

Федеральное агентство связи  
Сибирский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики  
СибГУТИ

Лабораторная работа №6  
**Исследование полевого транзистора**  
Вариант 4

Выполнили: студенты 2 курса группы ИП-013

Иванов.Л.Д, Клопот.А.А

Преподаватель, ведущий занятие: Гонцова Александра Владимировна

Новосибирск, 2021 г.

**Цель работы:** с помощью учебного лабораторного стенда LESO3 ознакомиться с принципом действия полевого транзистора (ПТ). Изучить его характеристики. Изучить простейший усилитель на ПТ.

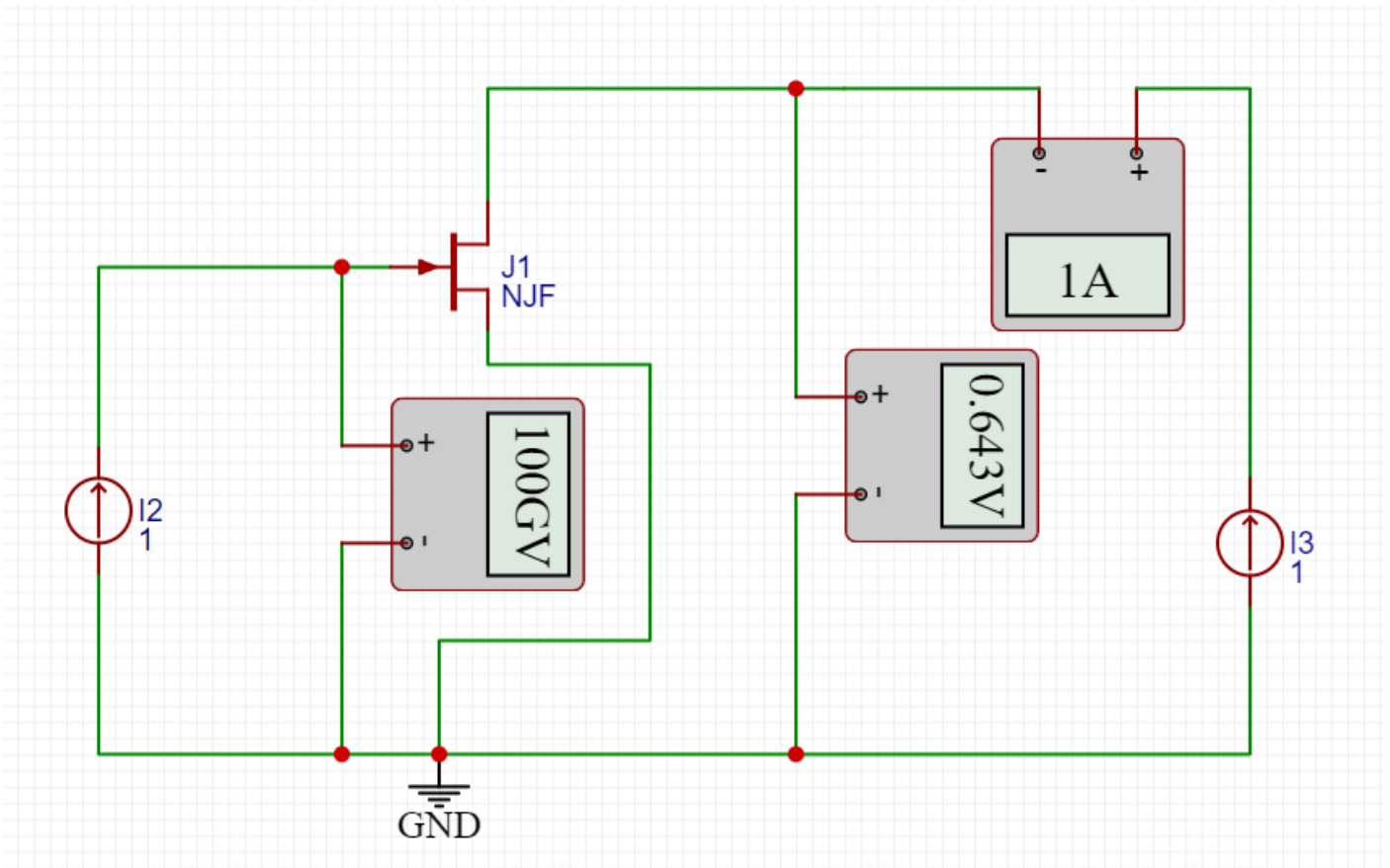


Рисунок 1 – Схема исследования передаточной характеристик ПТ

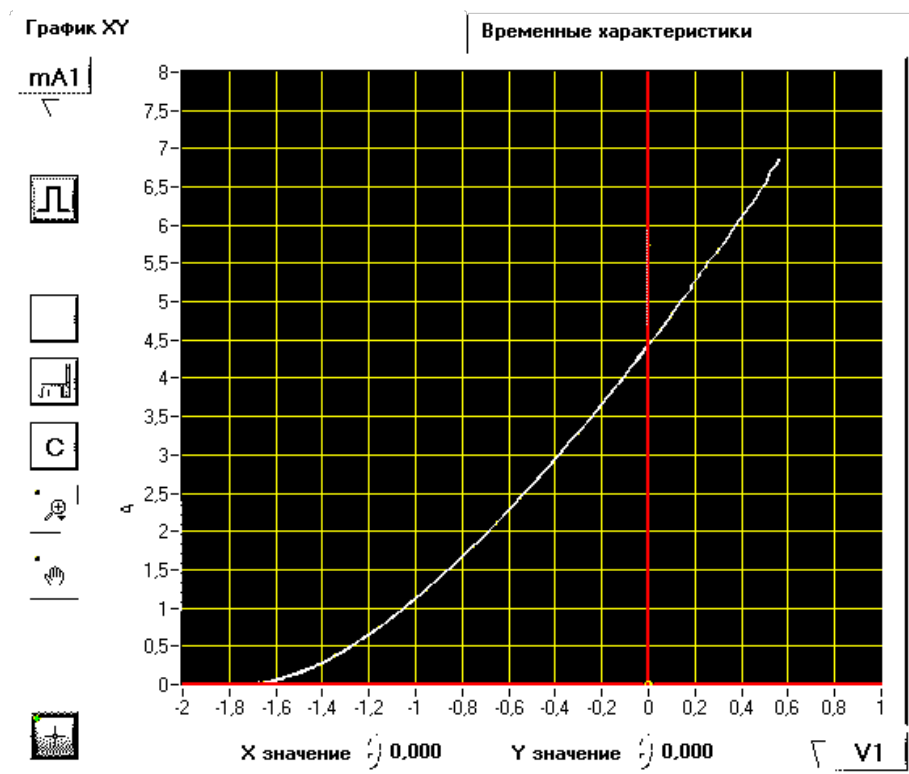


График 1 – Передаточная характеристика ПТ

$$U_{30} = -1.5 \text{ В}; I_{c0} = 4.49 \text{ мА}; S = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{5 - 1}{0.16 - (-1.05)} = \frac{4}{1.21} = 3.3$$

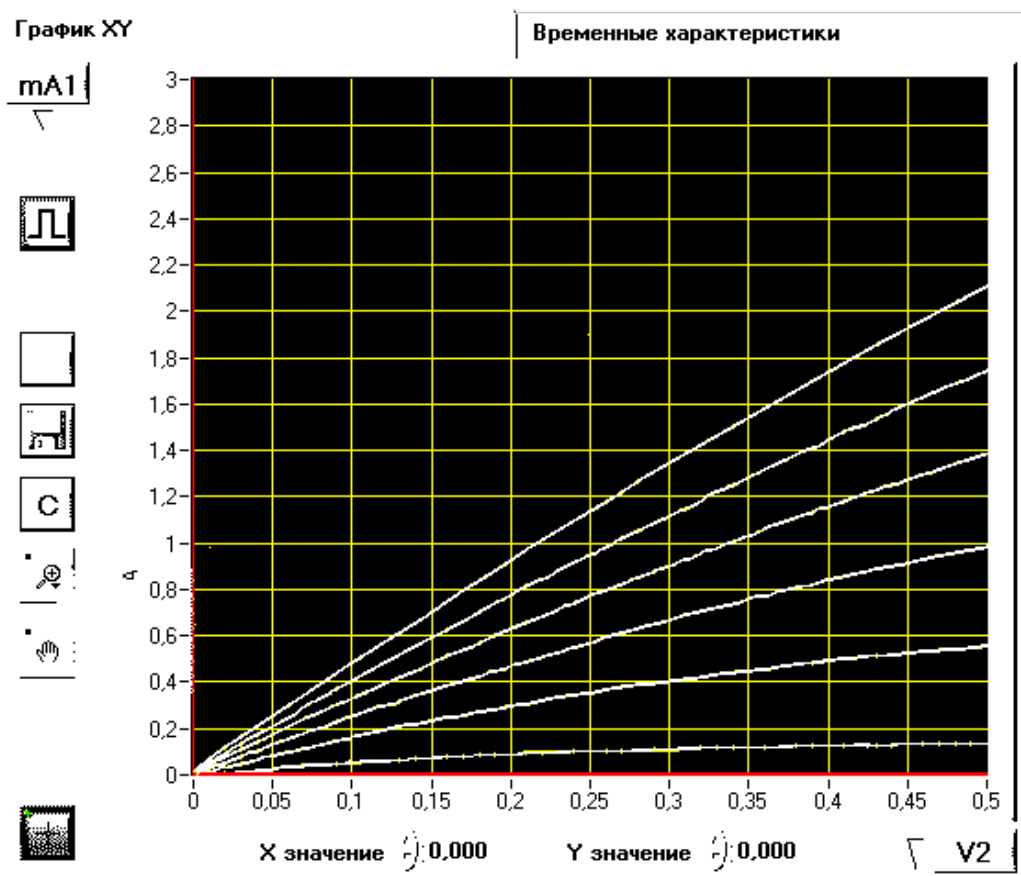
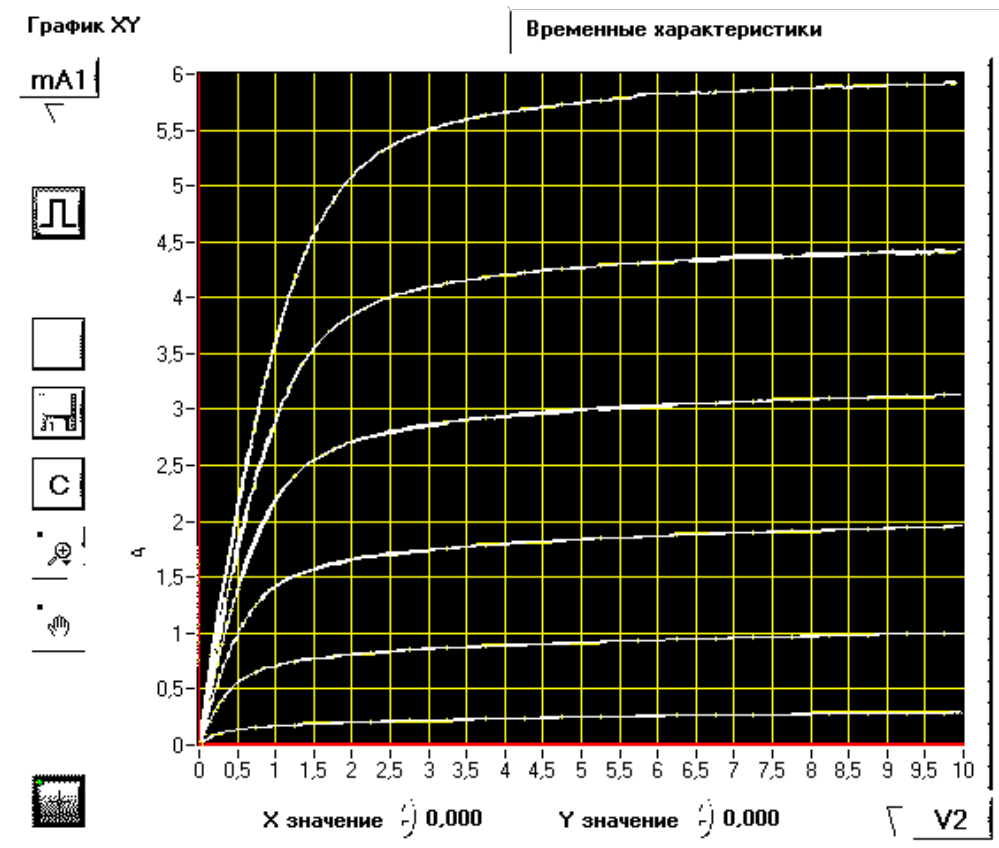


