



ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Раздел 1. Линейные и нелинейные электрические цепи. Часть 2.

Никитина Мария Владимировна
mvnikitina@itmo.ru

Санкт-Петербург, 2025

Нелинейными элементами электрической цепи называются такие элементы параметры, которых зависят от напряжений, токов, магнитных потоков и других величин, т.е. это элементы с нелинейными ВАХ, ВБАХ, КВХ. Принципиально все элементы электрических цепей в большей или меньшей степени нелинейны, но если нелинейность существенно не влияет на характер процессов в цепи, то ею пренебрегают и считают цепь линейной.



При наличии нелинейности анализ процессов значительно усложняется и если это возможно, то характеристики нелинейных элементов линеаризуются, аппроксимируются полиномами и т.п.

В современной технике нелинейные элементы находят очень широкое распространение в энергетике, автоматике, радиотехнике, вычислительной технике и других областях, связанных с применением электрической энергии.

Нелинейные резистивные элементы

Нелинейные резистивные элементы (НР) это элементы электрической цепи с нелинейной ВАХ. Они относятся к числу наиболее распространённых в технике элементов и отличаются большим разнообразием свойств.



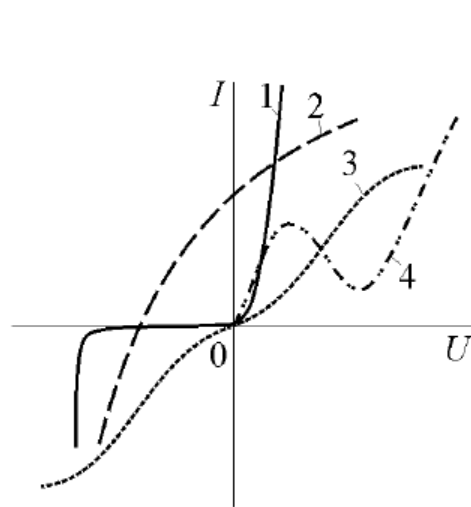
Нелинейные резистивные элементы

По *признаку наличия источника электрической энергии* НР делятся на *активные и пассивные*. Если ВАХ проходит через начало координат, то НР пассивный (кривые 1,3,4). В противном случае он относится к активным НР и его схема замещения содержит источник ЭДС или источник тока (кривая 2).

По *отношению к началу координат* ВАХ НР могут быть *симметричными* (кривая 3) и *несимметричными* (кривые 1,2,4).

Знак производной dU/dI в различных точках ВАХ может быть неизменным (*монотонная* характеристика, кривые 1,2,3), а может изменяться (*немонотонная* ВАХ, кривая 4).

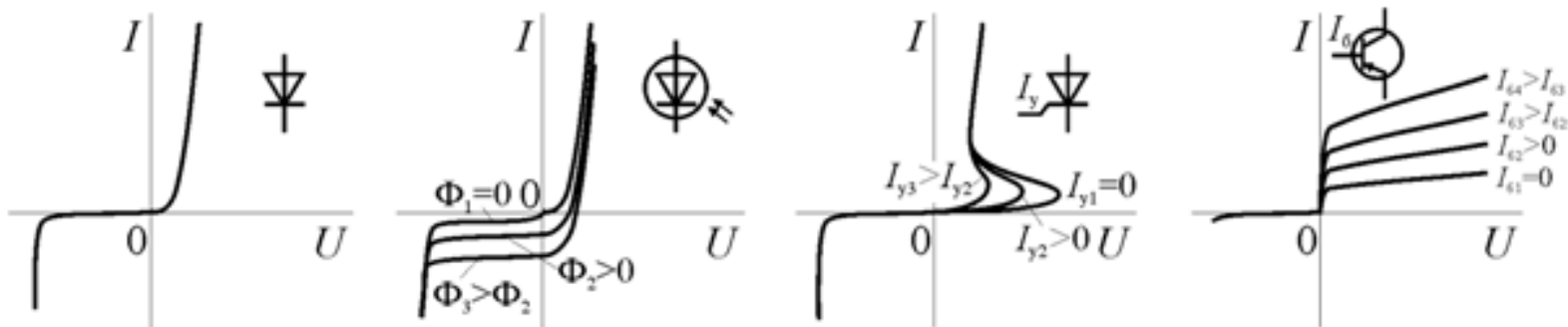
Нелинейный резистивный элемент может быть выполнен *с двумя выводными контактами (двухполюсники)* или *тремя (трехполюсники)*.



