В имеется практически горизонтальный участок с малым прямым током, в то время как ток обратной ветви, начиная с малых напряжений, из-за туннельного пробоя, резко возрастает. В этих диодах для малых переменных сигналов прямую ветвь можно считать не проводящей ток, а обратную – проводящей. Отсюда и название этих диодов. Обращенные диоды используются для выпрямления СВЧ сигналов малых амплитуд (100 – 300) мВ.



Генераторные диоды

Генераторные диоды предназначены для осуществления генерации СВЧ колебаний. Они относятся к классу двухполюсников, обладающих участком отрицательного сопротивления на ВАХ. Однако в отличие от таких полупроводниковых приборов, как туннельные диоды, отрицательное сопротивление у генераторных диодов проявляется только на достаточно высоких частотах и не проявляется в статическом режиме. На рисунке показан пример генераторного диода: диод Ганна.

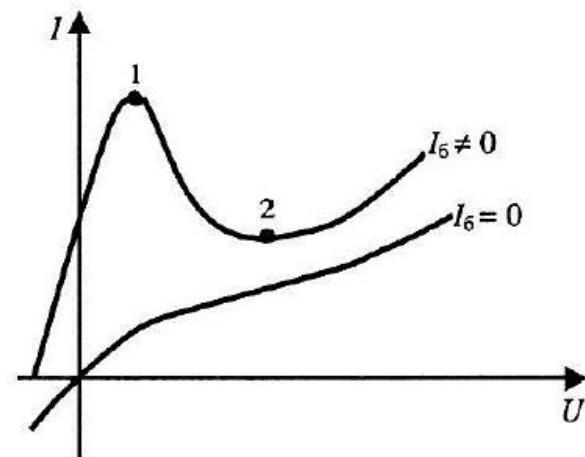
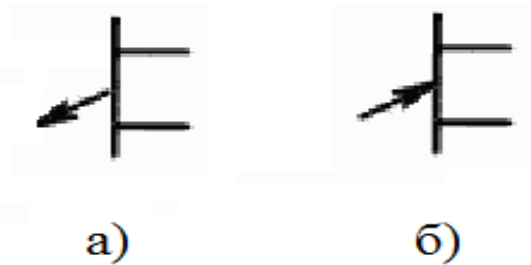


Однопереходной транзистор (двухбазовый диод)

Условное обозначение однопереходного транзистора на схеме показано на рисунке а) с р-базой; б) с п-базой.

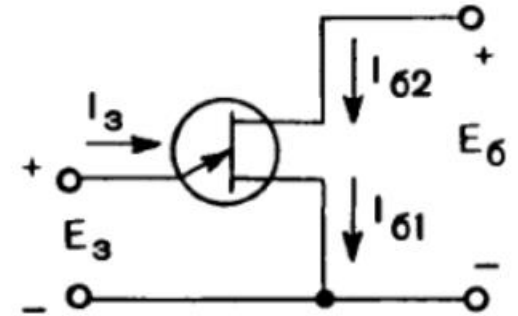
Однопереходной транзистор (ОПТ) – управляемый полупроводниковый прибор с одним р-п переходом и тремя выводами.

Конструктивно ООП может выполняться на монокристаллической кремниевой пластине п-типа с высоким удельным сопротивлением. Концы пластины, называемые первой и второй базой, имеют внешние выводы через омические контакты. В пластину ближе ко второй базе встраивается полупроводник р-типа, являющийся эмиттером. Эмиттер имеет внешний вывод. Таким образом, ОПТ имеет один р-п переход и три вывода. На рисунке приведена ВАХ ОПТ.



Однопереходной транзистор (двухбазовый диод)

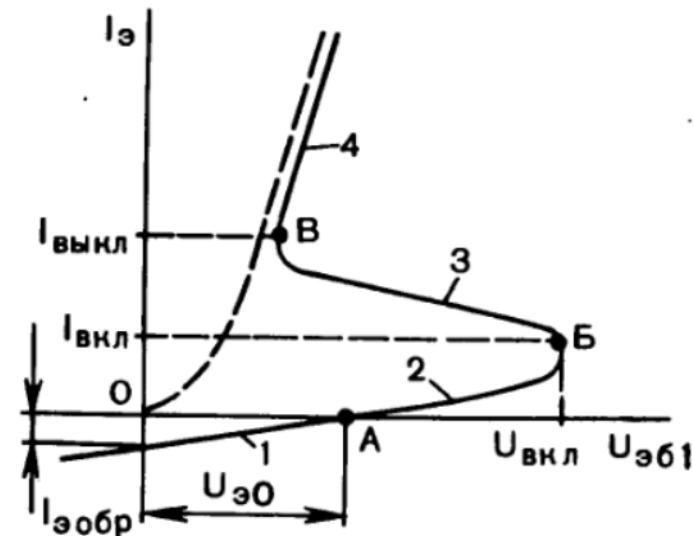
Если между базами подать напряжение порядка 10...30 В плюсом к базе (б2), а на эмиттер не подавать напряжение, то межбазовое напряжение распределится вдоль пластины базы по линейному закону. По пластине потечет небольшой ток (сопротивление кремниевой пластины 4-12 кОм)