График 2 – Выходные характеристики ПТ

График 3 – Семейство выходных характеристик ПТ в крутой области

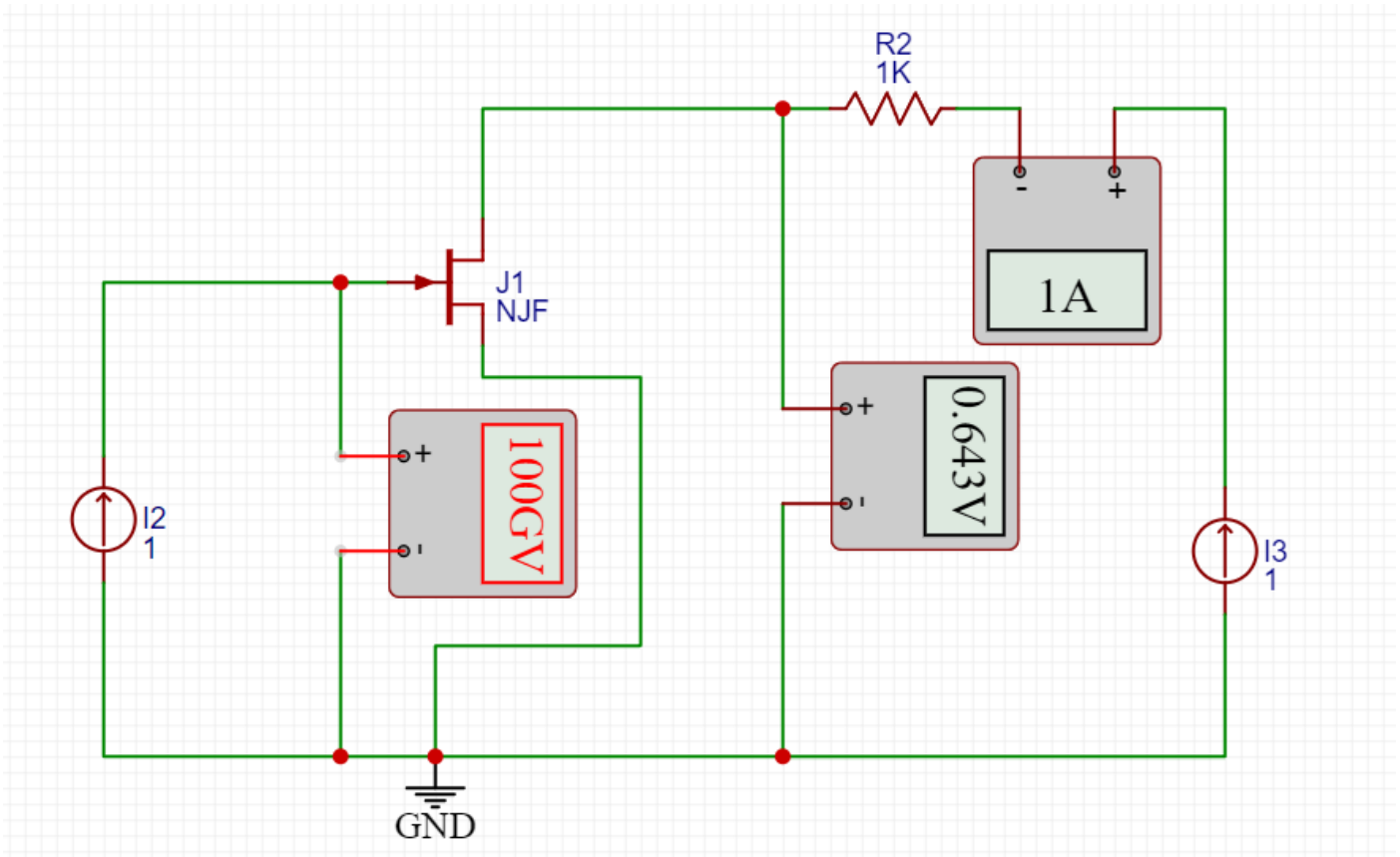


Рисунок 2 – Схема исследования усилителя на полевом транзисторе

