

## Занятие 5

### Полевые транзисторы (ПТ)

Полевыми или униполярными транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых изменение тока производится изменением проводимости проводящего канала с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока.

Прохождение тока в канале только одним типом зарядов.

Электроды, подключенные к каналу, называются стоком (Drain) и истоком (Source).

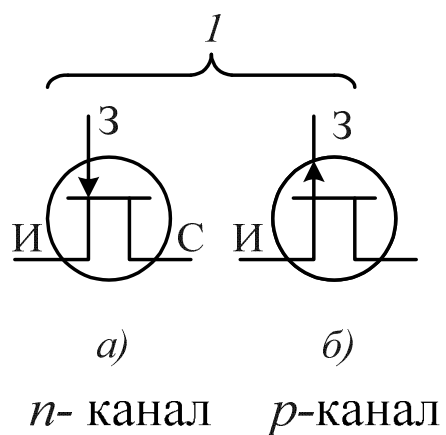
Управляющий электрод называется затвором (Gate).

Напряжение управления прикладывается между затвором и истоком.

Входное сопротивление полевого транзистора бесконечно большое, входной ток равен нулю !

# Классификация полевых транзисторов

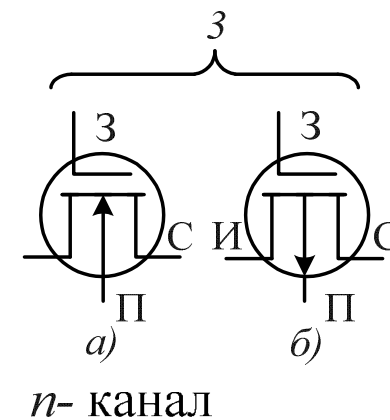
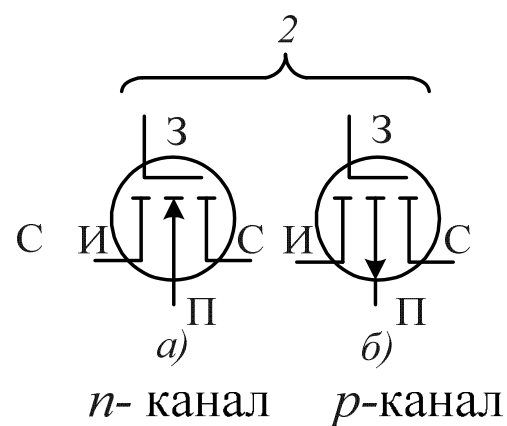
Полевые транзисторы с управляющим p-n переходом



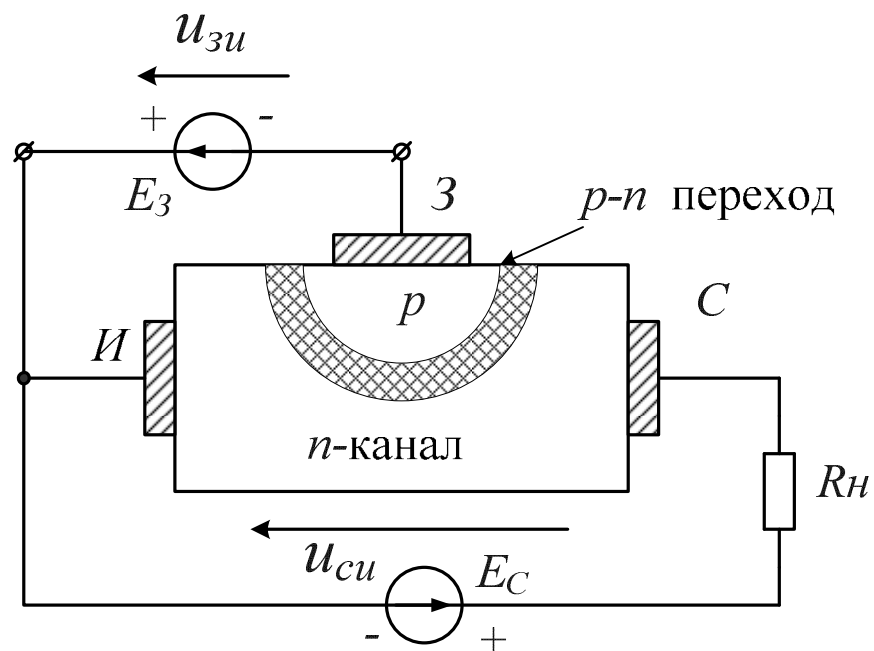
Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП)

С индуцированным каналом

Со встроенным каналом



## Устройство полевого транзистора с управляющим $p$ - $n$ переходом

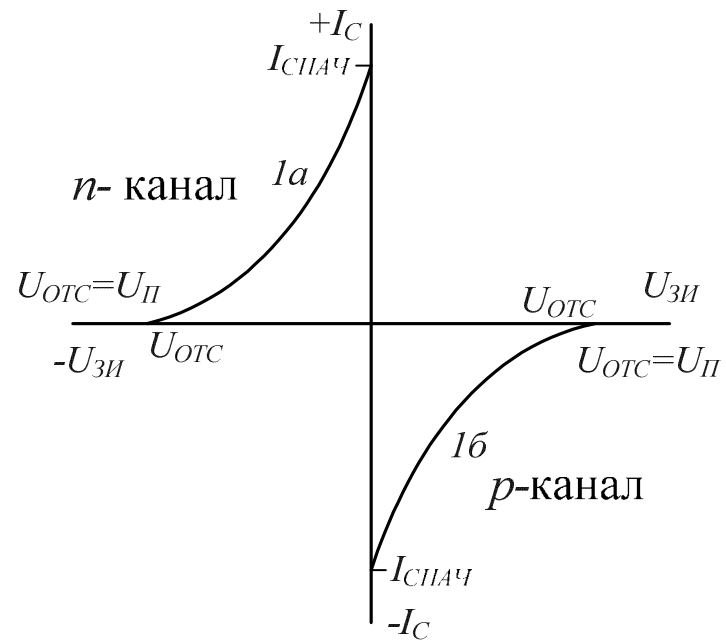


На затворе  $u_{зи} < 0$ ,  $p$ - $n$  переход заперт. С увеличением обратного напряжения расширяется  $p$ - $n$  переход, уменьшается сечение проводящего канала. Отрицательное управляющее напряжение уменьшает ток между истоком и стоком.

Передаточные характеристики полевых транзисторов, которые выражают зависимость тока стока от напряжения затвор-исток  $I_C(U_{зи})$ .

ПТ с  $n$ -каналом открывается при  $U > U_{отс}$ . При нулевом значении  $U_{зи}$  проходит начальный ток  $I_{снач}$ .

# Передаточная характеристика ПТ с управляющим $p$ - $n$ переходом



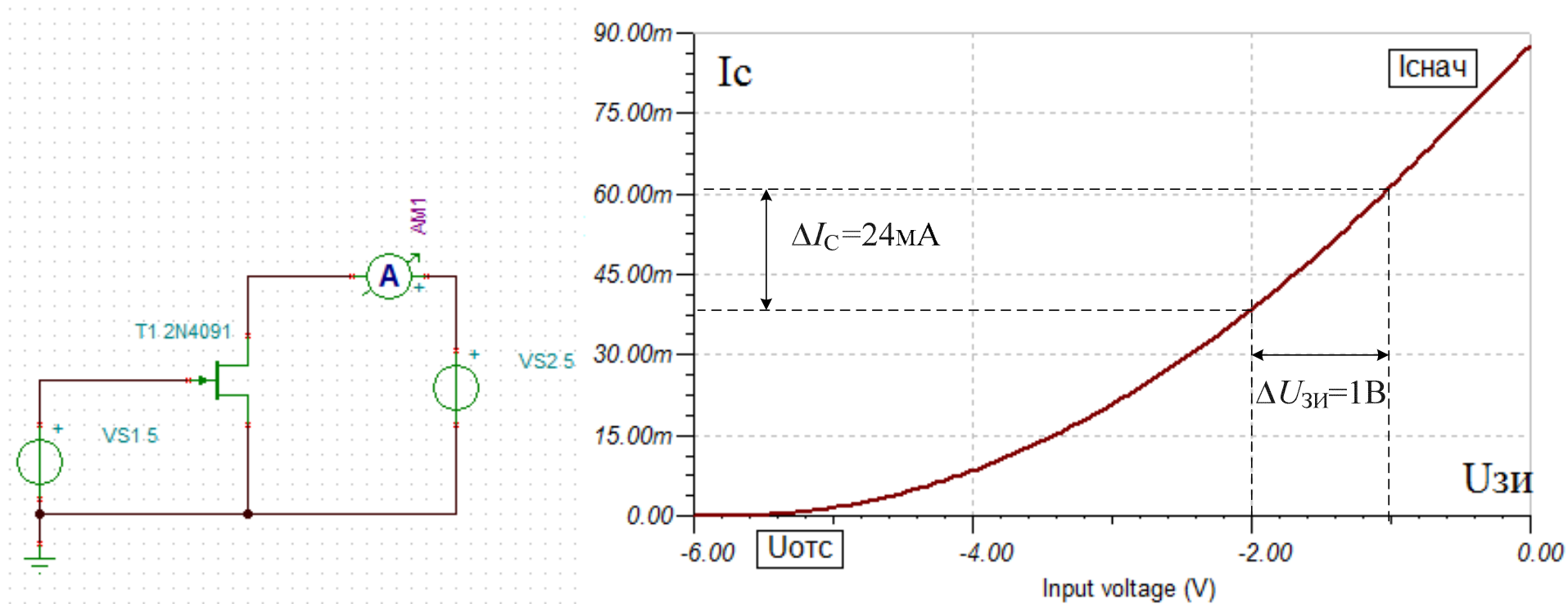


Рис.5.1

Передаточная характеристика ПТ с управляющим  $p-n$  переходом

## Выходные характеристики ПТ с n-каналом

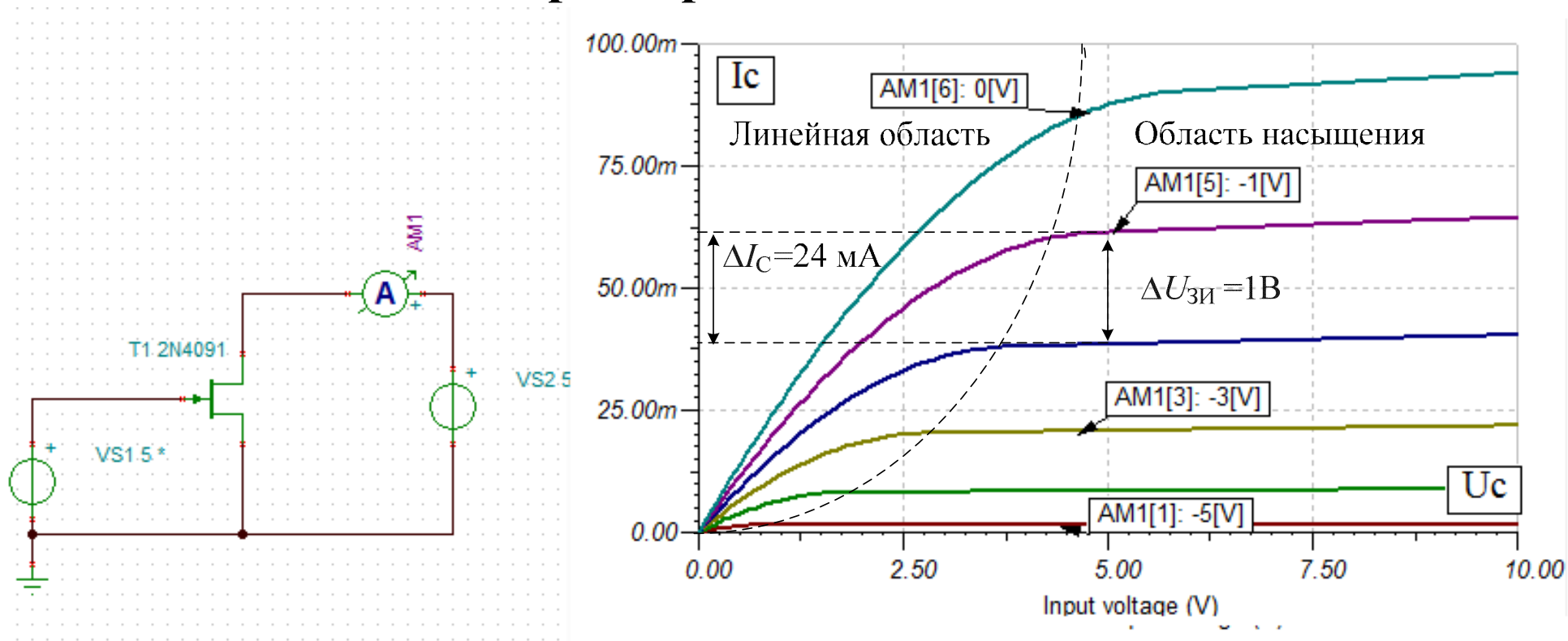


Рис.5.2

В линейной области ПТ используют как *управляемое сопротивление*.