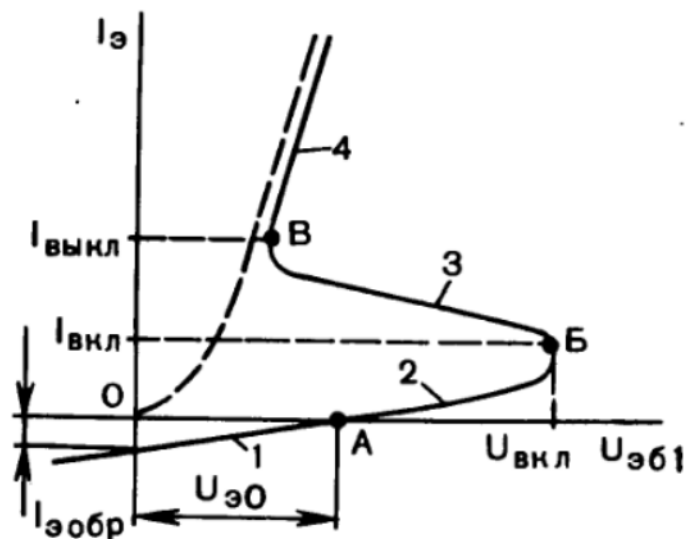
Если на эмиттер относительно первой базы подать напряжение, то на р-п переходе будет действовать напряжение, равное разности потенциалов р-слоя и п-слоя по обе стороны р-п перехода ($U_э - U_{б1}$).

При отрицательном напряжении на эмиттере и при положительно напряжении меньшем чем $U_{б1}$, на р-п переход действует обратное напряжение.

После открытия р-п перехода растет ток эмиттера и уменьшается сопротивление базы. При некотором критическом значении сопротивление первой базы резко снижается, снижается потенциальный барьер, происходит лавинообразное увеличение тока эмиттера.



Однопереходной транзистор (двухбазовый диод)



1 – При отрицательном напряжении эмиттера относительно базы и при положительном не превышающем порогового значения р-п переход закрыт, протекает малый обратный ток – **область отсечки**.

2 – При дальнейшем увеличении напряжения р-п переход открывается, начинает проходить прямой ток. Дифференциальное сопротивление положительно, ОПТ остается закрыт – **промежуточный участок**.

3 – при накоплении дырок в области первой базы происходит включение ОПТ – переход в открытое состояние. Участок 3 – **активная область** – ток эмиттера растет, напряжение эмиттера уменьшается. Область с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

4 – участок отражает работу ОПТ в открытом состоянии – область насыщения, в которой ОПТ работает как прибор с положительным сопротивлением малой величины.

При уменьшении тока в открытом состоянии до некоторого значения (ток отключения), ОПТ переходит в закрытое состояние.



Однопереходной транзистор (двухбазовый диод)

Основные параметры

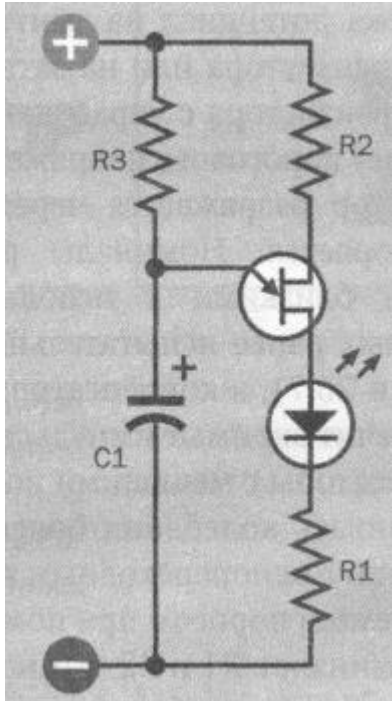
1. Ток включения
2. Ток выключения
3. Обратный ток эмиттера
4. Межбазовое сопротивление
5. Максимально допустимое значение рассеиваемой мощности
6. Межбазовое напряжение
7. Средний и импульсный ток эмиттера

Система обозначений однопереходных транзисторов такая же, как и для биполярных. Например, КТ117А.

По конструкции ОПТ могут быть сплавные и планарные.



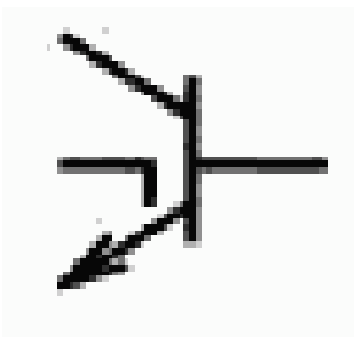
Одноререходной транзистор



В начальный момент времени заряжается конденсатор C1 до тех пор, пока потенциал на эмиттере не достигнет порогового напряжения, после чего конденсатор разряжается через эмиттер и цикл повторяется.