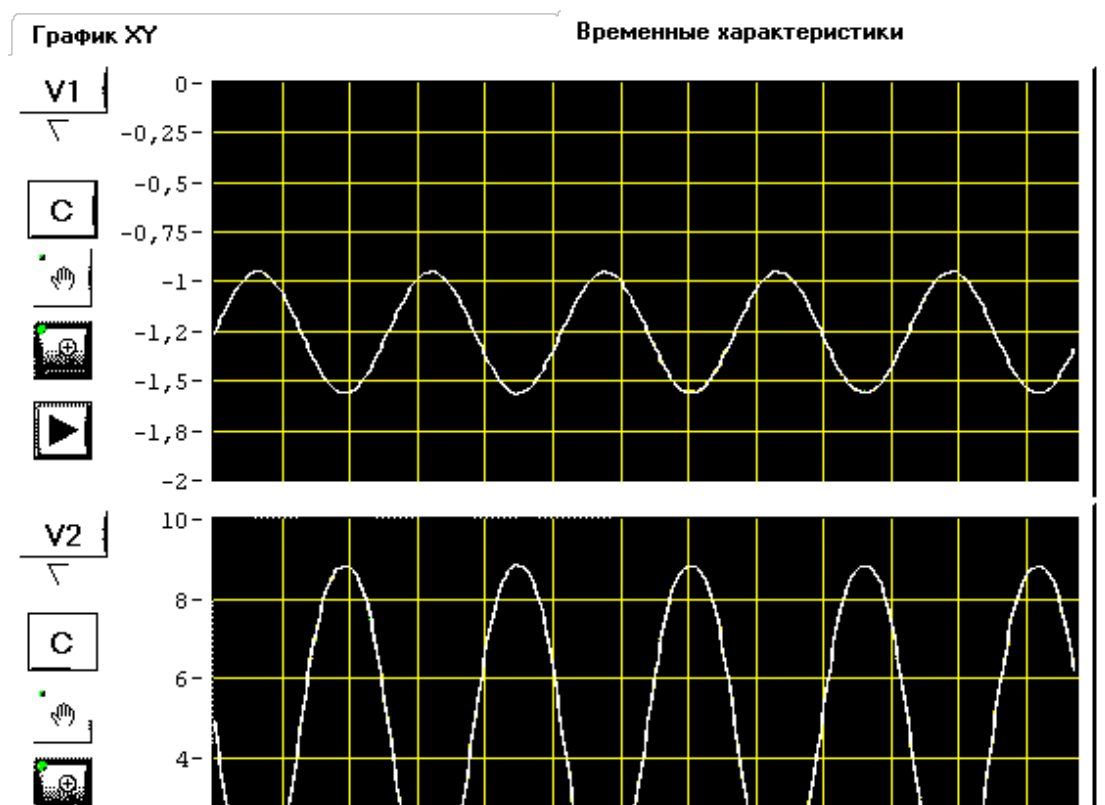


График 4 – Осциллограмма входного и выходного сигнала усилителя на ПТ

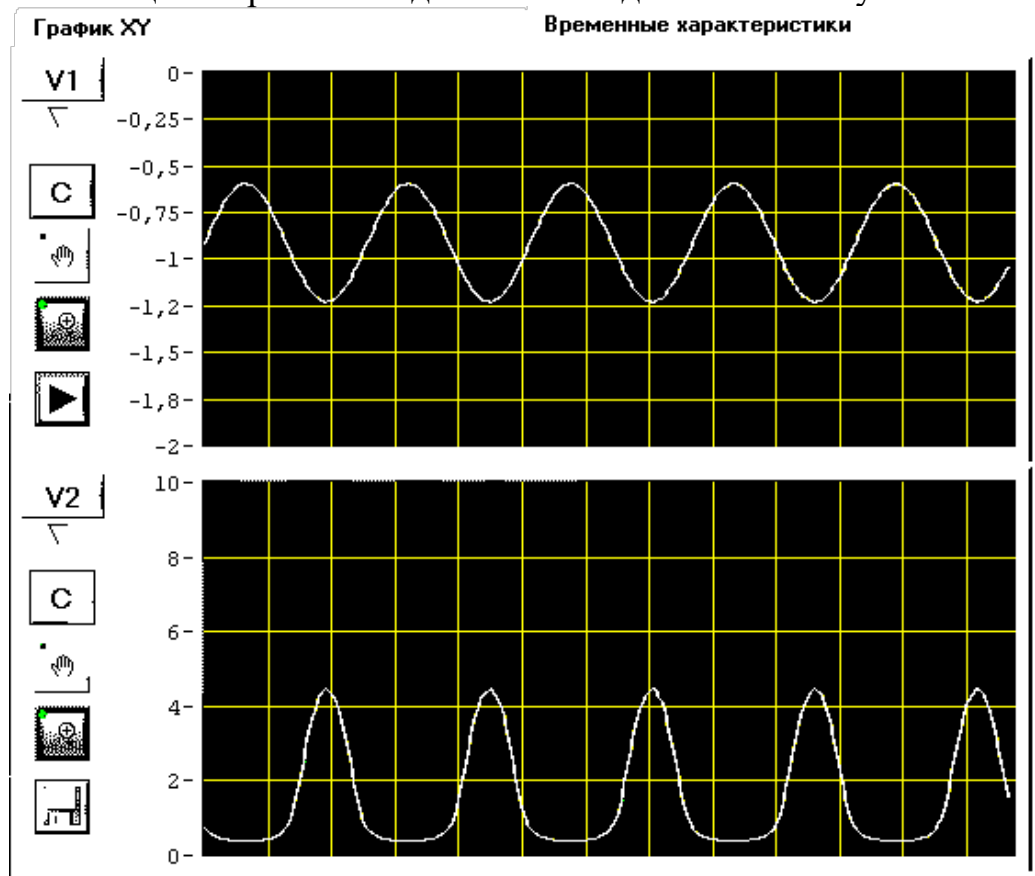


График 5 – Осциллограмма входного и выходного сигнала при искажениях «снизу»