В области насыщения ПТ используют как усилительный элемент. Усилительные свойства определяются крутизной входной ВАХ:

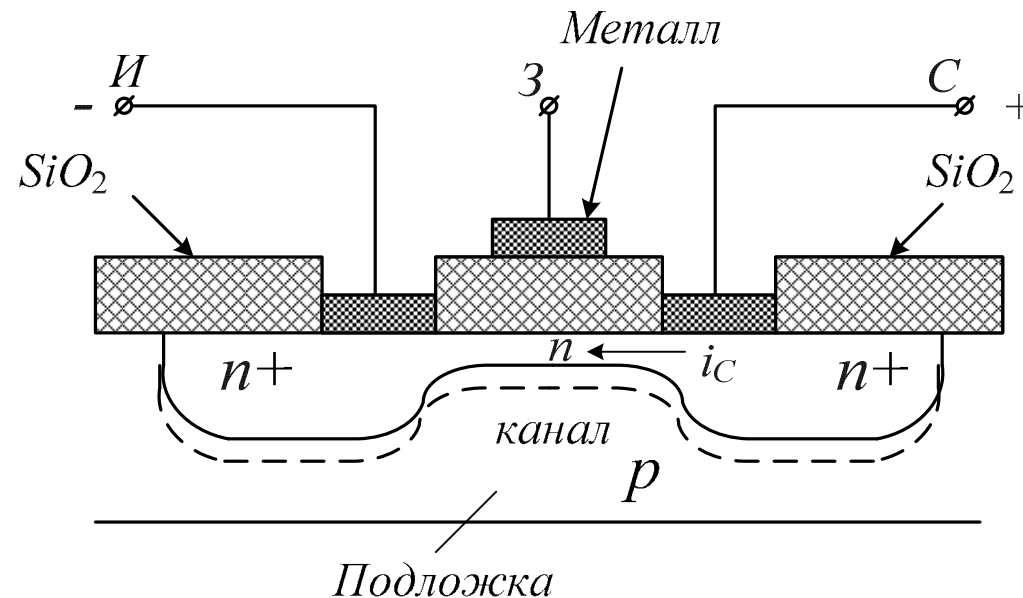
$$S = \frac{di_c}{dU_{зи}} = 24 \frac{mA}{B}.$$

Крутизну определяют по передаточной характеристике ПТ.

**Устройство полевого транзистора с изолированным затвором  
(МДП – металл-диэлектрик-полупроводник)**

**(МОП – металл – оксид кремния – полупроводник)**

1. Полевые транзисторы со встроенным каналом



Исток и сток имеют сильно легированные области, обогащенные носителями.

Встроенный канал обогащен носителями, существует при  $U_{зи} = 0$ , протекает ток  $I_{сНАЧ}$ .

При  $U_{зи} > 0$  электроны втягиваются в канал,  $i_C$  возрастает.

При  $U_{зи} < 0$  ток  $i_C$  падает.

Передаточная ВАХ ( $n$ -канал)

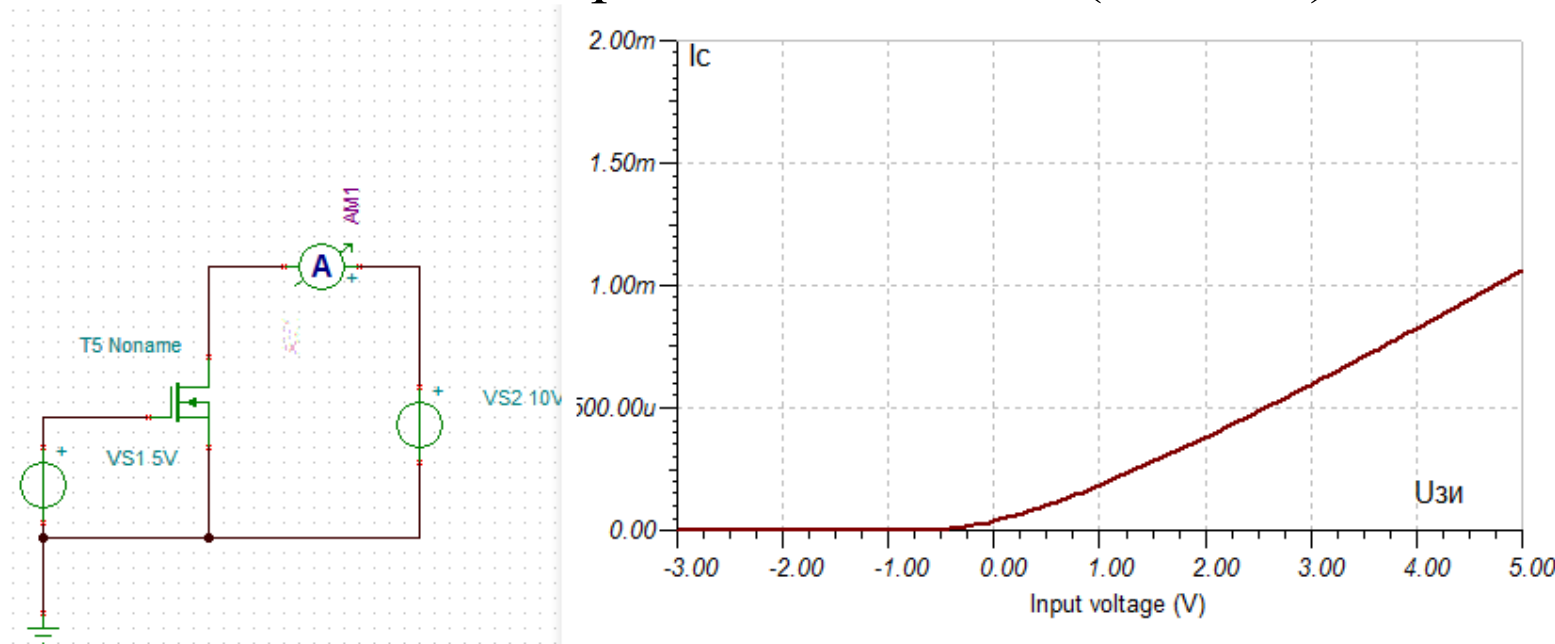


Рис.5.3



## Выходные ВАХ

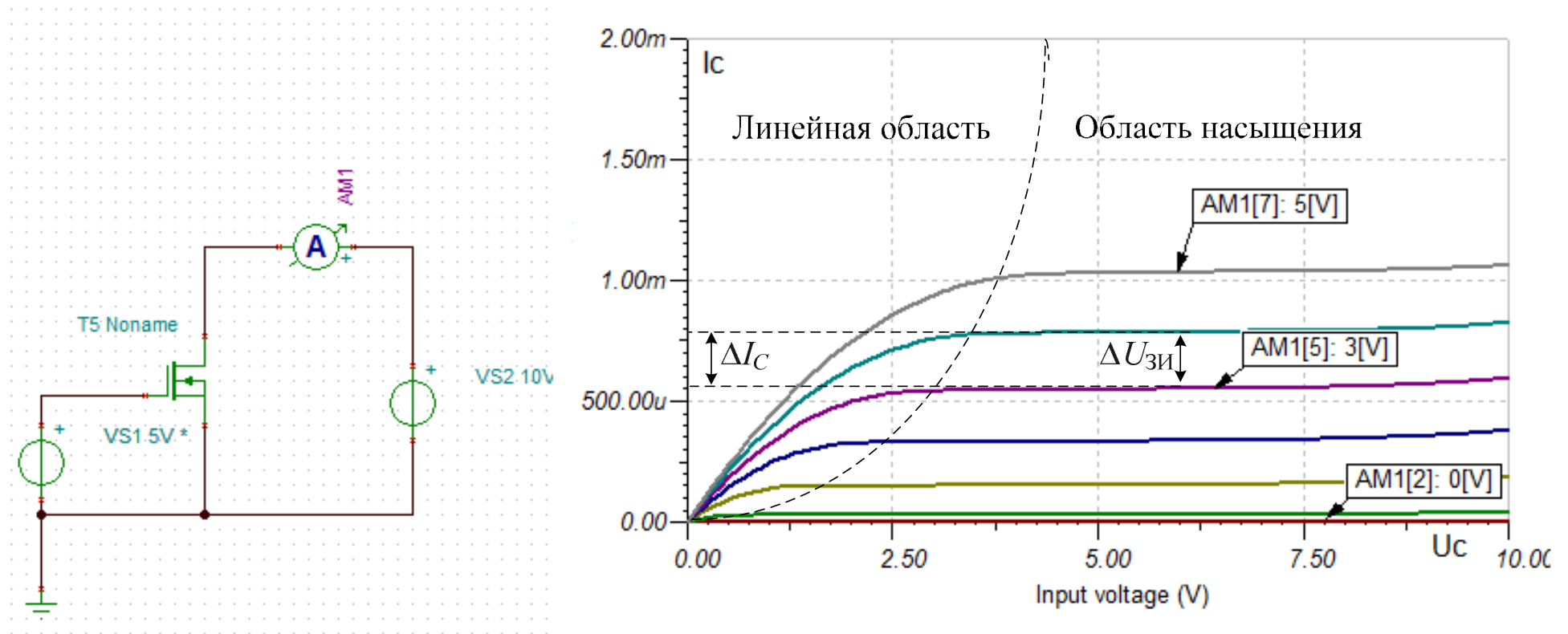


Рис. 5.4

Полевые транзисторы со встроенным  $p$  - каналом работают при отрицательных напряжениях на истоке.

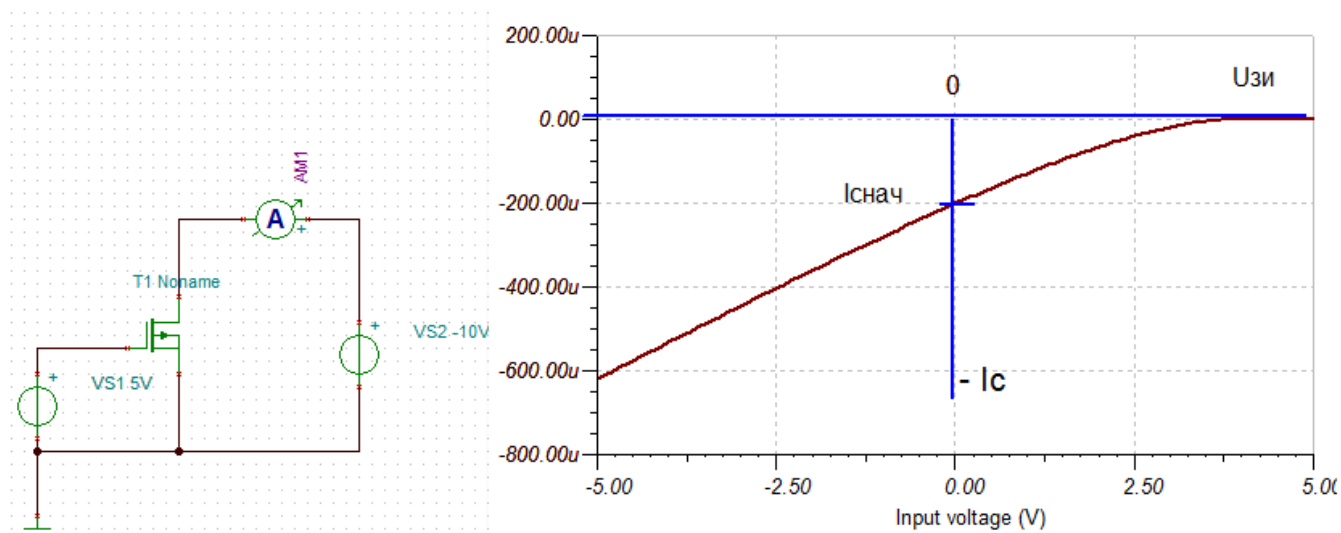
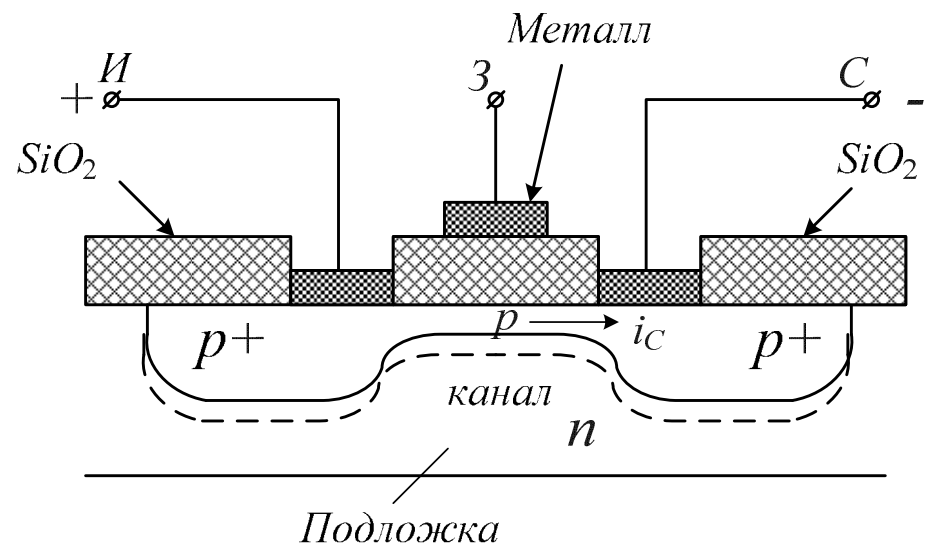


Рис.5.5.