Лавинный транзистор

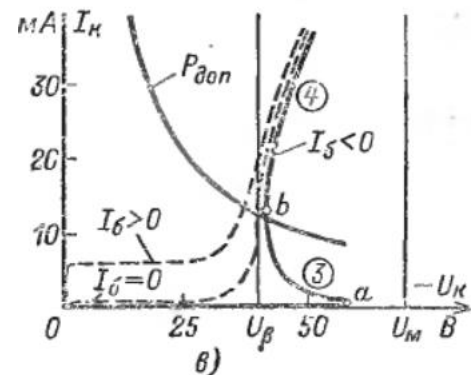
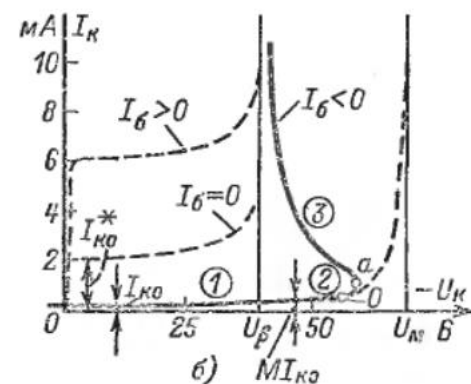
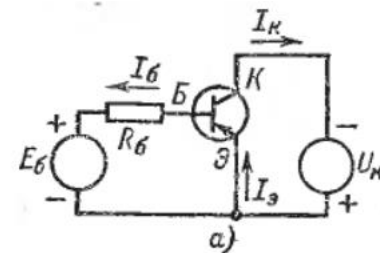
Условное обозначение лавинного транзистора на схеме приведено на рисунке. Лавинный транзистор (ЛТ) также является прибором с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В лавинном режиме могут использоваться не только специально разработанные транзисторы, но и многие серийно выпускаемые биполярные транзисторы.



В основе работы ЛТ лежит явление умножения носителей заряда под влиянием сильного электрического поля в обратном коллекторном переходе. Таким образом, явление пробоя, обычно нежелательное при эксплуатации транзистора, может быть использовано для получения принципиально новых свойств ЭП.

Лавинный транзистор

Название «лавинный» относится к специфическому режиму работы, когда используется ударная ионизация в коллекторном переходе и в результате получаются неоднозначные s-образные (неоднозначные по напряжению выходные характеристики при включении ОЭ).



Тиристор

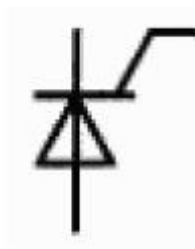
Тиристором называется прибор, состоящий из четырех слоев полупроводника с чередующейся проводимостью (р-п-р-п) и имеющий два или три вывода.

Крайнюю р-область принято называть **анодом**, а крайнюю п-область – **катодом**, а вывод средней р-области – **управляющим электродом**.

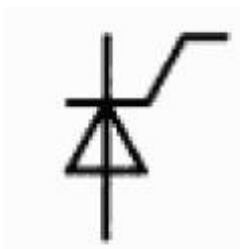
На рисунке показано условное обозначение тиристоров на схеме: а) тринистора с управлением по аноду; б) и в) тринистора с управлением по катоду; г) динистора.



а)



б)



в)



г)



Классификация тиристоров

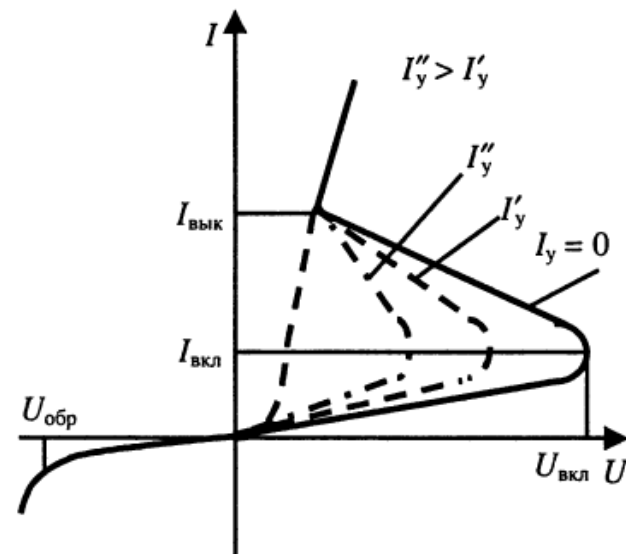


Тиристор

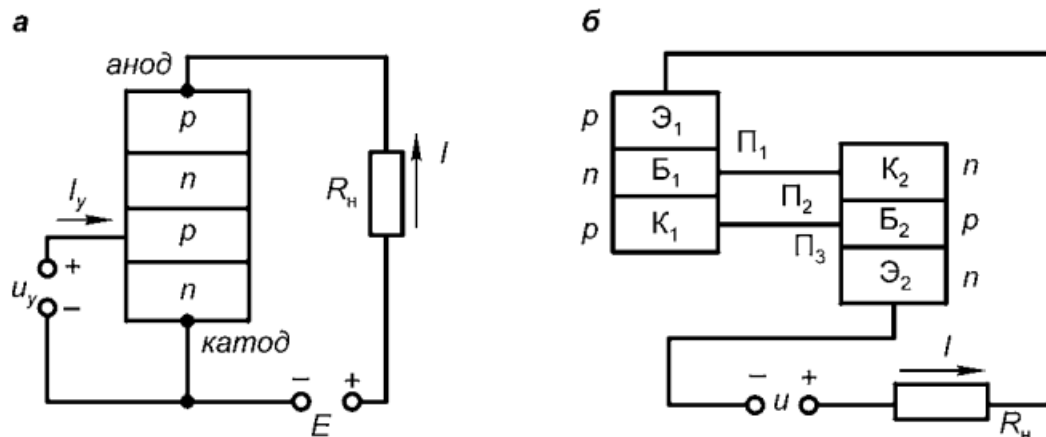
Основное свойство тиристора, обеспечивающее ему самые разнообразные применения в автоматике, электронике и энергетике – это способность находиться в двух устойчивых состояниях – закрытом и открытом. **В закрытом состоянии сопротивление тиристора составляет десятки мегаом**, и он практически не пропускает ток при напряжениях единиц тысяч вольт, а **в открытом состоянии сопротивление тиристора незначительно**.