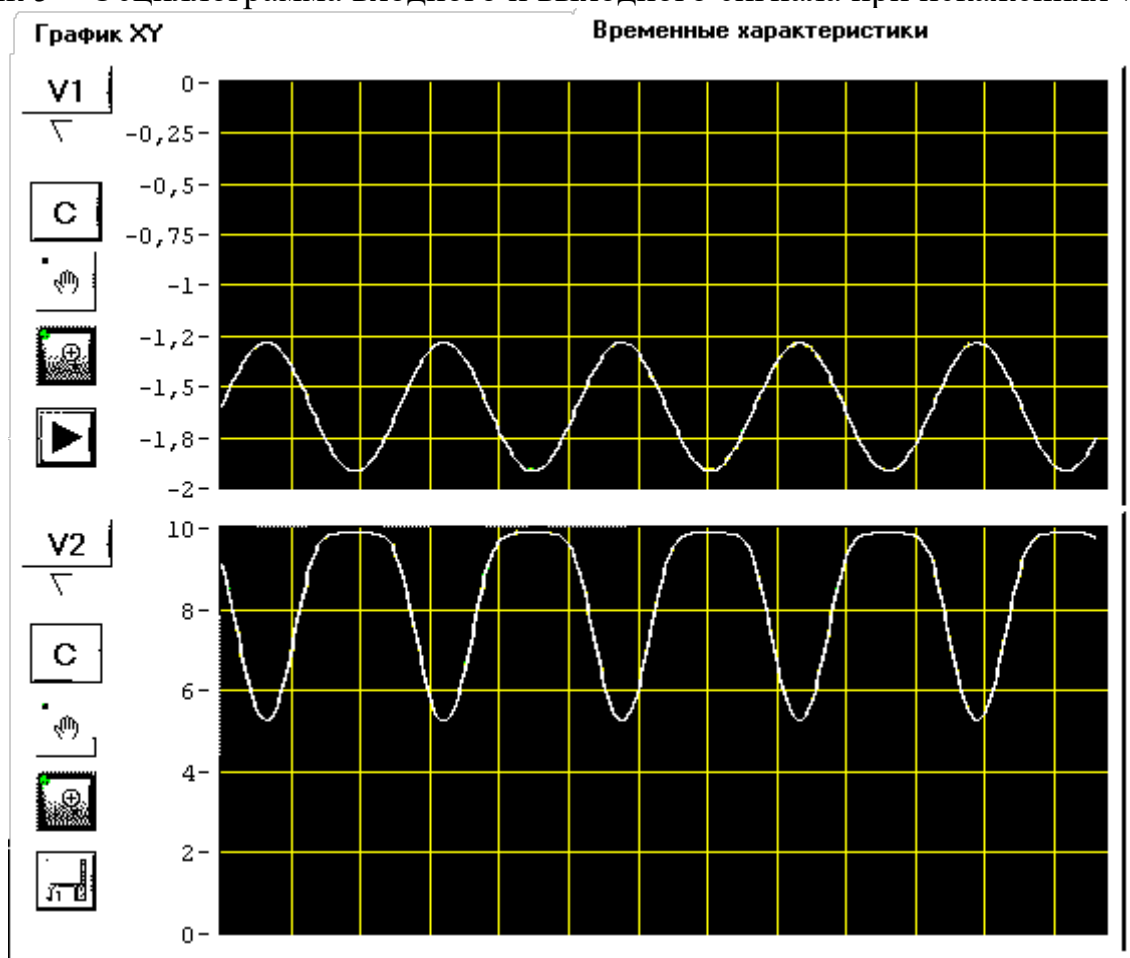


График 6 – Осциллограмма входного и выходного сигнала при искажениях «сверху»