## Передаточная ВАХ МОП-транзистора со встроенным $p$ -каналом

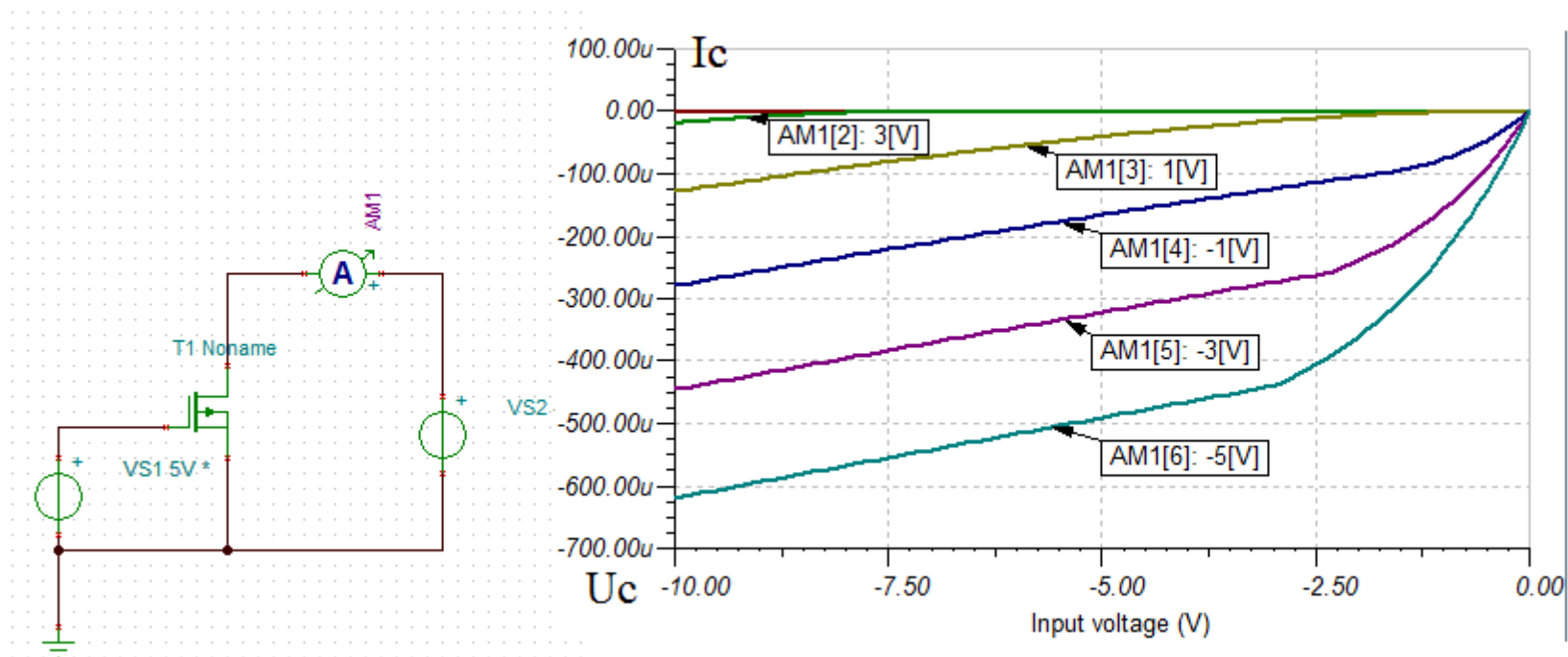
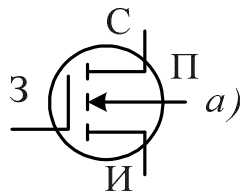


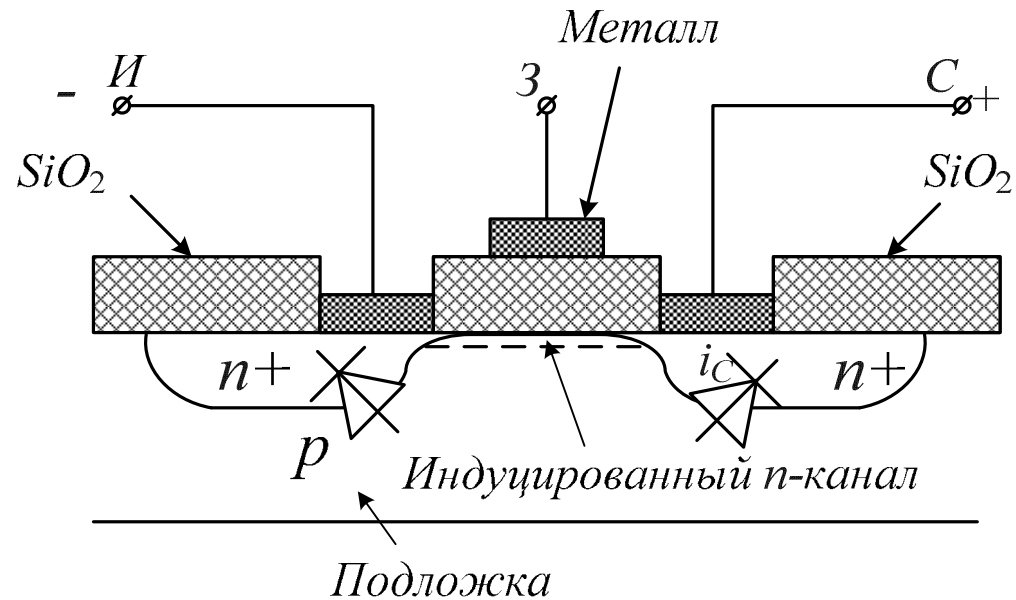
Рис.5.6

## Выходные ВАХ МОП-транзистора со встроенным $p$ -каналом

## Устройство полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом



Индуцированный  $n$ -канал



Если  $U_{зи} = 0$ , канал обеднен носителями заряда. МОП-транзистор можно представить двумя встречно включенными диодами. Ток стока  $i_C = 0$ .

Если  $U_{зи} > U_{пор}$ , электрическое поле затвора втягивает в область канала электроны из области  $n^+$  и повышает проводимость канала. Поэтому канал называется *индуцированным*.