Падение напряжения на нем – около одного вольта при токах в сотни ампер. Переход тиристора из одного состояния в другое происходит в очень короткое время. На рисунке показана ВАХ тиристора.

Достоинства тиристора – большой срок службы, высокий КПД, малая чувствительность к вибрации и механическим перегрузкам, способность работать при низких прямых и высоких обратных напряжениях, а также при очень больших токах, достигающих единиц килоампер.



Тиристор



Тиристор

а — структура; б — двухтранзисторный аналог.

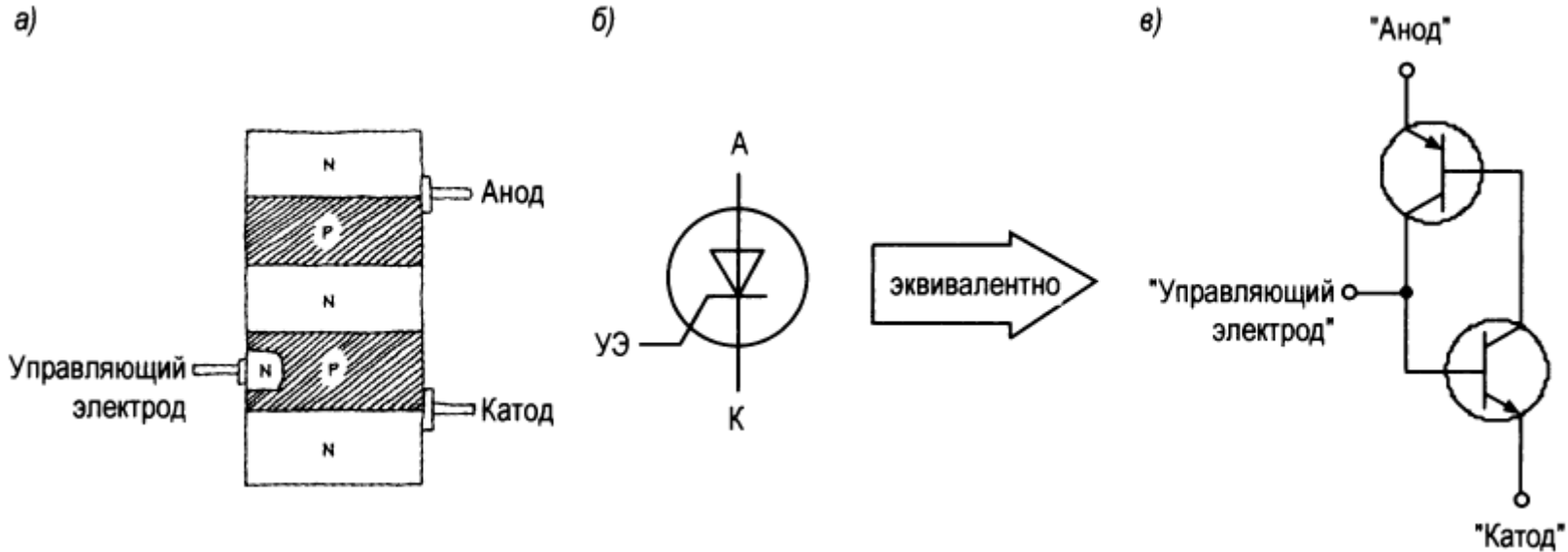
Четырехслойная структура тиристора содержит 3 p-n перехода. При отсутствии напряжения на управляющем электроде и отрицательном напряжении на аноде относительно катода электронно-дырочные переходы П1 и П3 смещены в обратном направлении, а переход П2 в прямом направлении.

При этом протекает очень маленький ток. Наличие управляющего тока в этом случае не изменяет общего состояния структуры и тиристор остается заперт.

Если к тиристорам приложить прямое напряжение (плюс на аноде), переходы П1 и П3 смещаются в прямом направлении, а переход П2 в обратном. При отсутствии напряжения на управляющем электроде тиристор остается запертым и все напряжение оказывается приложенным к переходу П2.