Нелинейные резистивные элементы

На рисунке внизу в качестве примера приведены ВАХ диода, фотодиода, тиристора и транзистора. Диод относится к *неуправляемым* НР, а остальные – к *управляемым*. Характеристики этих элементов резко несимметричны, при разных полярностях приложенного напряжения они обладают различными сопротивлениями.

ВАХ управляемых НР, кроме того, *изменяются под воздействием управляющей величины*.



Свойства нелинейных резистивных элементов



Свойства НР определяются его ВАХ. В отличие от линейного резистивного элемента каждая точка ВАХ нелинейного элемента определяется *двумя* параметрами:

статическим сопротивлением

$$R_{\text{ст}} = U/I$$

и *дифференциальным* сопротивлением

$$R_{\text{диф}} = dU/dI$$

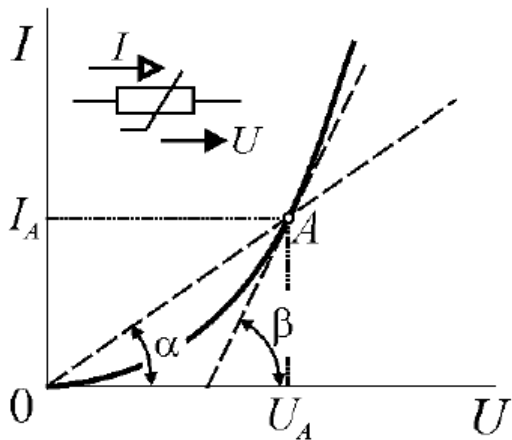
Графически *статическое* сопротивление представляет собой котангенс угла наклона секущей проведённой из начала координат ВАХ в точку A :

$$R_{\text{ст}} = (m_u/m_i) \text{Ctg} \alpha,$$

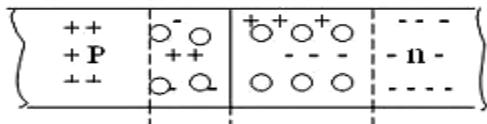
а *дифференциальное* сопротивление – котангенс угла наклона касательной в точке A :

$$R_{\text{диф}} = (m_u/m_i) \text{Ctg} \beta.$$

Статическое сопротивление соответствует сопротивлению НР в цепи постоянного тока, а дифференциальное – сопротивлению НР при малых изменениях тока и напряжения



О p - n -переходе



В структуре большинства НР присутствует один или несколько p - n -переходов.

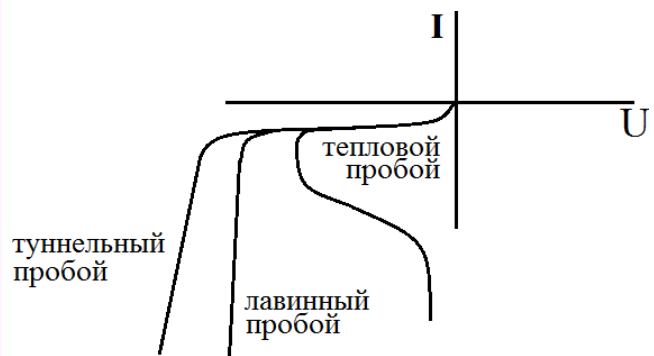


p - n -переход – это переход между двумя областями полупроводника, имеющими различный тип проводимости. Если концентрации зарядов одинаковы ($p_p \sim n_n$), то переход называется симметричным. Обычно $n_n \gg p_p$ или $p_p \gg n_n$ (в 100 – 1000 раз) – такие переходы несимметричны.