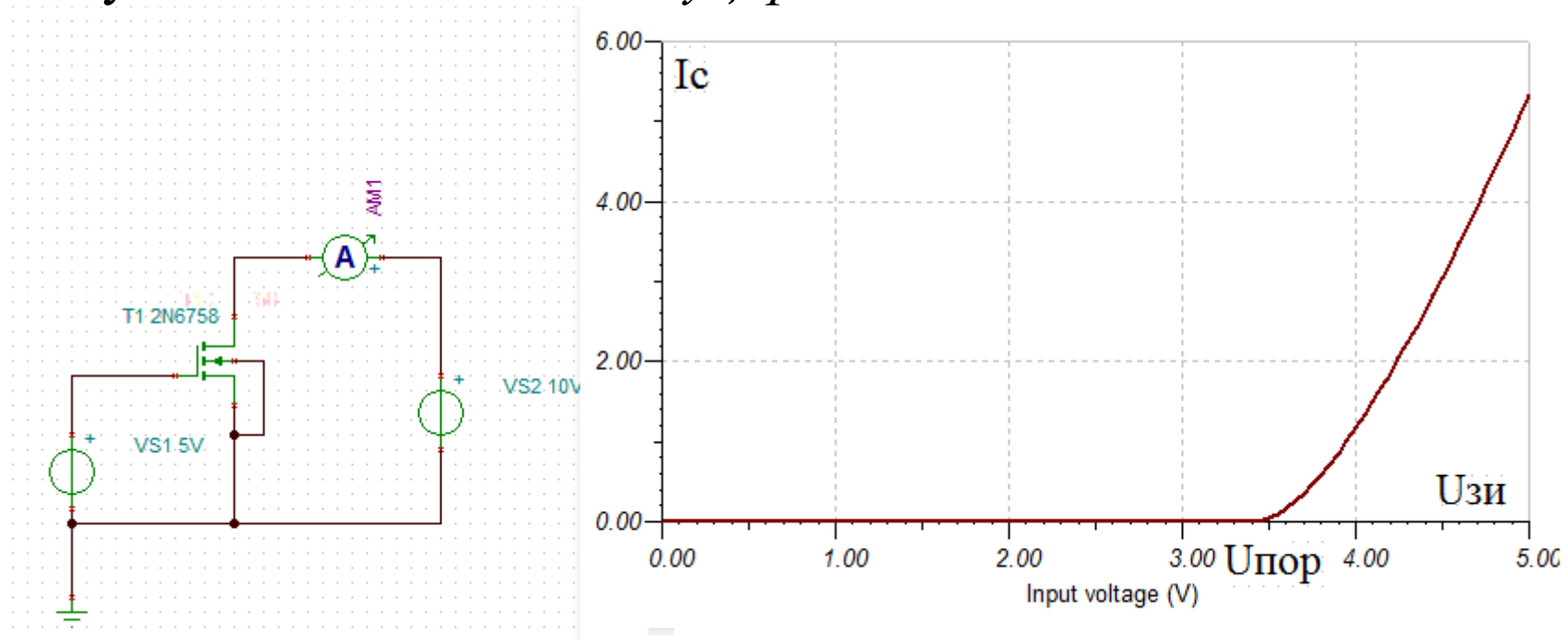


Рис.5.7. Передаточная ВАХ

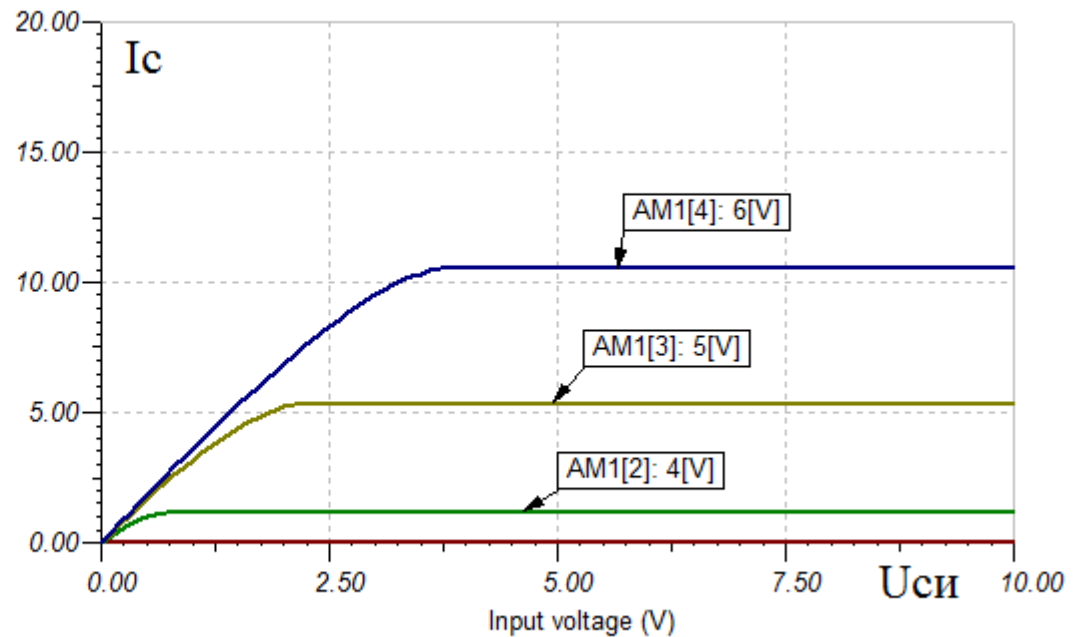
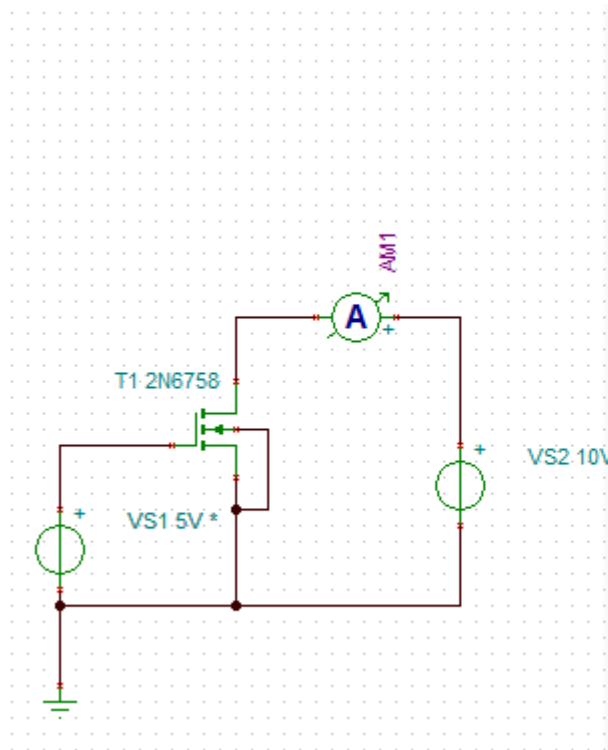
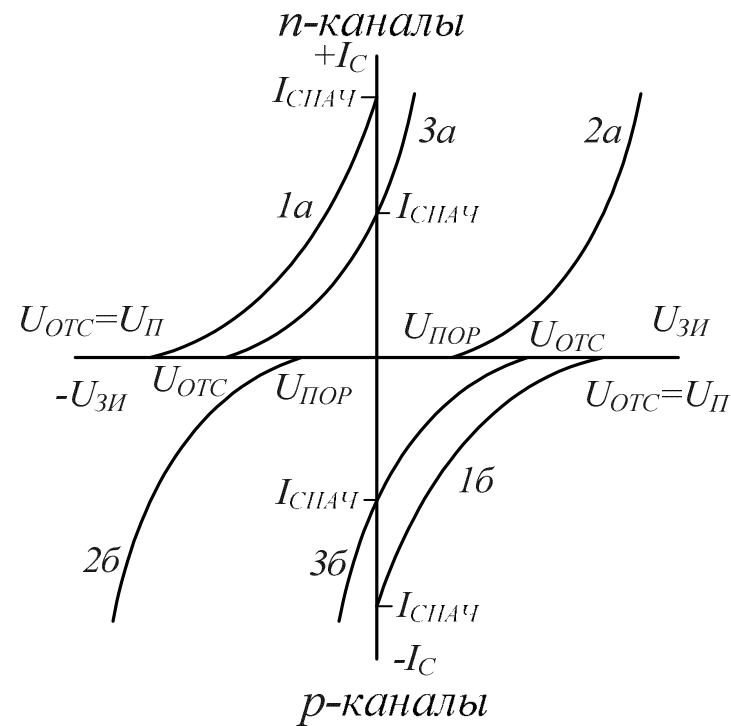


Рис.5.8. Выходные ВАХ

Полевые транзисторы с индуцированным каналом управляются только при  $|U_{зи}| > |U_{пор}|$ .

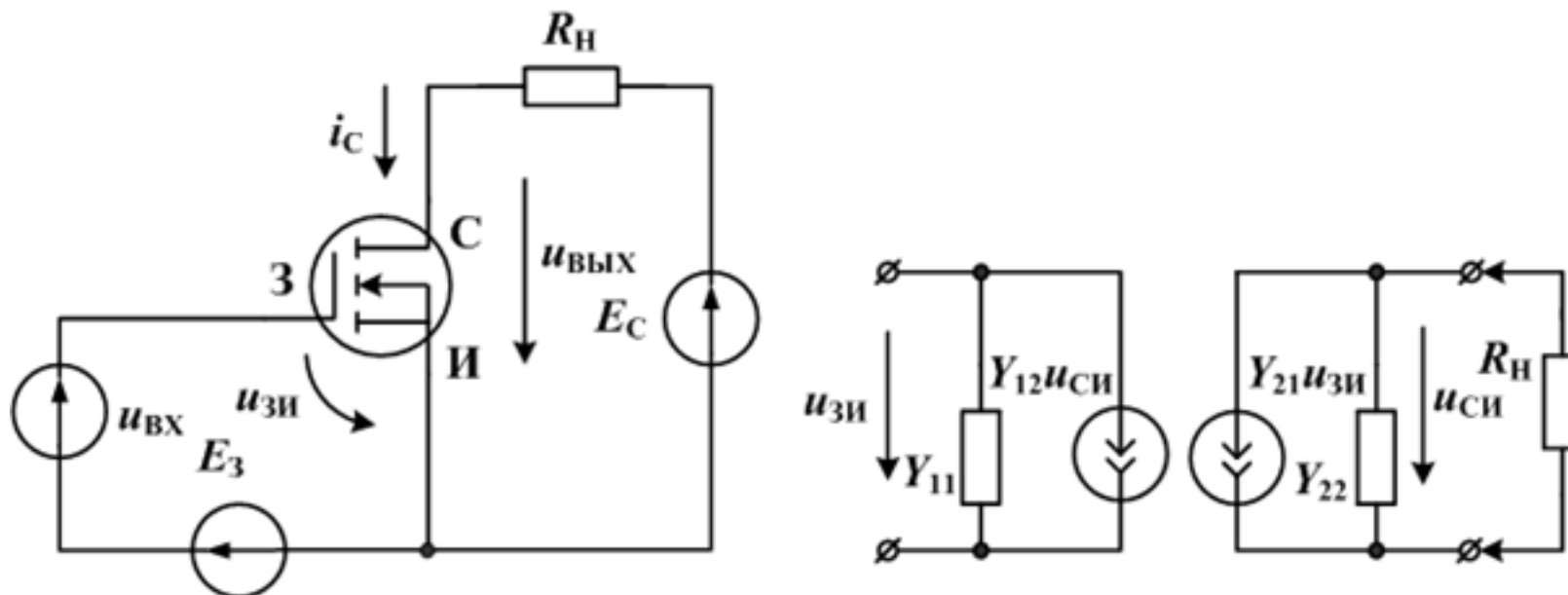
Полевые транзисторы с индуцированным  $p$ -каналом работают при отрицательных напряжениях на стоке и затворе.



## Передаточные характеристики полевых транзисторов разных типов

(1 - с управляющим p-n переходом; 2- с индуцированным каналом;  
3 – со встроенным каналом; а – для канала n – типа, б – для канала p –  
типа.)

## Схема усилительного каскада на полевом транзисторе с общим истоком



Упрощенная схема усилителя на ПТ с общим истоком и схема замещения

- Источник напряжения  $E_3$  создает требуемое напряжение смещение на затворе.
- Источник напряжения  $E_C$  — напряжение питания цепи стока.
- Источник переменного сигнала  $u_C$  подключен между затвором и истоком.



В схеме замещения усилительного каскада в области низких частот для малых сигналов переменное входное напряжение  $u_{зи}$  преобразуется управляемым источником тока в переменный ток стока  $i_c$ , который создает в нагрузке выходное напряжение  $u_{си}$ .

Полевой транзистор заменяют четырехполюсником в Y- параметрах:

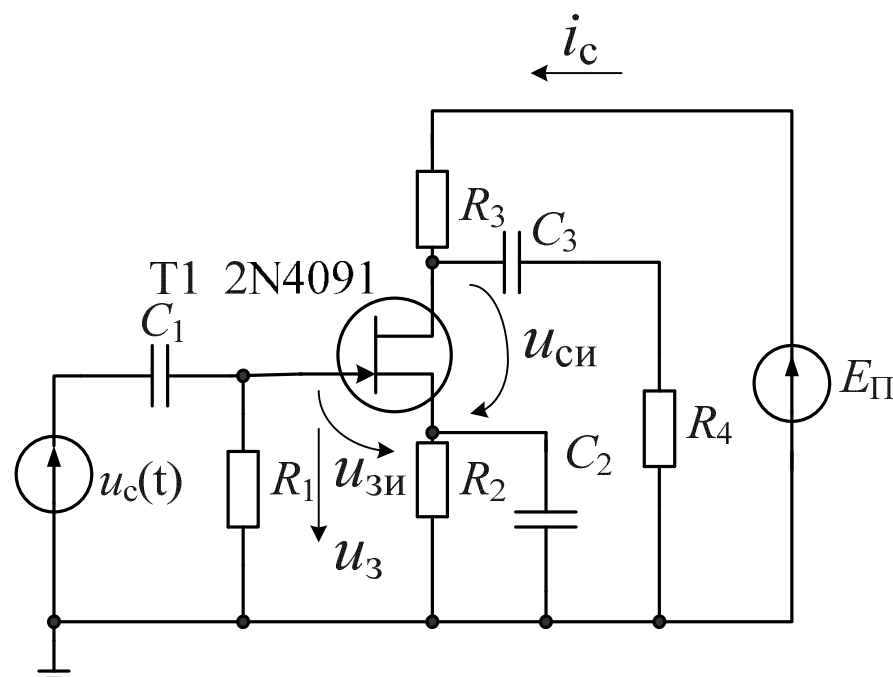
$$\begin{aligned} i_z &= y_{11}u_{зи} + y_{12}u_{си} \\ i_c &= y_{21}u_{зи} + y_{22}u_{си} \end{aligned} \quad (11.1)$$

В этих уравнениях:

- $y_{11}$  - проводимость утечки затвора транзистора,
- $y_{22}$  - выходная проводимость,
- $y_{21}=S$  - крутизна полевого транзистора (или проводимость прямой передачи),
- $y_{12}$  - проводимость обратной передачи.

Как правило, считают  $y_{11} = y_{12} = 0$ . Выходная проводимость  $y_{22} = \frac{1}{R_{\text{ВЫХ}}}$ , причем  $R_{\text{ВЫХ}}$  составляет 30 кОм и более.

### Пример расчета усилителя низкой частоты на полевом транзисторе



Параметры усилителя:

$$R_1 = 100 \text{ кОм}, R_2 = 50 \text{ Ом}, R_3 = 200 \text{ Ом}, R_4 = 1 \text{ кОм},$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = 100 \text{ мкФ}, E_{II} = 20 \text{ В},$$

$$u_c(t) = 0,5 \sin 2\pi f t \text{ В}, f = 1 \text{ кГц}.$$

1. Расчет режима покоя на входе и выходе. Определить  $u_{zu0}, i_{c0}, u_{cu0}, u_{c0}$ .

**Входная цепь.** Так как  $i_{z0} = 0, u_{z0} = 0 = u_{zu0} + i_{c0} R_2$ .

На передаточной ВАХ проводим прямую  $u_{zu0} = -i_{c0} R_2$ .