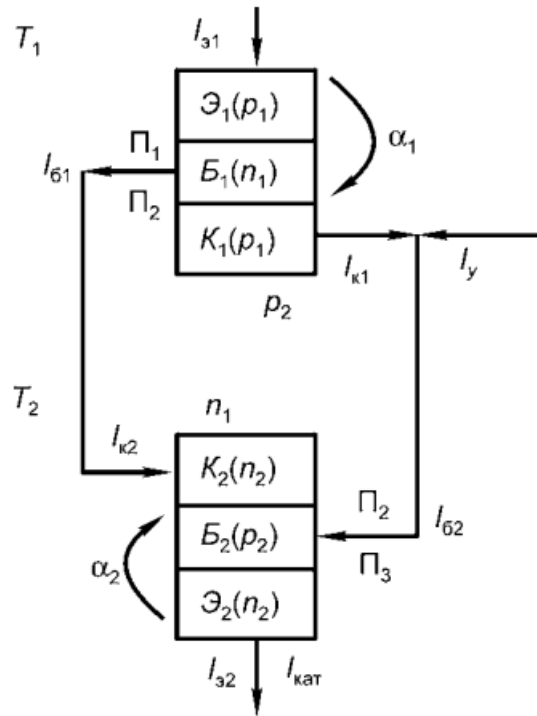
Четырехслойную структуру тиристора можно представить в виде двух соответствующим образом включенных транзисторов p-n-p и n-p-n типов.

Тиристор



Тиристор (кремниевый управляемый выпрямитель (КУВ)) – пока на УЭ отсутствует напряжение транзисторы закрыты, ток через КУВ не течет. При достижении положительного напряжения на УУ определяется уровень открывающегося n-p-n транзистора. Включение n-p-n транзистора позволяет p-n-p транзистору потреблять ток своей базой с коллектора n-p-n транзистора, что является условием для его включения. Так как оба транзистора открываются, то ток может свободно протекать от анода к катоду. Если с тиристора снять управляющее напряжение, то тиристор останется в открытом состоянии.

Тиристор



Управляющий ток является базовым током транзистора VT2. Этот ток усиливает инжекцию носителей со стороны эмиттера Э2, так как коллекторный ток $I_{к2}$ равен $I_{к2} = \alpha_2 I_{э2}$ или $I_{к2} = \beta_2 I_{б2}$ (где α и β – коэффициенты передачи тока эмиттера и тока базы соответственно).

Одновременно ток $I_{к2}$ является также базовым током транзистора VT1. Этот ток обуславливает инжекцию носителей эмиттера Э2.

Ток $I_{к1}$ равен $I_{к1} = \alpha_1 I_{э1}$ или $I_{к1} = \beta_1 I_{б1}$.

Как видно из рисунка $I_{б2} = I_{к1} + I_y$, следовательно, обратная связь в данной схеме положительная.

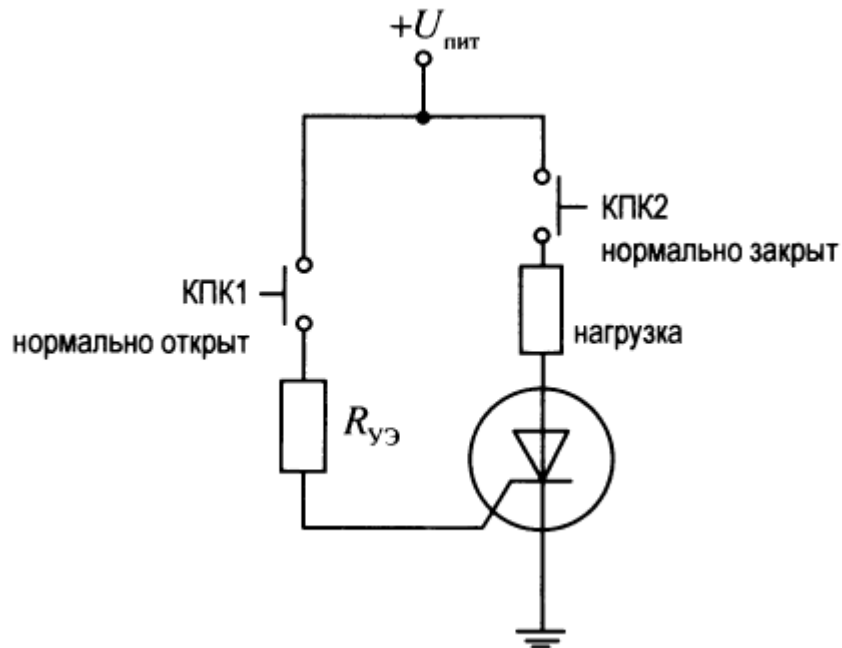
Если коэффициенты α_1 и α_2 достаточны для того, чтобы усиление в контуре обратной связи достигло единицы, то базовые токи возрастут и оба транзистора окажутся в режиме насыщения $I = I_0 + \alpha_1 I + \alpha_2 I$

$$I = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Основное применение КУВ