В зоне **p - n -перехода** образуется разность потенциалов, которую называют *потенциальным барьером* либо *контактной разностью потенциалов* U_k . Принято считать, что для германия (Ge) $U_k \approx 0,3$ В, для кремния (Si) $U_k \approx 0,7$ В.

p - n -переход при приложении к нему внешнего электрического поля обладает двумя видами емкости. Барьерная емкость $C_{\text{бар}}$ отражает перераспределение зарядов в p - n -переходе. Диффузионная емкость $C_{\text{диф}}$, отражает перераспределение зарядов вблизи p - n -перехода. При прямом смещении проявляется в основном диффузионная емкость $C_{\text{диф}}$. При обратном смещении большую роль играет барьерная емкость $C_{\text{бар}}$.

О p - n -переходе



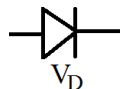
Пробоем называется значительное уменьшение сопротивления p - n -перехода при обратном смещении, сопровождающееся возрастанием обратного тока.

Туннельный пробой обусловлен туннельным эффектом, т.е. прохождением электронов сквозь потенциальный барьер.

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, когда напряженность электрического поля при обратном смещении так велика, что неосновные носители заряда, движущиеся через p - n -переход, ускоряются настолько, что при соударении с атомами ионизируют их.

Тепловой пробой возникает в результате разогрева p - n -перехода, когда количество тепла, выделяемое током в p - n -переходе, больше количества тепла, отводимого от него.





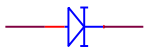
Выпрямительные диоды рассчитаны на токи до нескольких десятков ампер и обратные напряжения до 1000 В и более.



Стабилитроны. Работают в области лавинного пробоя, дифференциальное сопротивление очень мало, напряжение на диоде практически не зависит от тока, используются для стабилизации напряжения.



Туннельные диоды. ВАХ имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, имеют существенно лучшие динамические свойства по сравнению с обычными диодами, используются в высокочастотных генераторах сигналов.



Обращенные диоды. Туннельный диод с вырожденной областью отрицательного дифференциального сопротивления. Используются в обратном включении для детектирования слабых высокочастотных сигналов.





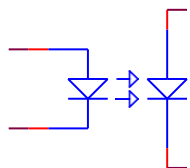
Диоды Шоттки. Вместо классического $p-n$ -перехода используется переход «металл - легированный полупроводник». Лучше динамические свойства за счет меньшей диффузионной емкости.



Светодиоды. Излучают свет при протекании через них прямого тока, имеют очень маленькое допустимое обратное напряжение (единицы вольт), при превышении которого сразу выходят из строя.



Фотодиоды. Генерируют ток под действием светового излучения. Используются в солнечных батареях и в оптопарах.



Оптопара. Комбинация светодиода и фотодиода, реализованная в одном светозащищенном корпусе. Такие устройства применяются для гальванической развязки при передаче информации. Внутри оптопары информация передается с помощью светового потока.

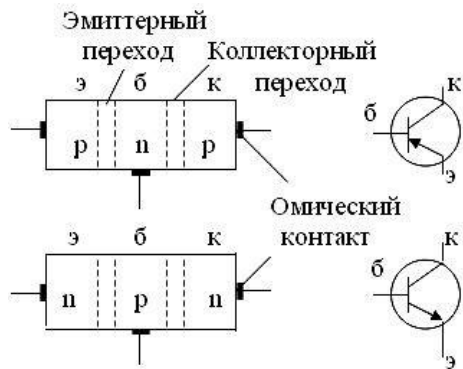


Варикан. Предназначен для работы в качестве емкости, управляемой напряжением. Используется для электронной подстройки колебательных контуров, в частности, в селекторах каналов телевизионных и радиоприемников.