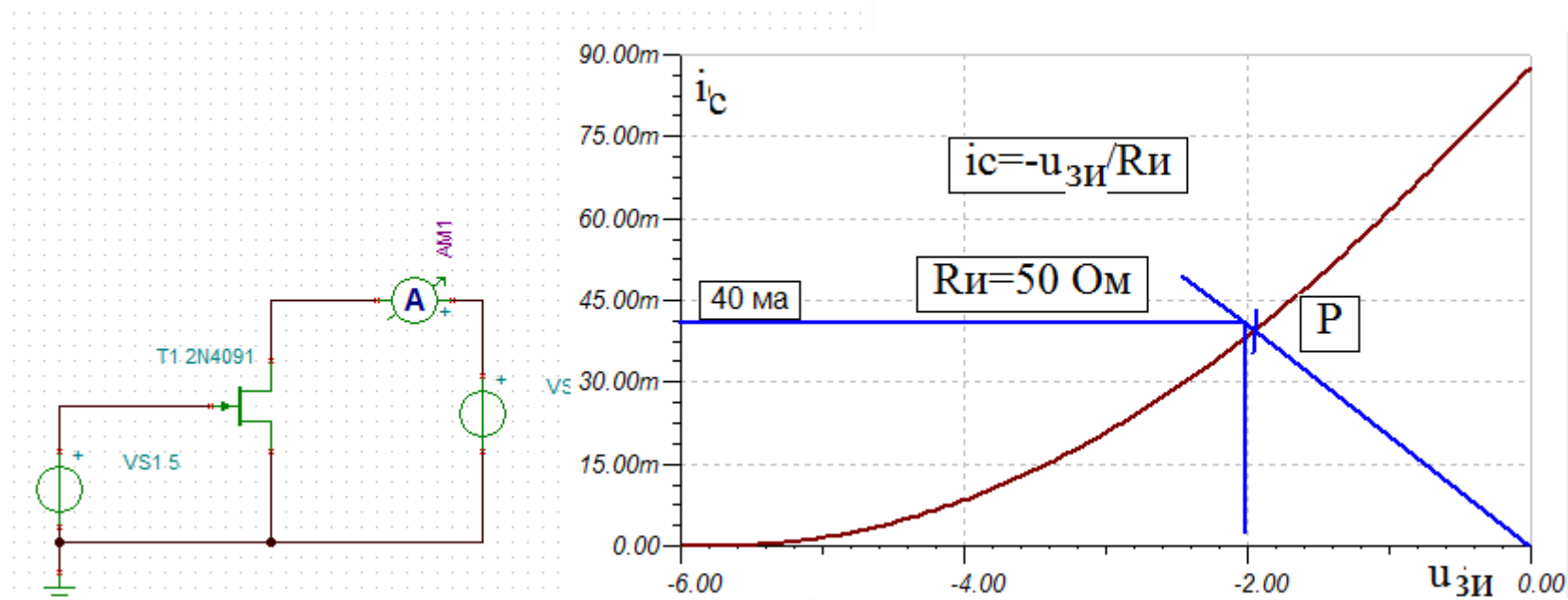
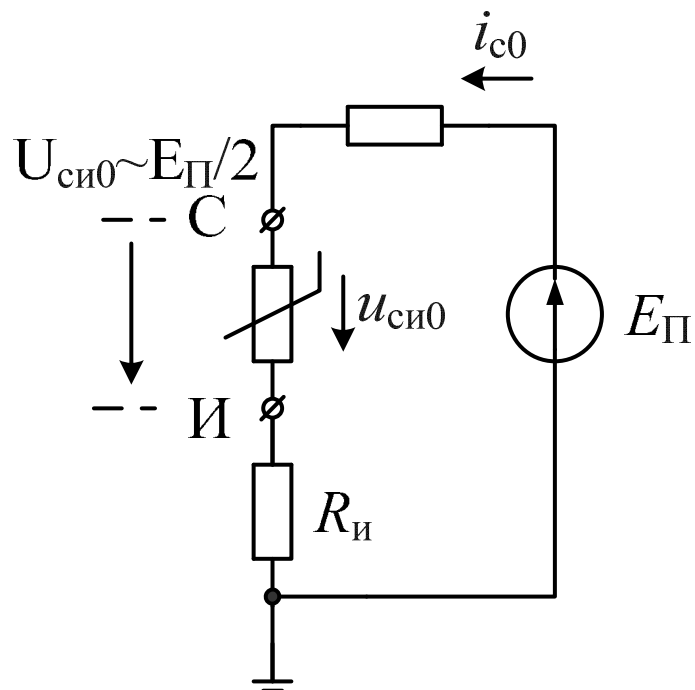


Рис.5.9.

Находим рабочую точку Р:  $u_{zu0} \approx -2B, i_{c0} \approx 40 \text{ мА}$ .

**Выходная цепь.**



- Строим выходную ВАХ для  $u_{zu0} = -2B$ .

- Строим нагрузочную прямую и находим режим покоя:

$$u_{cu0} = 10B, i_{c0} = 40 \text{ мА}.$$

- По передаточной ВАХ в рабочей точке находим крутизну:

$$S = \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{зи}} = 20 \frac{\text{мА}}{B}.$$

Рассчитаем:  $i_{c0} \cdot R_c = 40 \text{ мА} \cdot 200 \text{ Ом} = 8B,$

$$u_{c0} = E_{П} - i_{c0} \cdot R_c = 12B.$$

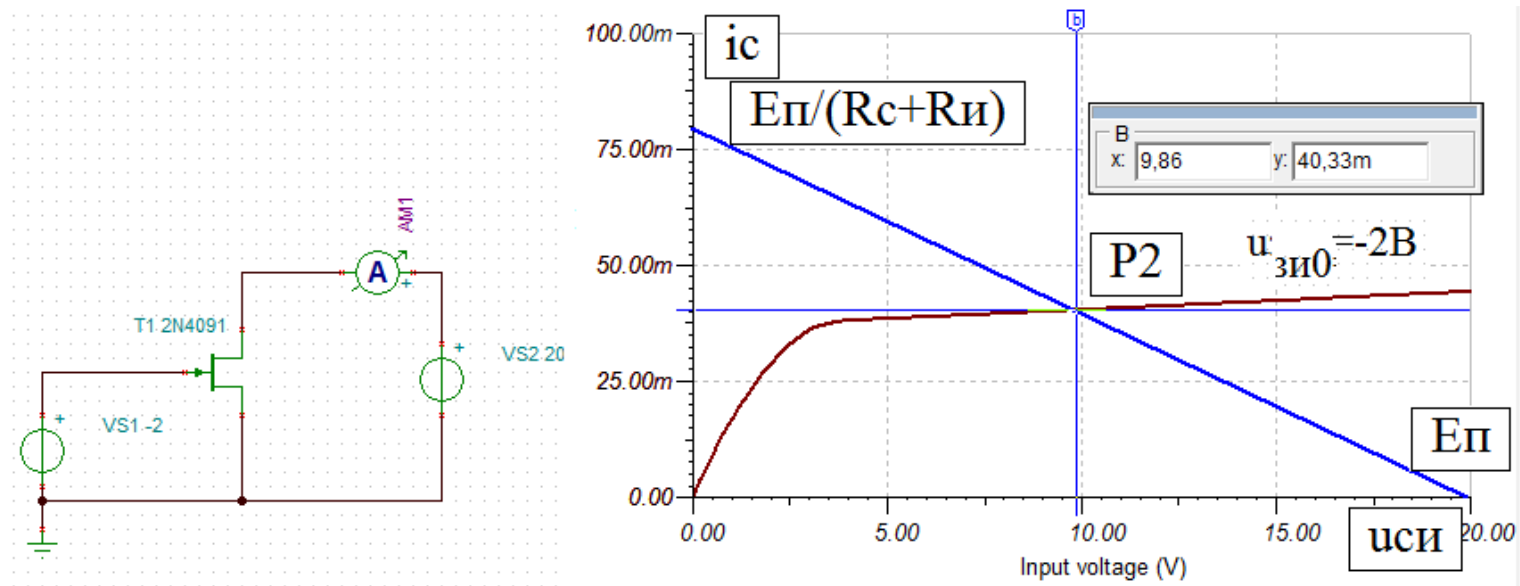
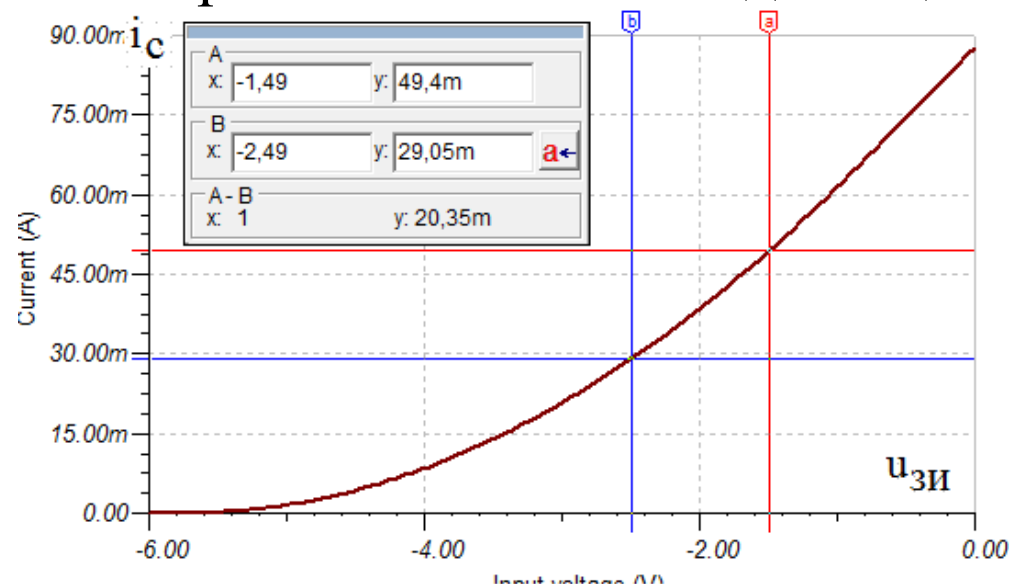


Рис.5.10

## Расчет рабочей точки выходной цепи



Выполним моделирование схемы в режиме покоя.

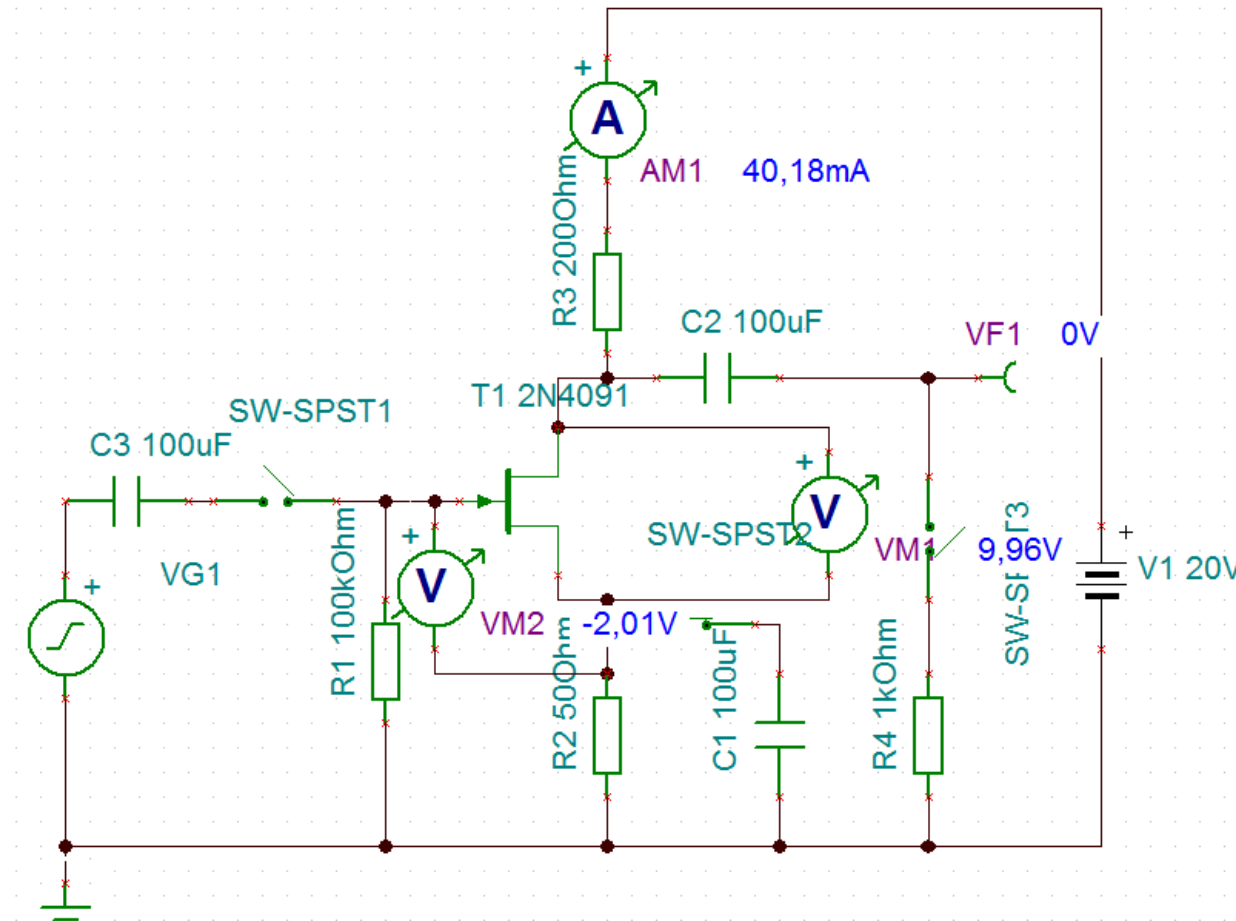
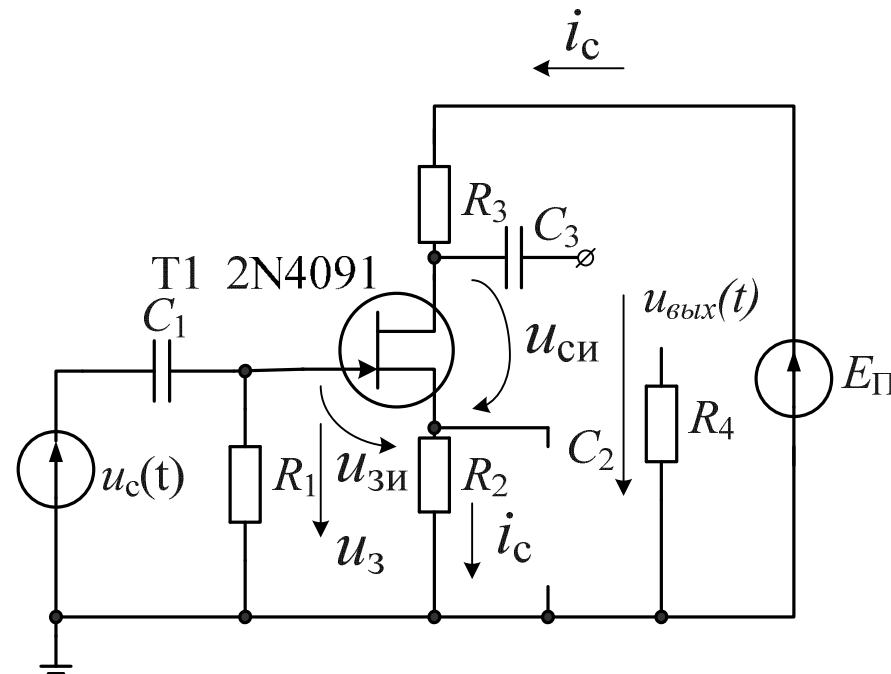


Рис.5.11

## Результаты расчета и моделирования совпадают!

**Расчет амплитуд переменных составляющих**  
 1-й случай. Отсутствует блокировочная емкость в эмиттере  $C_2$ .  
 Считаем, что  $C_1$  и  $C_2$  большие, нагрузка  $R_4$  отсутствует.