Переключатель с фиксацией состояний

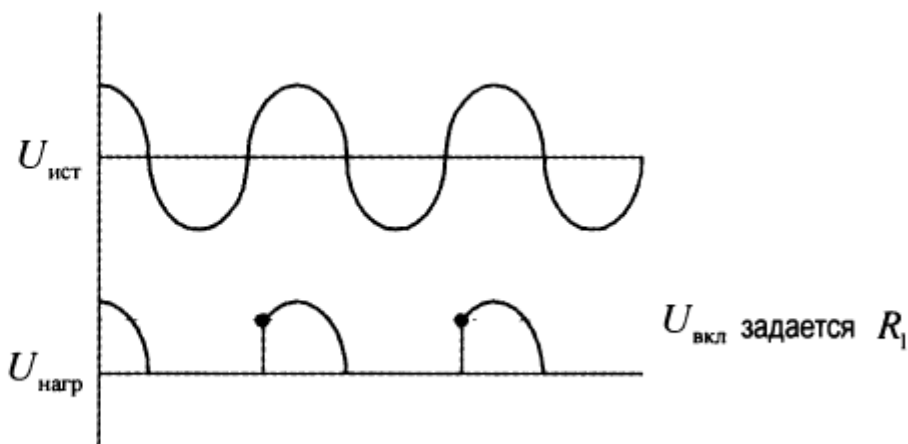
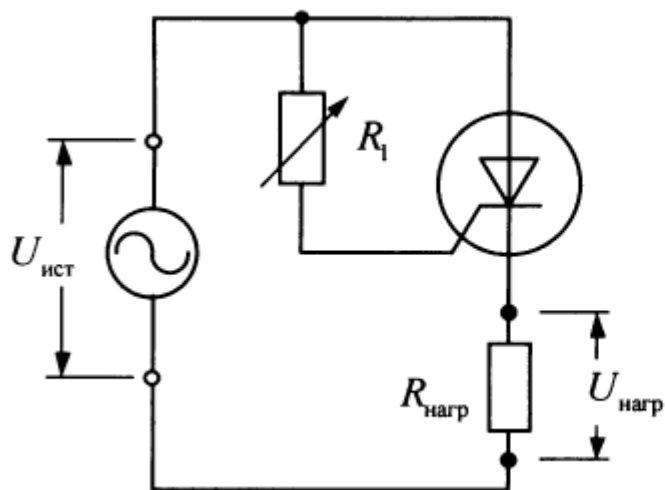
В схеме применяются переключатели КПК1 и КПК2 с самовозвратом. При кратковременном нажатии на КПК1 формируется кратковременный импульс на управляющем электроде КУВ, который открывает КУВ, через нагрузку протекает ток. КПК 2 используется для отключения КУВ. Резистор осуществляет установку управляющего тока и напряжения для КУВ.



Основное применение КУВ

Управление током нагрузки с помощью КУВ.

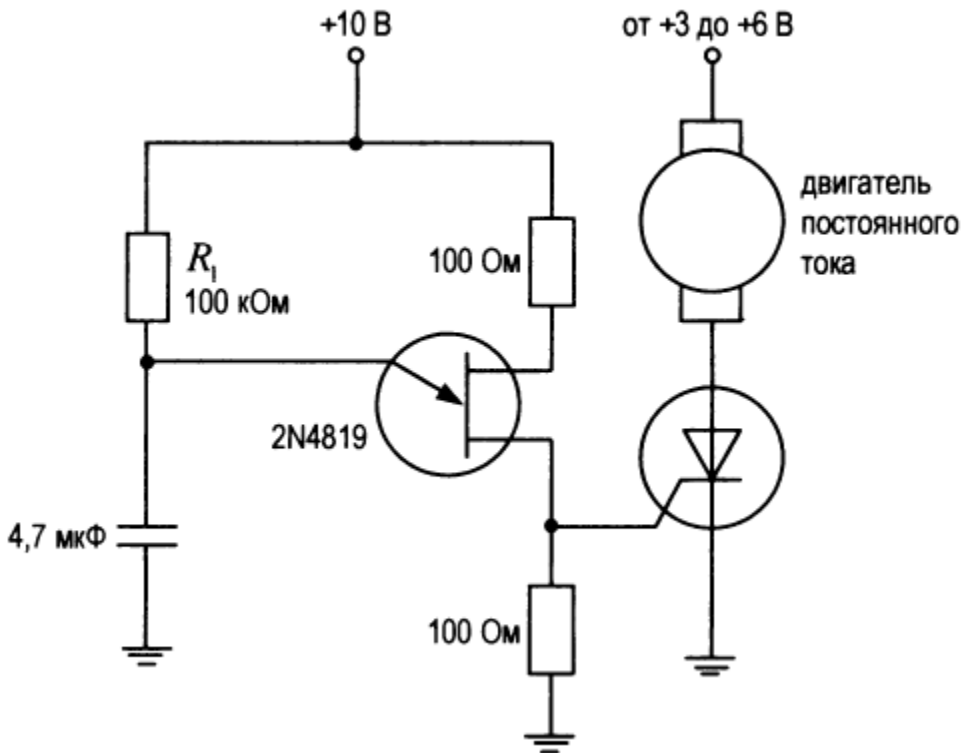
В данной схеме КУВ осуществляет выпрямление синусоидального напряжения, которым питается нагрузка. Когда на аноде присутствует положительный период сигнала, большая по величине напряжения, необходимого для включения тиристора, через нагрузку течет ток. Резистор определяет момент включения тиристора.



Основное применение КУВ

Регулятор скорости ДПТ.