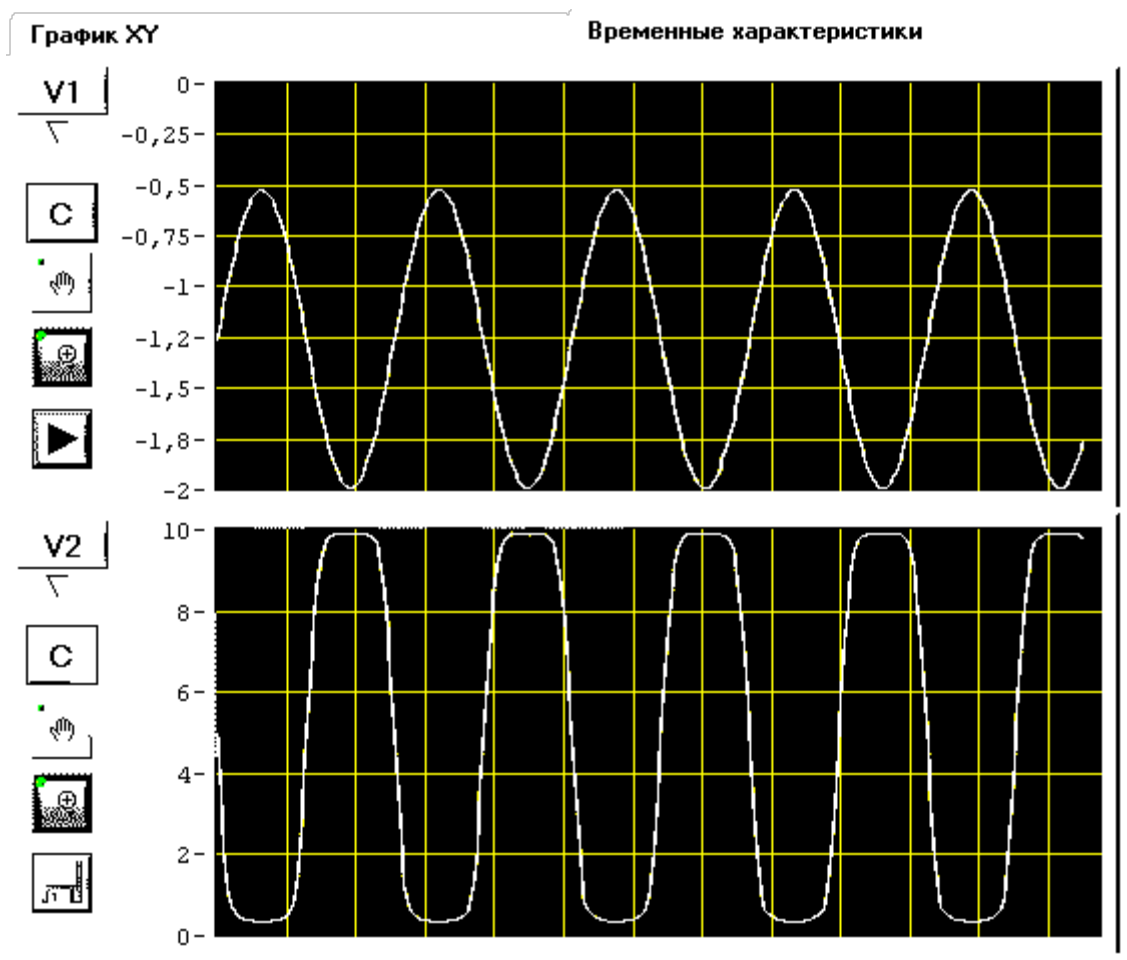


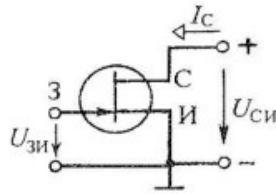
График 7 – осциллограмма входного и выходного сигнала при искажениях

$$K_y = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{9.8 - 0.25}{-0.5 - (-2)} = \frac{9.55}{1.5} = 6.37$$

Выводы: Ознакомились с принципом действия полевого транзистора (ПТ), а также изучили его характеристики. Кроме этого, изучили простейший усилитель на ПТ.

## Контрольные вопросы.

### 1. Устройство полевого транзистора.



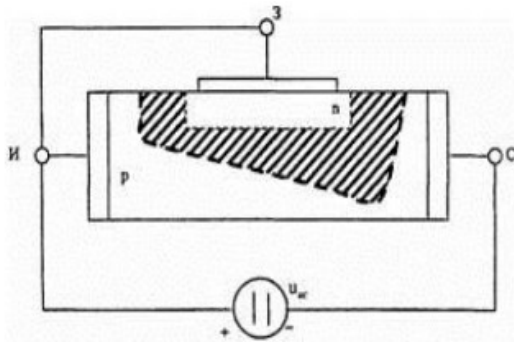
Три основных вывода у полевого транзистора:  
: **исток** (источник носителей тока); **затвор** (управляющий электрод) и **сток** (электрод, куда стекают носители).

**Полевой транзистор** — полупроводниковый прибор, в котором ток изменяется в результате действия «электрического поля», создаваемого напряжением на затворе.

Протекание в полевом транзисторе рабочего тока обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие приборы часто включают в более широкий класс униполярных электронных приборов (в отличие от биполярных).

Структуру полевого транзистора реализуют как минимум двумя способами. Различают полевые транзисторы **с управляющим р-п переходом** и **с изолированным затвором**.

По способу создания канала различают полевые транзисторы с затвором в виде управляющего р-п-перехода и с изолированным затвором (МДП - или МОП - транзисторы): **встроенным каналом** и **индуцированным каналом**.



В основе устройства лежит пластинка из полупроводника с проводимостью (например) р-типа. На противоположных концах она имеет электроды, подав напряжение на которые получим ток от истока к стоку. Сверху на этой пластинке есть область с противоположным типом проводимости, к которой подключен третий электрод — затвор.

Между затвором и р-областью под ним (**каналом**) возникает р-п переход.

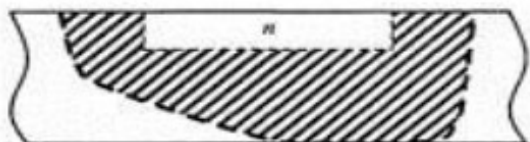
Поскольку n-слой значительно уже канала, то большая часть обедненной подвижными носителями заряда области перехода будет приходиться на р-слой. Соответственно, если подать на переход напряжение обратного смещения, то, закрываясь, он значительно увеличит сопротивление канала и уменьшит ток между истоком и стоком. Таким образом, происходит регулирование выходного тока транзистора с помощью напряжения (электрического поля) затвора.



Итак, в **рабочем режиме** полевого транзистора с управляющим р-п переходом напряжение на затворе должно быть либо нулевым (канал открыт полностью), либо обратным.

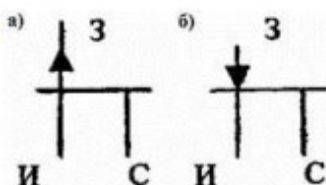
Если величина обратного напряжения станет настолько большой, что запирающий слой закроет канал, то транзистор перейдет в **режим отсечки**.

Даже при нулевом напряжении на затворе, между затвором и стоком существует обратное напряжение, равное напряжению исток-сток. Вот почему р-п переход имеет такую неровную форму, расширяясь к области стока.



Можно сделать транзистор с каналом n-типа и затвором р-типа. Сущность его работы при этом не изменится.

(*а* — с каналом р-типа, *б* — с каналом n-типа). Стрелка указывает направление от р-слоя к n-слою.