Получим для малых приращений:

$$\Delta u_{c\sim} = \Delta u_z = \Delta u_{зи} + \Delta i_c R_2 = \Delta u_{зи} + S \Delta u_{зи} R_2.$$

$$\Delta u_{\text{зи}} = \frac{\Delta u_{c\sim}}{1 + SR_2}.$$

Входной сигнал:  $u_c(t) = 0,5 \sin 2\pi ft \text{ В}, f = 1 \text{ кГц}.$

$$U_{\text{вх}} = 0,5 \text{ В}, S = 20 \frac{\text{мА}}{\text{В}}, R_2 = 50 \text{ Ом},$$

$$U_{\text{зит}} = \frac{0,5}{1 + 0,02 \cdot 50} = 0,25 \text{ В},$$

$$I_{Cm} = SU_{\text{зит}} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 = 5 \text{ мА},$$

$$i_c(t) = i_{c0} + I_{Cm} \sin \omega t = (40 + 5 \sin \omega t) \text{ мА},$$

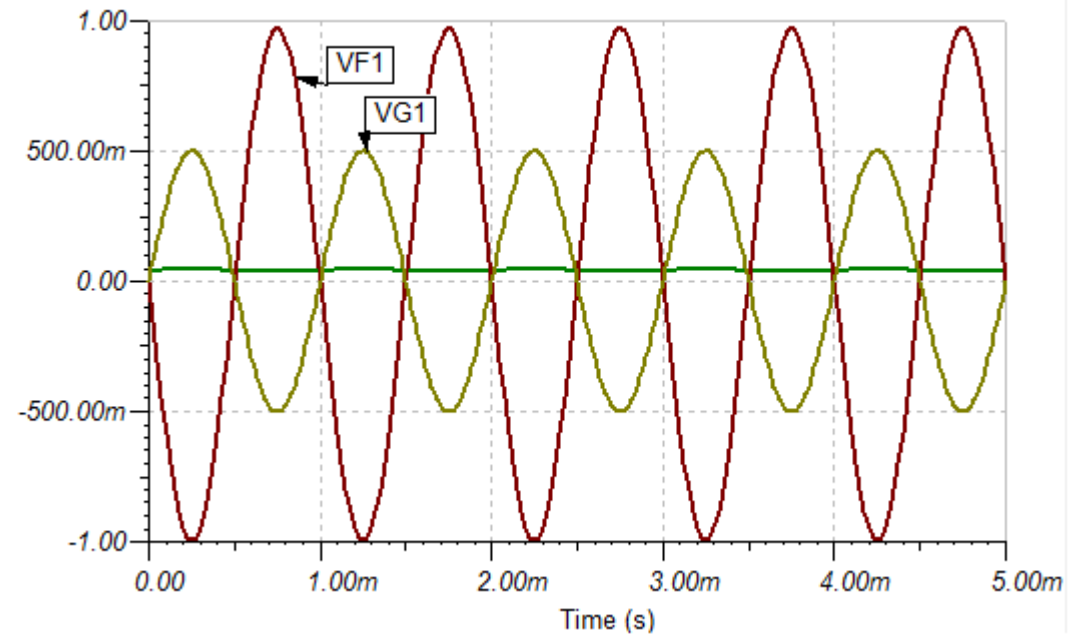
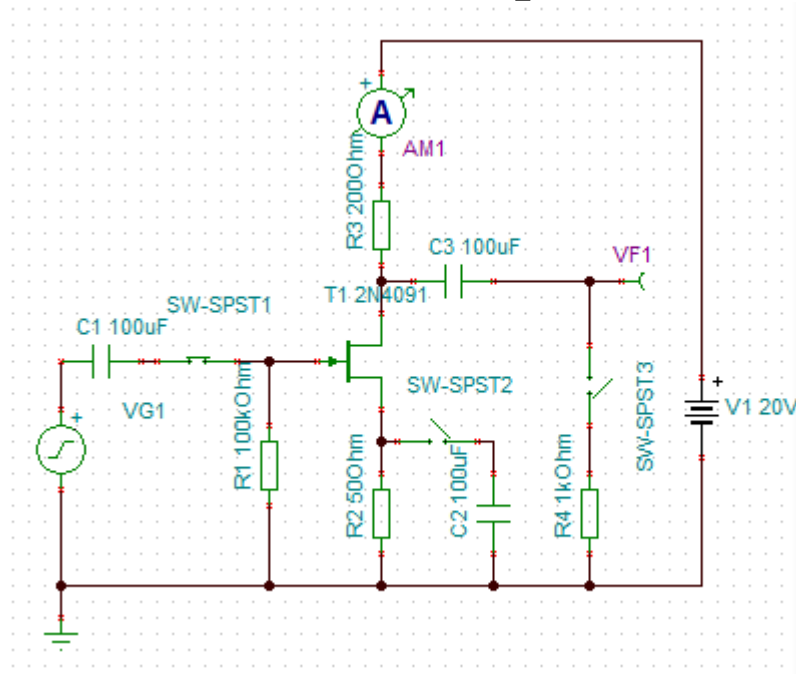
$$u_c(t) = E_{\Pi} - i_c(t)R_3 = 20 - (40 + 5 \sin \omega t) \cdot 10^{-3} \cdot 200 = \\ = 20 - 8 - 1 \sin \omega t \text{ В} = 12 - 1 \sin \omega t \text{ В}.$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 2.$$



Выполним моделирование в схеме рис.5.11:



Результаты совпадают.

2-й случай. Блокировочная емкость и нагрузка включены.

Считаем  $X_{C2} \ll R_2$ . Отрицательную обратную связь по переменному сигналу не учитываем.

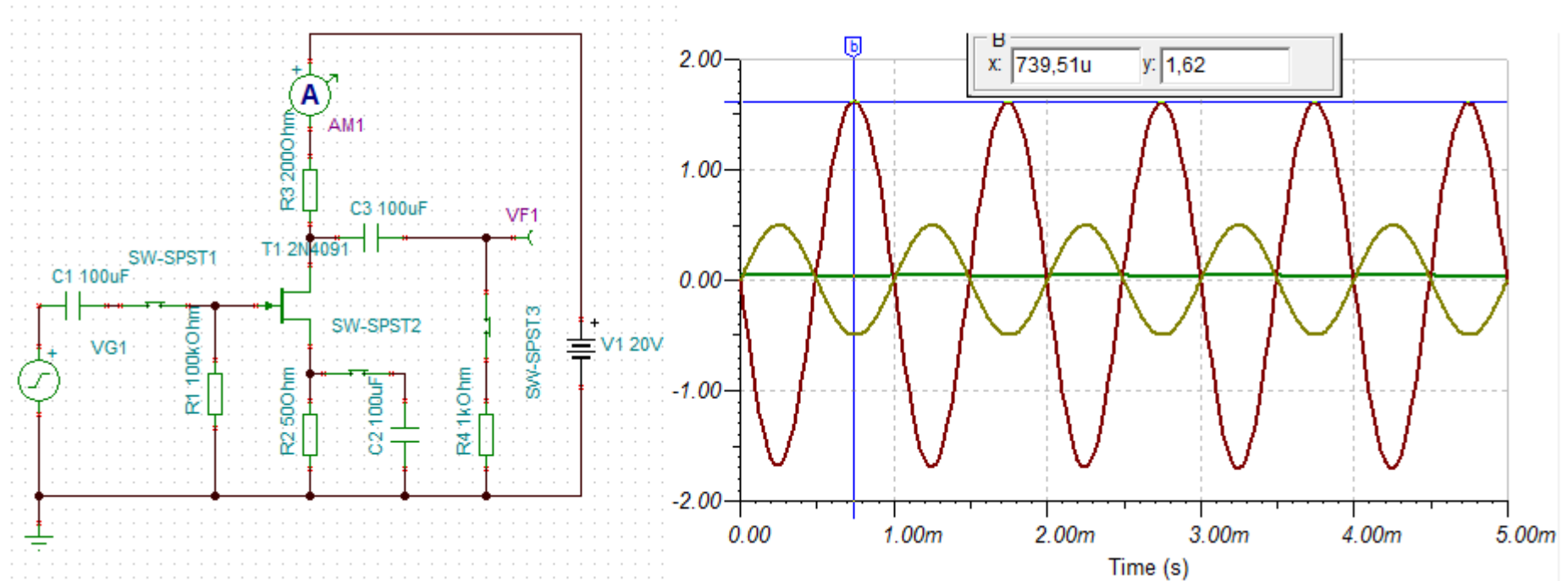
Получим:

$$U_{mзи} = U_{mвх} = 0,5 \text{ В}, I_{Cm} = S U_{зит} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 10 \text{ мА},$$

$$R_{HЭ} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{200 \cdot 1000}{1200} = 166,6 \text{ Ом},$$

$$u_c(t) = E_{\Pi} - i_c(t) R_3 = 12 - 1,66 \sin \omega t \text{ В},$$

$$K_U = 3,32.$$



Частотные свойства усилителя на ПТ с нагрузкой

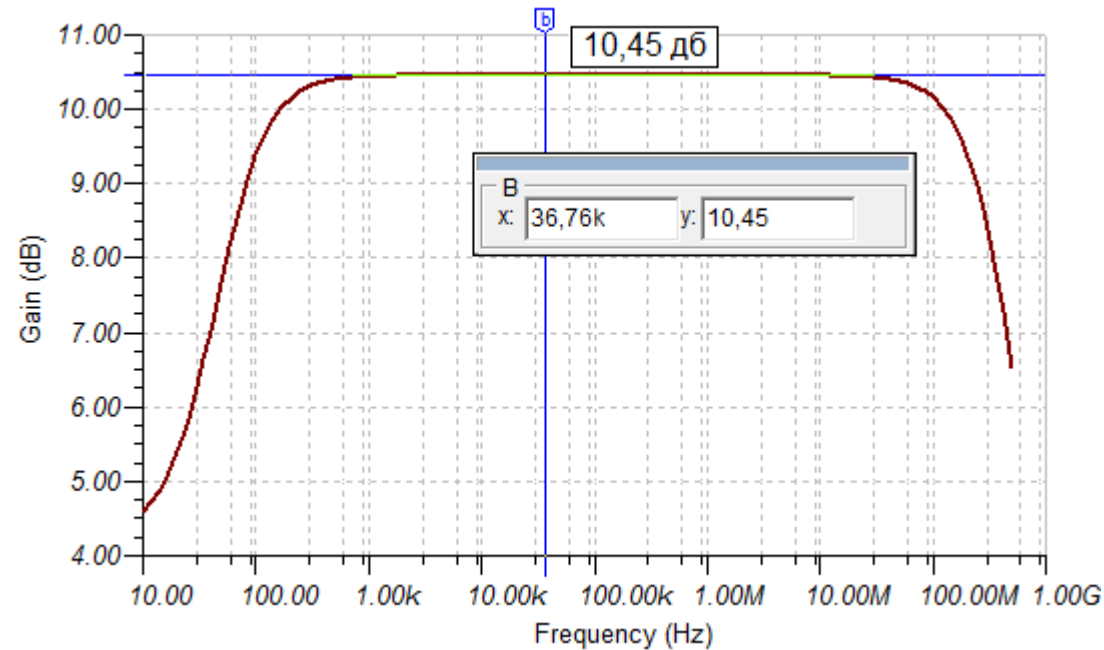


Рис.5.12

$$K_{\partial\delta} = 10,45 \partial\delta = 20 \lg K_U, K_U = 10^{\frac{10,45}{20}} = 10^{0,522} = 3,33.$$

## Истоковый повторитель напряжения

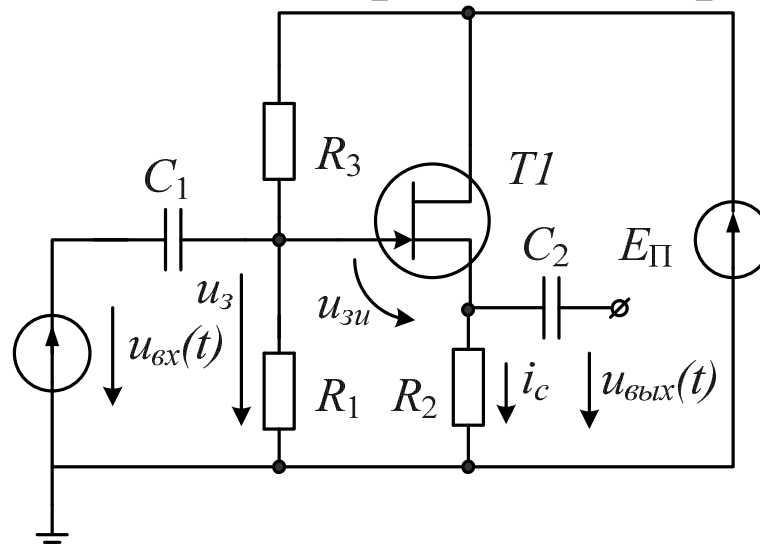


Рис.5.13

Истоковый повторитель обеспечивает высокое входное сопротивление, низкое выходное сопротивление, коэффициент усиления близкий к единице.