Биполярные транзисторы

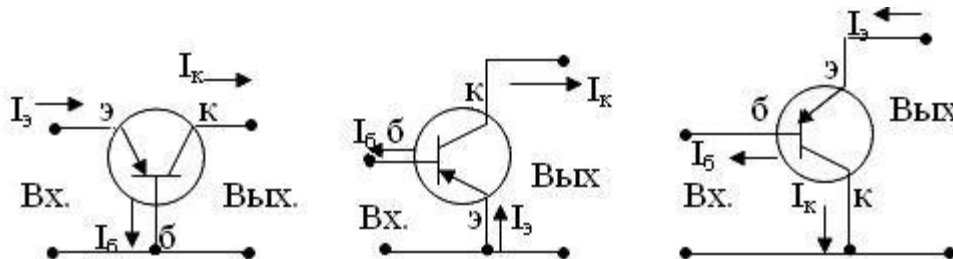
Транзистор – прибор, содержащий два или более электронно-дырочных перехода, имеющий не менее трех выводов и пригодный для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов.



Изготавливается по специальной технологии на кристалле полупроводника путем создания трех областей с различной проводимостью. Средняя область – **база**, другие называются **эмиттер** и **коллектор**. Между областями образуется два p - n -перехода, связанных между собой. Область, являющаяся источником носителей заряда при прямом смещении, называют **эмиттером**. Область, выполняющая функцию собирания зарядов, называют **коллектором**. На практике этими терминами называют выводы прибора. Соответственно p - n -переходы называют **эмиттерным** и **коллекторным**.

Биполярные транзисторы

При обычном включении на эмиттер относительно базы подается напряжение, создающее прямое смещение, а на коллектор – обратное смещение. Иногда используется так называемое *инверсное включение*, при котором коллектор и эмиттер меняются местами. При этом можно иметь различные способы включения транзистора: по схеме с общей базой (ОБ), общим эмиттером (ОЭ), общим коллектором (ОК). Соединив между собой два любых электрода, можно получить различные диодные структуры.

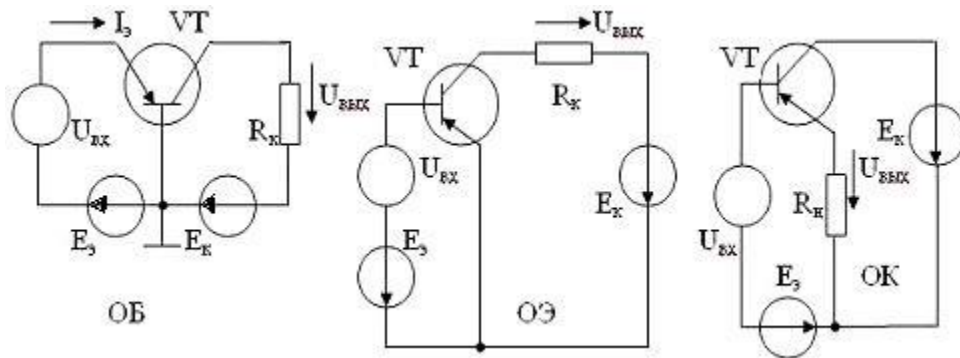


Биполярные транзисторы

Важность способа включения транзистора состоит в том, что схемы в зависимости от этого приобретают разные свойства при совершенно одинаковых параметрах транзисторов. Отличительным признаком схемы ОК является отсутствие ограничивающего резистора в цепи коллектора. Схему ОК часто называют *эмиттерным повторителем*.



Принцип усиления входного сигнала состоит в том, что входной сигнал воздействует на базовую (управляющую) цепь транзистора и вызывает изменение сопротивления основной (управляемой) цепи (коллектор-эмиттер) транзистора, вследствие чего ток в этой цепи, созданный источником питания, будет изменяться, обеспечивая изменение выходного напряжения. При этом вследствие нелинейности характеристик транзистора малые изменения входного напряжения могут вызвать гораздо большие изменения выходного сигнала, создавая эффект усиления входного сигнала.