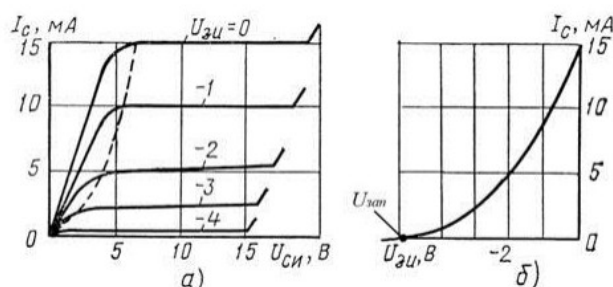
*Можно провести следующую аналогию: р-п переход — это плотина, перекрывающая поток носителей заряда от истока к стоку. Увеличивая или уменьшая на нем обратное напряжение, мы открываем/закрываем на ней шлюзы, регулируя «подачу воды» (выходной ток).*

Таким образом, полевой транзистор с затвором в виде р-п-перехода представляет собой сопротивление, величина которого регулируется внешним напряжением.



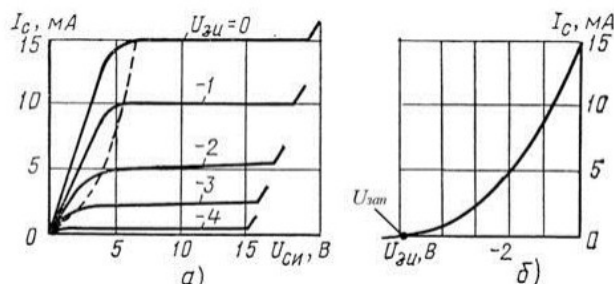
## 2. Основные параметры полевого транзистора.

ВАХ полевого транзистора



Зависимость тока стока  $I_c$  от напряжения при постоянном напряжении на затворе  $U_{зи}$  определяет выходные, или стоковые, характеристики полевого транзистора.

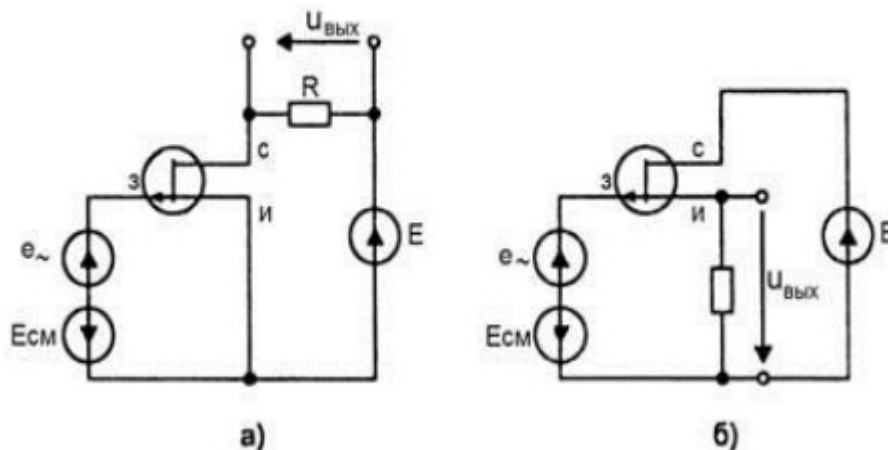
На начальном участке характеристик  $U_{си} + |U_{зи}| < U_{з\text{ап}}$  ток стока  $I_c$  возрастает с увеличением  $U_{си}$ . При повышении напряжения сток - исток до  $U_{си} = U_{з\text{ап}} - |U_{зи}|$  происходит перекрытие канала и дальнейший рост тока  $I_c$  прекращается (участок насыщения). Отрицательное напряжение  $U_{зи}$  между затвором и истоком смещает момент перекрытия канала в сторону меньших значений напряжения  $U_{си}$  и тока стока  $I_c$ . Участок насыщения является рабочей областью выходных характеристик полевого транзистора. Дальнейшее увеличение напряжения  $U_{си}$  приводит к пробое р-п перехода между затвором и каналом и выводит транзистор из строя.



На ВАХ  $I_c = f(U_{зи})$  показано напряжение  $U_{з\text{ап}}$ . Так как  $U_{зи} \leq 0$  р-п переход закрыт и ток затвора очень мал, порядка  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  А, поэтому к основным преимуществам полевого транзистора, по сравнению с биполярным, относится высокое входное сопротивление, порядка  $10^{10} \dots 10^{13}$  Ом. Кроме того, они отличаются малыми шумами и технологичностью изготовления.

## 3. Схемы включения полевых транзисторов.

Практическое применение имеют две основные схемы включения. Схема с общим истоком (рис. а) и схема с общим стоком (рис. б)



#### 4. Режимы работы полевого транзистора.

*Активный режим* — соответствует случаям, рассмотренным при анализе усилительных свойств полевых транзисторов. Именно в активном режиме транзистор наилучшим образом проявляет свои усилительные свойства. Часто такой режим называют *основным*, *усилительным* или *нормальным* (на усилительные свойства полевого транзистора также оказывает влияние состояние канала, а именно находится ли он в режиме насыщения — см. ниже). При рассмотрении полевых транзисторов мы практически всегда (за исключением ключевых схем) имеем дело с активным режимом, но здесь имеется одна тонкость, о которой также часто говорят, как о режиме работы транзистора (или как о *режиме работы затвора*). В различных видах полевых транзисторов и при различных внешних напряжениях затвор может оказывать два вида воздействий на канал: в первом случае он препятствует протеканию тока через канал, уменьшая число носителей зарядов, проходящих через него (такой режим называют *режимом обеднения канала*), во втором случае затвор, наоборот, стимулирует протекание тока через канал, увеличивая число носителей зарядов в потоке (*режим обогащения канала*). Часто просто говорят о *режиме обеднения* и *режиме обогащения*.