Исходные данные: T1 2N4091,  $E_{\Pi}=24\text{В}$ ,  $R_2=1\text{кОм}$ ,  $R_1=100\text{кОм}$ ,  $R_2=200\text{кОм}$ ,  $C_1=C_2=100\text{ мкФ}$ .

$$u_{\text{вх}}(t) = 0,5 \sin 2\pi f t \text{ В}, \quad f = 1 \text{ кГц}.$$

Практический выбор резисторов смещения

В режиме *DC-DC Transfer Characteristic* установим *Input* –  $R_3$ .  
Получим  $R_3=200$  кОм.

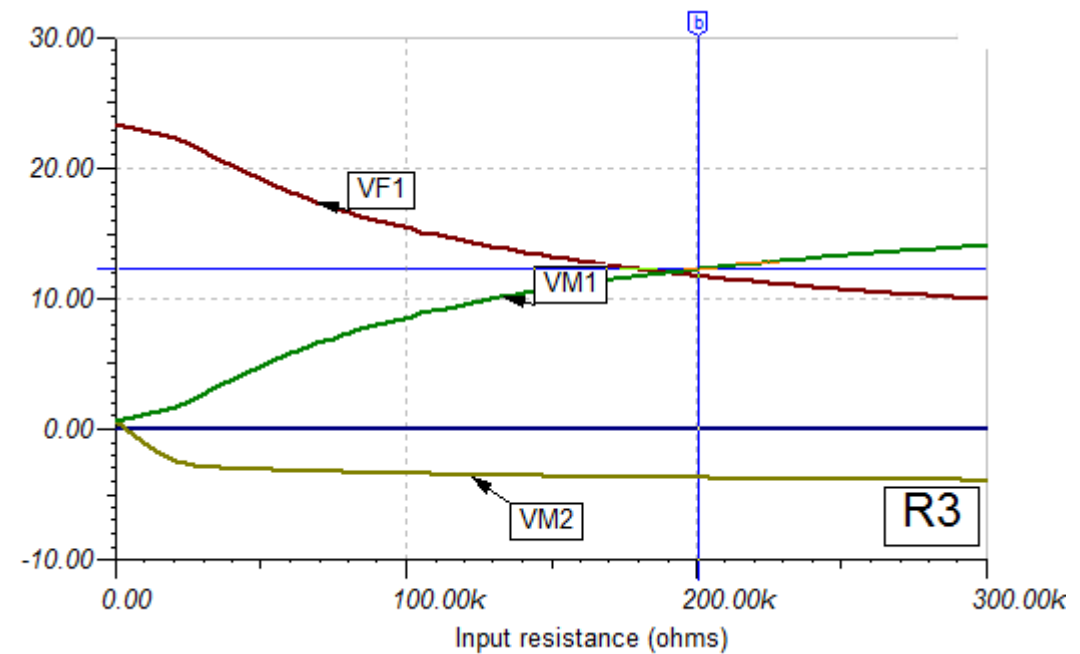
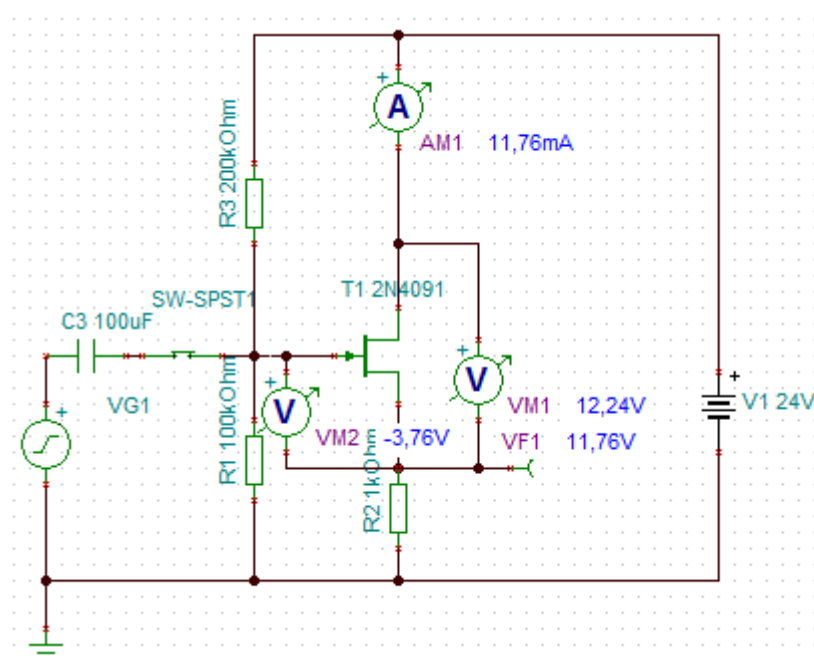


Рис.5.14

## Расчет входной цепи

1. Цепь смещения заменяем эквивалентным генератором:

$$E_{\mathcal{E}} = \frac{E_{\Pi} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{24}{3} = 8 \text{ В}, R_{\mathcal{E}} = \frac{100 \cdot 200 \cdot 10^6}{300 \cdot 10^3} = 66,6 \text{ кОм}.$$

2. Для входной цепи в режиме покоя:

$$u_{\mathcal{Z}0} = E_{\mathcal{E}} = u_{\mathcal{Z}u0} + i_{c0} R_2.$$

На передаточной ВАХ строим эту прямую:

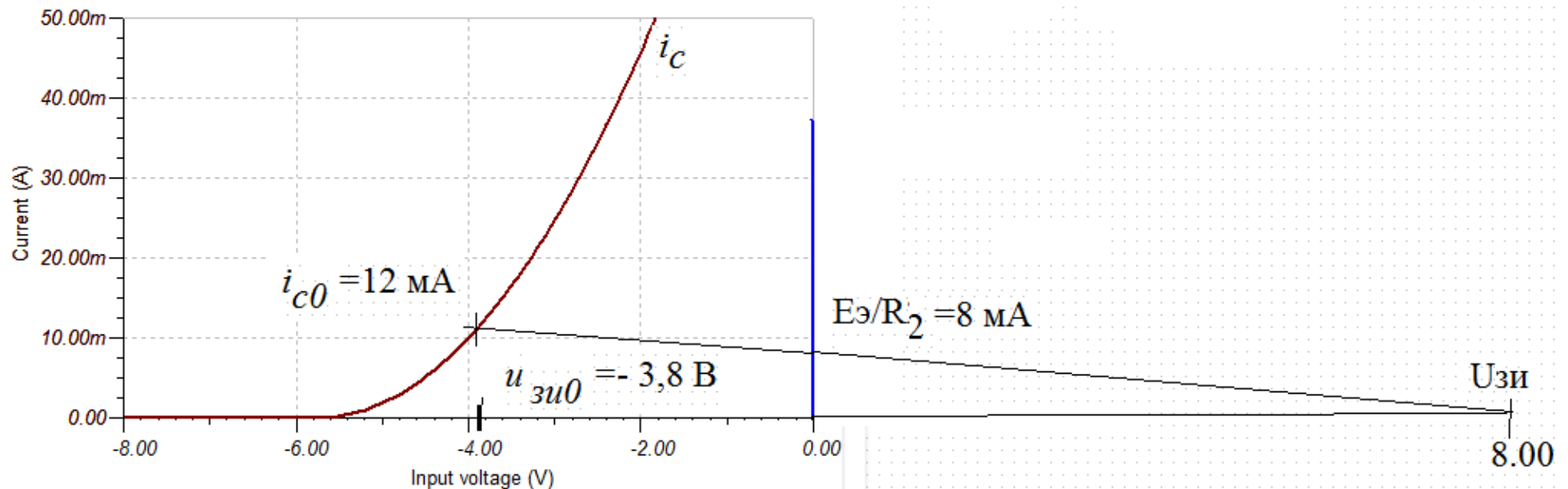
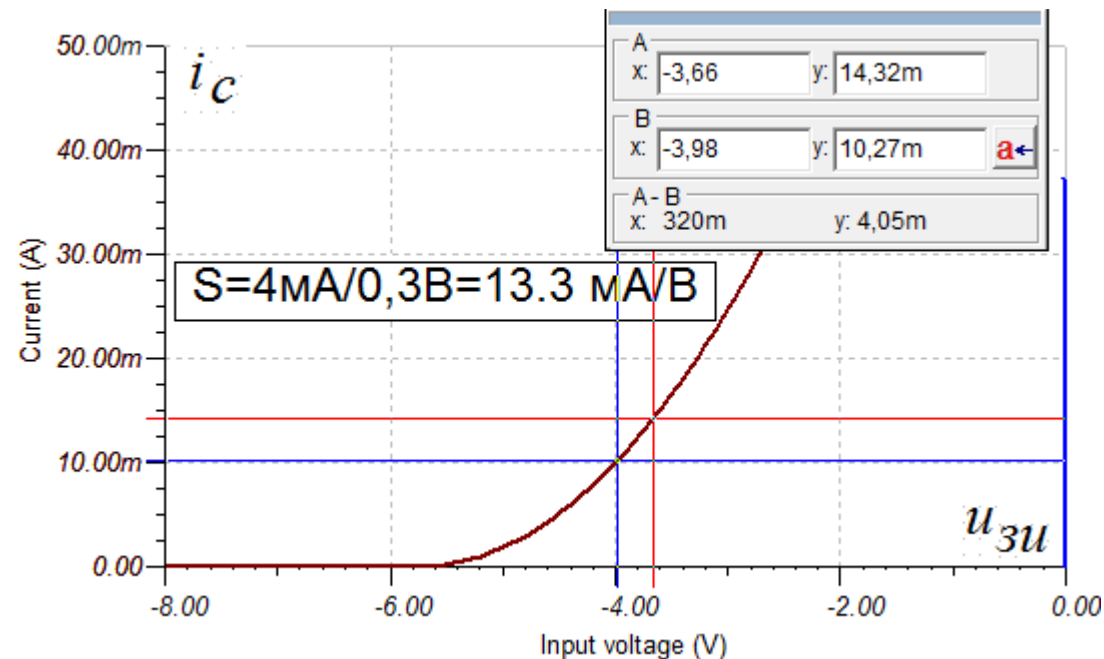


Рис.5.15

Результаты совпадают с моделированием.

Определяем крутизну в рабочей точке.



$$S = 13,3 \frac{\text{mA}}{\text{B}}$$

### 3. Расчет выходной цепи

На выходных ВАХ строим нагрузочную прямую с отрезками на

осях:  $u_{cu} = E_{\Pi} = 24\text{ B}$ ,  $\frac{E_{\Pi}}{R_2} = 24\text{ mA}$ .