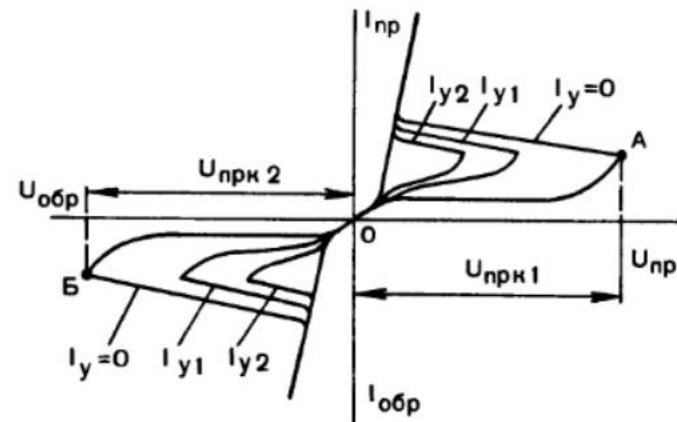
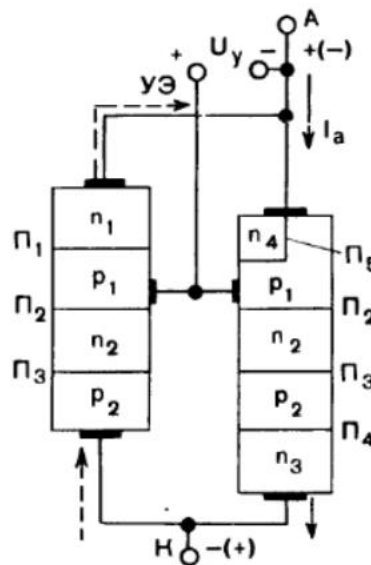
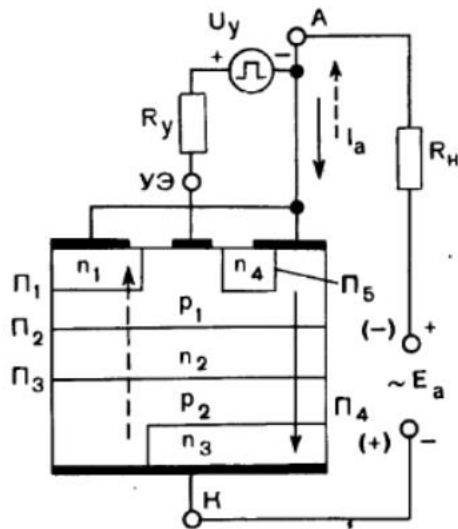
Однопереходной транзистор, конденсатор и резисторы формируют генератор колебаний. Колебания генератора подаются на управляющий вход КУВ. Резистором R_1 можно менять частоту колебаний, что, в свою очередь, ведет к изменению количества переключений.





Симметричный тиристор (симистор)

Симистором называют тиристор, который переключается из закрытого состояния в открытое как в прямом, так и в обратном направлении. Он имеет симметричную ВАХ



Структура симистора можно рассматривать как два обычных тиристора, включенны встречно-параллельно.

Тиристор. Основные параметры

- Ток и напряжение переключения;
- Ток, напряжение и рассеиваемая мощность в открытом состоянии;
- Ток удержания;
- Обратный ток;
- Максимально допустимые значения тока и мощности в открытом состоянии и обратного напряжения

Динамический режим работы тиристора характеризуется:

- Динамическим сопротивлением тиристора, определяется по наклону прямой ветви ВАХ на участке, соответствующем открытому состоянию

$$r_{\text{дин}} = \frac{\Delta U_{\text{ос}}}{\Delta I_{\text{ос}}}$$

- время включения тиристора – интервал времени, в течение которого тиристор переходит из закрытого состояния в открытое;
- Время выключения тиристора – наименьший интервал времени, в течение которого восстанавливаются запирающие свойства.

Тиристор. Сферы применения

Динисторы, тринисторы и симисторы малой мощности используются в качестве переключающих элементов в устройствах автоматики, ЭВМ, преобразователях сигналов, в осветительных системах.

Тринисторы средней и большой мощности применяются в качестве управляемых вентилей для выпрямления переменного тока.

Тринисторы также используются в тиристорных стабилизаторах выпрямленного напряжения, в устройствах для регулирования оборотов приводов, в генераторах большой мощности, в генераторах высокой частоты.

Симметричные тиристоры средней и большой мощности нашли применение в стабилизаторах напряжения с регулированием на переменном токе (со стороны сети), а также в регуляторах света ламп накаливания, в качестве ключей и реле в силовых цепях переменного тока, для коммутации силовых ключей электроприводов

Тиристор. Система обозначений

Первый элемент – буква К(кремниевый), второй элемент – буква Н для динисторов (неуправляемый), У для тринисторов и симисторов (управляемый). Третий элемент трехзначное число, обозначающее назначение и порядковый номер разработки:

- Тиристоры малой мощности от 101 до 199;
- тиристоры средней мощности от 201 до 299;
- Симисторы малой мощности от 501 до 599;
- Симисторы средней мощности от 601 до 699.

Четвертый элемент – буква, обозначающая группу по параметрам.

КН102Б – кремниевый динистор малой мощности, номе разработки 02, группа Б по параметрам;

КУ608Г – кремниевый симистор средней мощности, номер разработки 08, группа Г.