*Инверсный режим* — по процессам в канале противоположен активному режиму, т.е. поток носителей зарядов в канале протекает не от истока к стоку, а наоборот — от стока к истоку. Для инверсного режима требуется только изменение полярности напряжения на канале, полярность напряжения на затворе остается неизменной. В таком режиме транзистор также может использоваться для усиления. Обычно из-за конструктивных различий между областями стока и истока усилительные свойства транзистора в инверсном режиме проявляются хуже, чем в режиме активном. Данный режим практически никогда не используется в усилительных схемах, но для аналоговых переключателей на полевых транзисторах он оказывается полезен. Вообще, в случае полевых транзисторов о режиме работы вспоминают гораздо реже, чем для биполярных. Дело здесь в том, что каждый конкретный тип полевого транзистора имеет конструкцию, строго ориентированную на выполнение какой-то конкретной функции (усиление слабых сигналов, ключ и т.п.), все документируемые параметры транзистора в этом случае характеризуют его работу именно в основном режиме при выполнении предназначенной функции. Поэтому имеет смысл говорить просто о *нормальном режиме работы*, когда все соответствует документации, или о *ненормальном*, который в документации просто не предусмотрен (да и вряд ли кому-то понадобится использовать его в схемах).

*Режим насыщения* — характеризует состояние не всего транзистора в целом, как это было для биполярных приборов, а только токопроводящего канала между истоком и стоком. Данный режим соответствует насыщению канала основными носителями зарядов. Такое явление как *насыщение* является одним из важнейших физических свойств полупроводников. Оказывается, что при приложении внешнего напряжения к полупроводниковому каналу, ток в нем линейно зависит от этого напряжения лишь до определенного предела (*напряжение насыщения*), а по достижении этого предела стабилизируется и остается практически неизменным вплоть до пробоя структуры. В приложении к

полевым транзисторам это означает, что при превышении напряжением сток—исток некоторого порогового уровня оно перестает влиять на ток в цепи. Если для биполярных транзисторов режим насыщения означал полную потерю усилительных свойств, то для полевых это не так. Здесь наоборот, насыщение канала приводит к повышению коэффициента усиления и уменьшению нелинейных искажений. До достижения напряжением сток—исток уровня насыщения ток через канал линейно увеличивается с ростом напряжения (т.е. ведет себя так же, как и в обычном резисторе).

*Режим отсечки* — режим, в котором ток через канал полевого транзистора не протекает. Переход полевого транзистора в режим отсечки происходит по достижении напряжением на затворе определенного порога (*напряжение отсечки*). В полевых транзисторах с управляющим р-п-переходом это имеет место при постепенном увеличении обратного смещения на переходе, а в МДП-транзисторах со встроенным каналом при увеличении разности потенциалов между истоком и затвором при условии работы в режиме обеднения канала. В МДП-транзисторах с индуцированным каналом режим отсечки имеет место при нулевой разности напряжений между истоком и затвором, а по достижении напряжения отсечки (или *порогового напряжения*) канал открывается. Поскольку выходной ток транзистора в режиме отсечки практически равен нулю, он используется в ключевых схемах и соответствует размыканию транзисторного ключа.

## 5. Сравнение усилителей на полевых транзисторах и на биполярных транзисторах по параметрам.

Во-первых, управляющая цепь полевых транзисторов потребляет ничтожную энергию, так как входное сопротивление этих приборов очень велико. Как правило, усиление мощности и тока в полевых транзисторах много больше, чем в биполярных. Во-вторых, вследствие того, что управляющая цепь изолирована от выходной цепи, значительно повышаются надежность работы и помехоустойчивость схем на полевых транзисторах. В-третьих, полевые транзисторы имеют низкий уровень собственных шумов, что связано с отсутствием инжекции и свойственных ей флуктуаций. Наконец, в-четвертых, полевые транзисторы, вообще говоря, обладают более высоким собственным быстродействием, так как в них нет инерционных процессов накопления и рассасывания носителей заряда.

Однако полевые транзисторы имеют и недостатки. Вследствие относительно высокого сопротивления канала в открытом состоянии падение напряжения на открытом полевом транзисторе заметно больше, чем падение напряжения на насыщенном биполярном транзисторе. Этот недостаток усугубляется еще и тем, что температурная зависимость сопротивления канала сильнее, чем зависимость от температуры напряжения насыщения биполярного транзистора.

Биполярные транзисторы	Полевые транзисторы
Управляемый физический процесс – инжекция неосновных носителей заряда: изменяется ток управления – изменяется поток инжектированных носителей заряда, что приводит к изменению выходного тока	Управляемый физический процесс – эффект поля, вызывающий изменение концентрации носителей заряда в канале: изменяется управляющее напряжение – изменяется проводимость канала, что приводит к изменению выходного тока
Выходной ток обеспечивается носителями обоих знаков (дырками и электронами)	Выходной ток обеспечивается основными носителями одного знака (или дырками, или электронами)
Прибор управляется током, так как на входе имеется прямосмещенный <i>p</i> -переход и входное сопротивление мало	Прибор управляется напряжением; входное сопротивление очень большое, так как входная цепь от выходной изолирована обратносмещенным <i>p</i> -переходом или слоем диэлектрика
При управлении от интегральных схем требуется дополнительное усиление тока	Возможно непосредственное управление от интегральных схем
Относительно небольшой коэффициент усиления по току	Очень большой коэффициент усиления по току
Необходимость специальных мер по повышению помехоустойчивости	Высокая помехоустойчивость
Низкая теплостойкость: с увеличением тока растет температура структуры, что приводит к большему увеличению тока	Высокая теплостойкость: рост температуры структуры приводит к увеличению сопротивления канала, и ток уменьшается
Высокая вероятность саморазогрева и вторичного пробоя	Низкая вероятность саморазогрева и вторичного пробоя
Высокая чувствительность к токовым перегрузкам	Низкая чувствительность к токовым перегрузкам
Необходимость выравнивания токов в параллельном соединении приборов	Равномерное распределение тока в параллельном соединении приборов