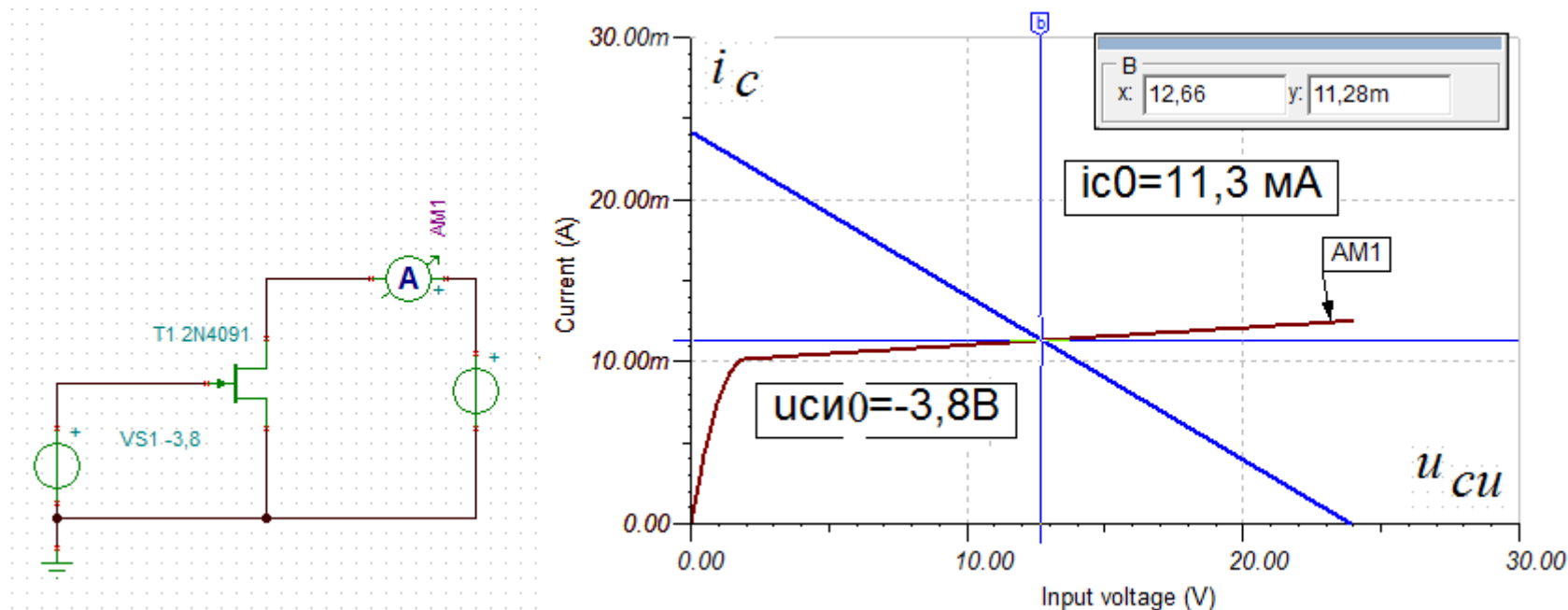


Рис.5.16

Результаты в покое совпадают с моделированием (рис.5.17).

#### 4. Расчет усиления переменного сигнала

Считаем, что емкости  $C_1$  и  $C_2$  имеют очень малое сопротивление в диапазоне частот сигнала и не влияют на усиление.

$$u_{ex}(t) = u_{zu}(t) + i_c(t)R_2 = u_{zu}(t) + Su_{zu}(t)R_2.$$

$$u_{zu}(t) = \frac{u_{ex}(t)}{1 + SR_2}.$$



Вычислим амплитуды переменного сигнала:

$$U_{\text{зит}} = \frac{U_{\text{вхт}}}{1 + SR_2} = \frac{0,5}{1 + 13,3 \cdot 10^{-3} 10^3} = 34,9 \text{ мВ};$$

$$I_{\text{см}} = U_{\text{зит}} S = 0,0349 \cdot 13,3 \cdot 10^{-3} = 0,464 \text{ мА}.$$

Вычислим мгновенные значения:

$$i_c(t) = i_{c0} + I_{\text{см}} \sin 2\pi ft = 12 + 0,464 \cdot \sin 2\pi ft \text{ мА};$$

$$u_{\text{вых}}(t) = i_c(t) R_2 = 12 + 0,464 \cdot \sin 2\pi ft \text{ В}.$$

$$U_{\text{нт}} = 0,464 \text{ В}.$$

Коэффициент усиления:  $K_U = \frac{U_{\text{нт}}}{U_{\text{вхт}}} = \frac{0,464}{0,5} = 0,92$

### **Выходное сопротивление истокового повторителя**

Считаем, что  $u_{\text{вх}}(t) = \text{const} (\Delta u_{\text{вх}} = 0)$ , а нагрузка  $R_2$  меняется.

Для приращений:  $\Delta u_{\text{зи}} + \Delta u_{\text{н}} = 0$ .

Далее получим:  $\Delta i_n = S \Delta u_{zu}, \frac{\Delta i_n}{S} + \Delta u_n = 0,$

$$R_{вых} = \left| \frac{\Delta u_n}{\Delta i_n} \right| = \frac{1}{S} = \frac{1}{13,3 \cdot 10^{-3}} = 75 \text{ Ом}.$$

Выполним моделирование:

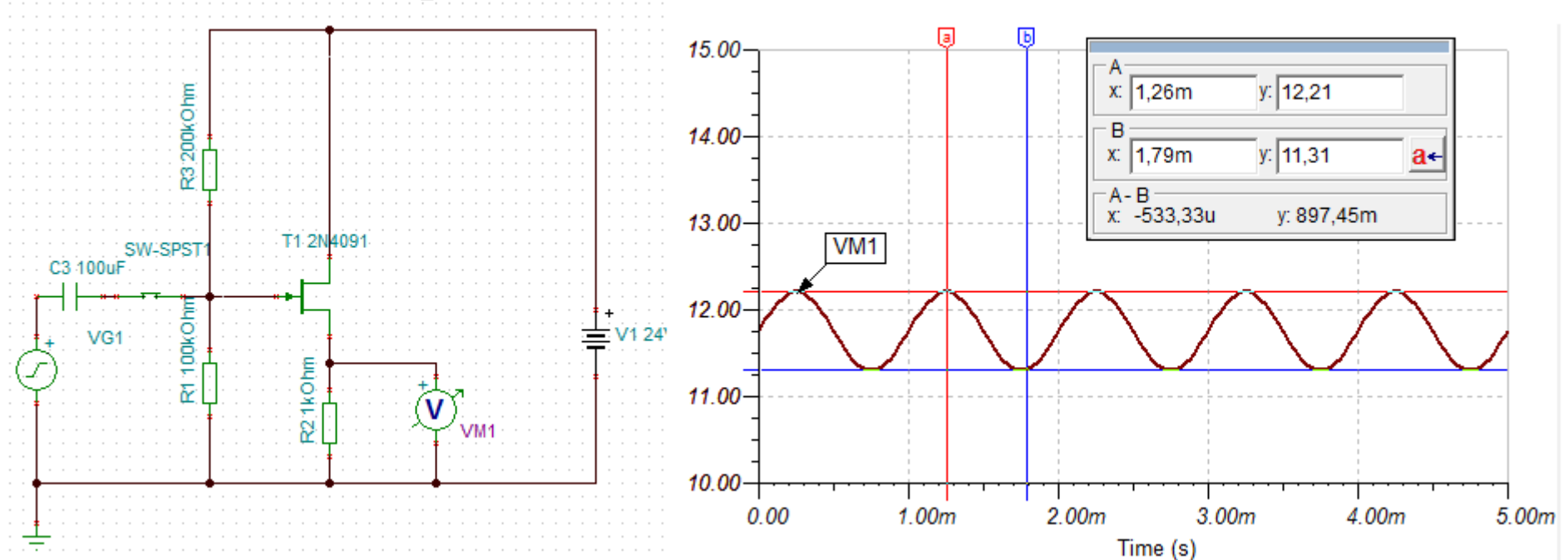
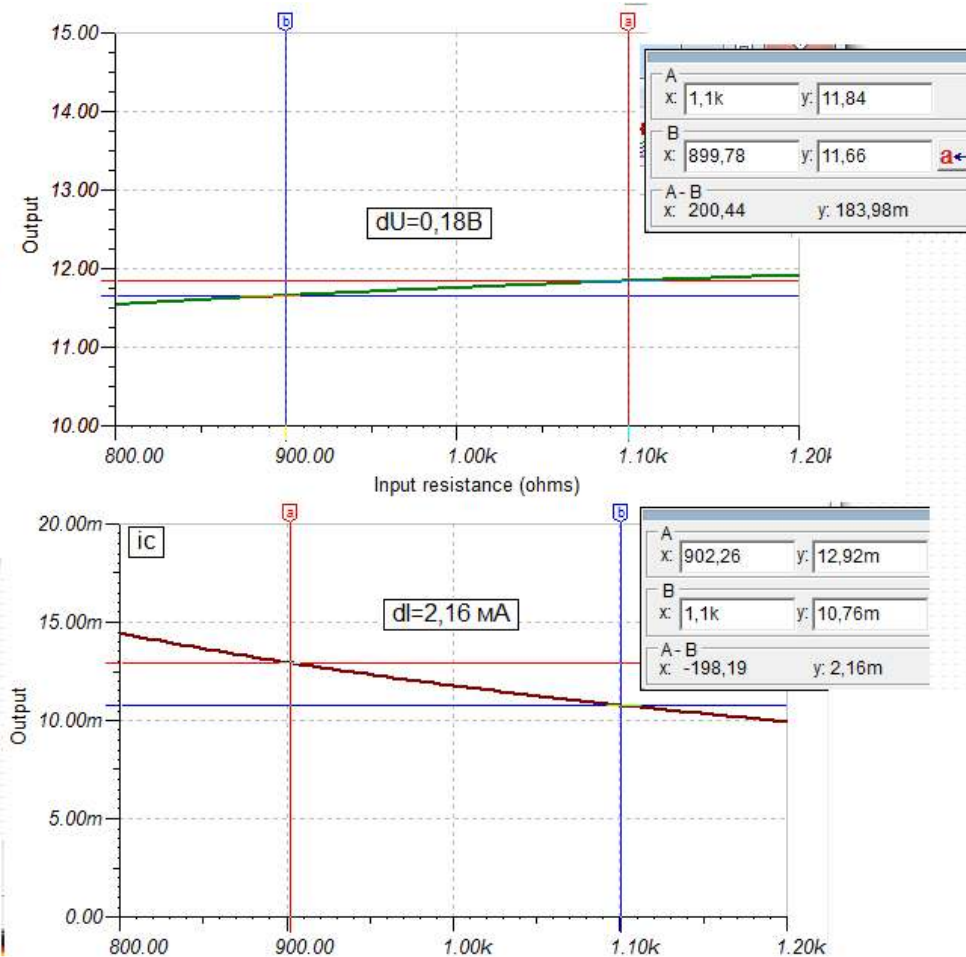
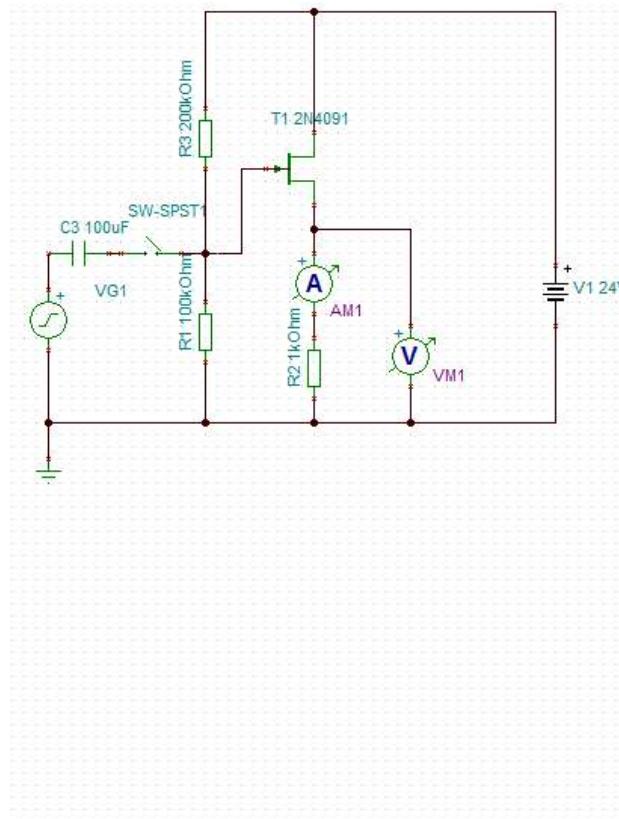


Рис.5.18

Получили амплитуду сигнала на выходе  $U_{nm} = 0,45 \text{ В}.$

# Расчет выходного сопротивления истокового повторителя в схеме рис.5.19



$$R_{вых} = \frac{0,18B}{2,16 \text{ mA}} = 83 \text{ Ом.}$$