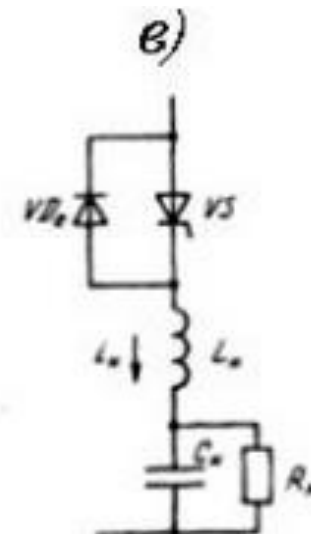
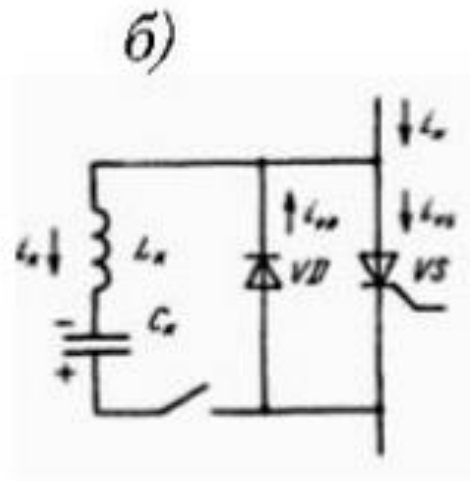
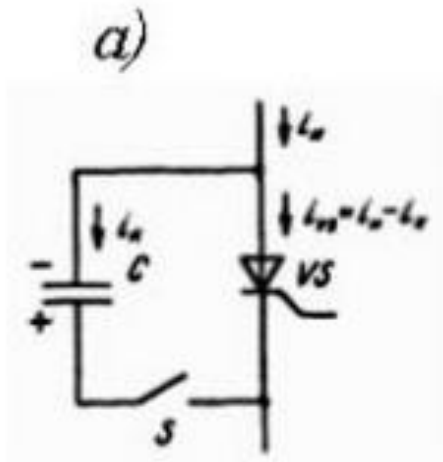
Тиристоры большой мощности, используемые в силовых цепях, имеют другую систему обозначений. Первый элемент - буква Т – тиристор, второй – одна или две буквы, указывающие на конструктивные особенности или систему охлаждения; Л – с лавинной характеристикой, В – с водяным охлаждением, С – симистор, ЛВ – с лавинной характеристикой и водяным охлаждением, если особенностей нет, то второй элемент отсутствует; третий элемент – число, указывающее максимально допустимый ток в амперах в открытом состоянии.

ТВ1000 – тиристор с водяным охлаждением, ток 1 кА.

Тиристор в цепи постоянного тока

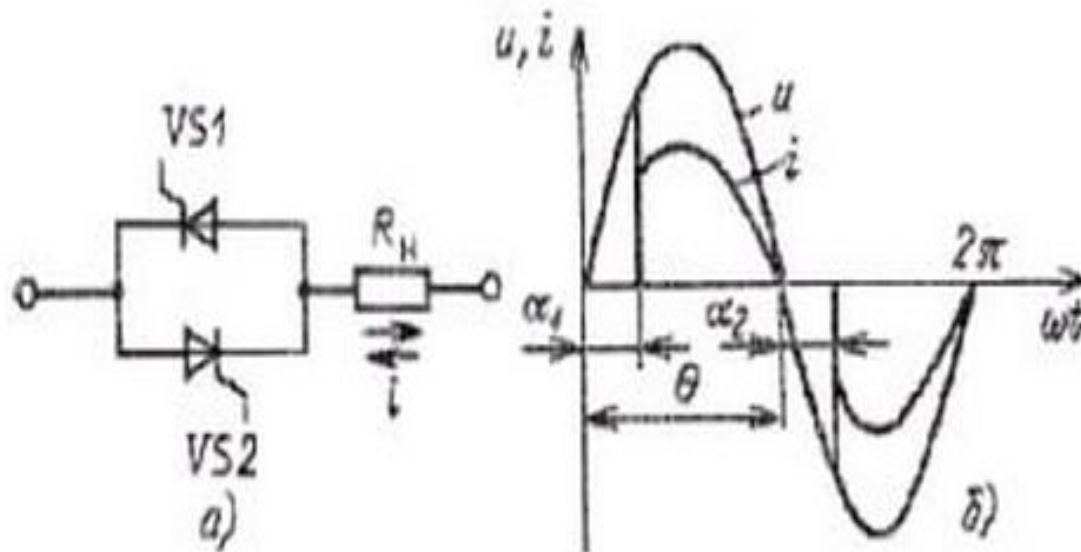
Способы искусственной коммутации тиристоров:

- а) – посредством заряженного конденсатора C ;
- б) – посредством колебательного разряда LC-контура;
- в) – за счёт колебательного характера нагрузки



Тиристор в цепи переменного тока

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



Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия однопереходного транзистора.
2. Нарисуйте и объясните эмиттерную ВАХ однопереходного транзистора.
3. Назовите основные параметры однопереходных транзисторов.
4. Нарисуйте и объясните структуру и схему включения тиристора.
5. Нарисуйте ВАХ тиристора и объясните его принцип действия без тока управления и при различных значениях тока управления
6. Чем отличается структура и ВАХ симметричного тиристора?
7. Назовите основные параметры тиристорov и области их применения.
8. Какие буквенно-цифровые обозначения присваивают тиристорам?
9. Какой полупроводниковый прибор называется тиристором?
10. Какие типы тиристорov вы знаете?
11. Принцип работы тиристора.
12. ВАХ тиристорov.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Спасибо за внимание!