Биполярные транзисторы

Различают три основных режима работы транзистора: *активный, отсечки, насыщения*.

Активный режим – нормальный: эмиттер смещен в прямом направлении, коллектор – в обратном. *Инверсный режим* – наоборот. Транзистор работает как усилитель сигналов.

Режим отсечки: оба перехода смещены в обратном направлении. Этот режим характеризует *закрытое* состояние транзистора (транзистор заперт), при котором его сопротивление максимально, токи – минимальны.

Режим насыщения характеризует *открытое* состояние транзистора, когда его сопротивление минимально, а токи определяются внешними источниками, но не должны превышать некоторых допустимых значений. В режиме насыщения оба перехода транзистора с помощью внешних напряжений смещены в прямом направлении.

Открытое и закрытое состояние работы транзистора (ключевой режим) используется в преобразователях постоянного тока в переменный, преобразователях частоты переменного тока, в устройствах автоматики, в вычислительной технике. Процессоры современных компьютеров построены на основе миллиардов транзисторов, работающих в ключевом режиме.



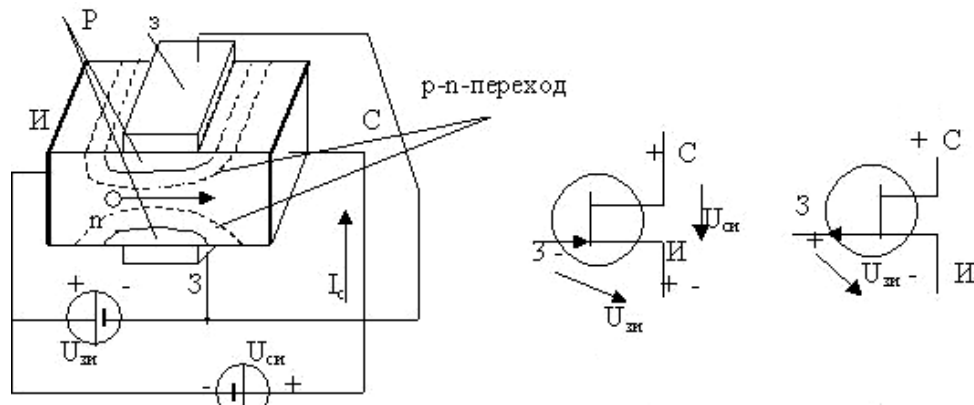
Полевые транзисторы (ПТ)

Полевой транзистор (ПТ) – это полупроводниковый прибор, работа которого обусловлена током основных носителей зарядов, протекающим через проводящий канал, сопротивление которого управляется электрическим полем. Другое название (*униполярные* транзисторы) обусловлено тем, что ток в них создается носителями заряда одного знака (электронами или дырками). Полевые транзисторы имеют определенные преимущества перед биполярными транзисторами, такие как высокое входное сопротивление, малые мощности для управления, высокие частотные свойства, возможность работы при низких температурах, высокая технологичность изготовления.

Полевые транзисторы делятся на транзисторы с затвором в виде *p-n*-перехода (*с управляющим p-n-переходом*) и с изолированным затвором [со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП – транзисторы)], (другое название *МОП-транзисторы*).

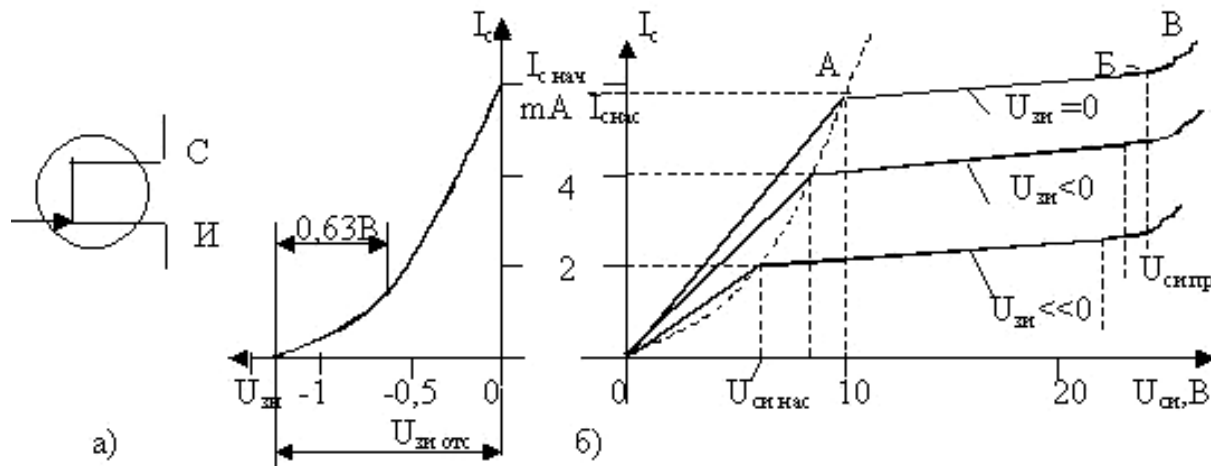
ПТ с управляющим p - n -переходом

Транзистор с управляющим p - n -переходом представляет собой пластину (участок) полупроводника p или n типа, от торцов которой сделаны отводы, называемые *сток* и *исток*, а вдоль пластины выполнен электрический переход (p - n -переход или барьер Шоттки), имеющий свой вывод, называемый *затвором*. На затвор подается такое по отношению к истоку напряжение, чтобы p - n -переход между затвором и кристаллом был смещен в обратном направлении.



ПТ с управляющим p - n -переходом

Стоко-затворная (а) и статические характеристики (б) полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа.



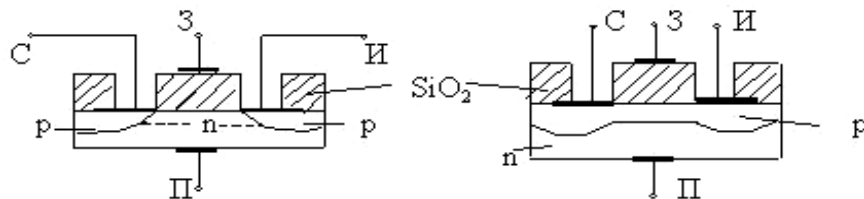
На участке ОА зависимость $I_c = f(U_{си})$ практически линейна и имеет большую крутизну. Участок АБ - область насыщения, участок БВ - область электрического пробоя.

Участок ОА похож на ВАХ резистора, поэтому полевые транзисторы (ПТ) можно использовать как **управляемое сопротивление**. Участок АБ используется **для усилительных режимов**.

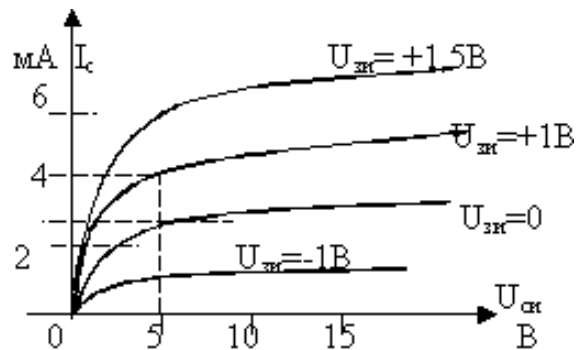
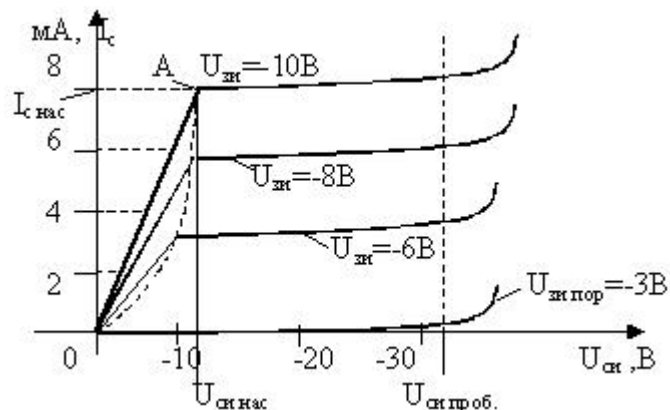
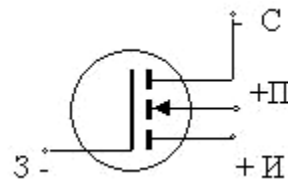
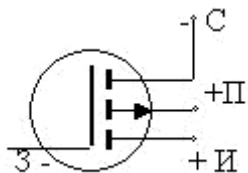
0,63В положение **термостабильной точки** (выбором режимов работы возможно добиться постоянства тока стока в широком диапазоне температур)

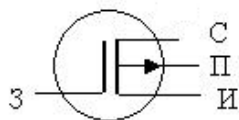
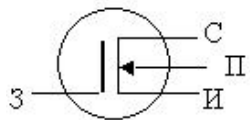


Выделяют два вида МОП-транзисторов: *с индуцированным каналом* (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам), *со встроенным каналом* (канал создается при изготовлении). В отличие от ПТ с управляющим p - n -переходом у МОП-транзисторов металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод П от кристалла, называемый *подложкой*.



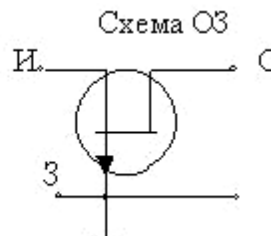
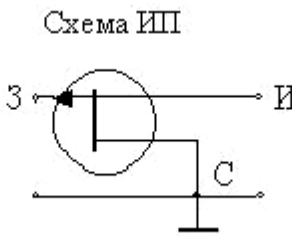
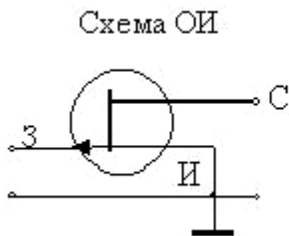
Выходные характеристики МОП-транзистора *с индуцированными каналами* p -типа и n -типа.





Выходные характеристики МОП-транзистора *со встроенным каналом* n -типа качественно не отличаются от характеристик МОП-транзистора *с индуцируемым каналом* n -типа. Это же справедливо и для МОП-транзисторов *со встроенным каналом* p -типа. У транзисторов *со встроенным каналом* можно получить относительно большие токи – это их преимущество.

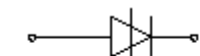
Способы включения полевых транзисторов (ПТ) в электрическую схему на примере полевого транзистора *с управляющим p - n -переходом* и каналом p -типа: по схеме с общим истоком (ОИ), по схеме с общим стоком (истоковый повторитель (ИП)), по схеме с общим затвором (ОЗ).



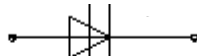
Динисторы и тиристоры – это полупроводниковые приборы, имеющие четырёхслойную структуру, состоящую из чередующихся областей p и n -полупроводника. Используются преимущественно в силовой электронике, как мощные управляемые коммутаторы силовых электрических цепей.



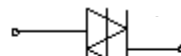
Обозначения динисторов



Проводящий
в обратном направлении

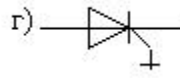
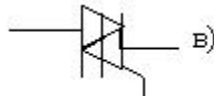
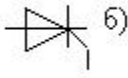
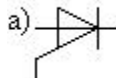


Проводящий
в прямом направлении



Динистор
симметричный

Обозначения тиристоров



(а) управляемый по аноду, (б) управляемый по катоду, (в) симметричный (симистор), (г) запираемый

**Спасибо
за внимание!**

itMO *re than a*
UNIVERSITY

Никитина Мария Владимировна,
mvnikitina@itmo.ru