

Лекция 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. В иностранной литературе полевые транзисторы называют FET (field – effect transistor)

Прохождение тока в канале только одним типом зарядов.

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

Управляющий электрод называется затвором (Gate).

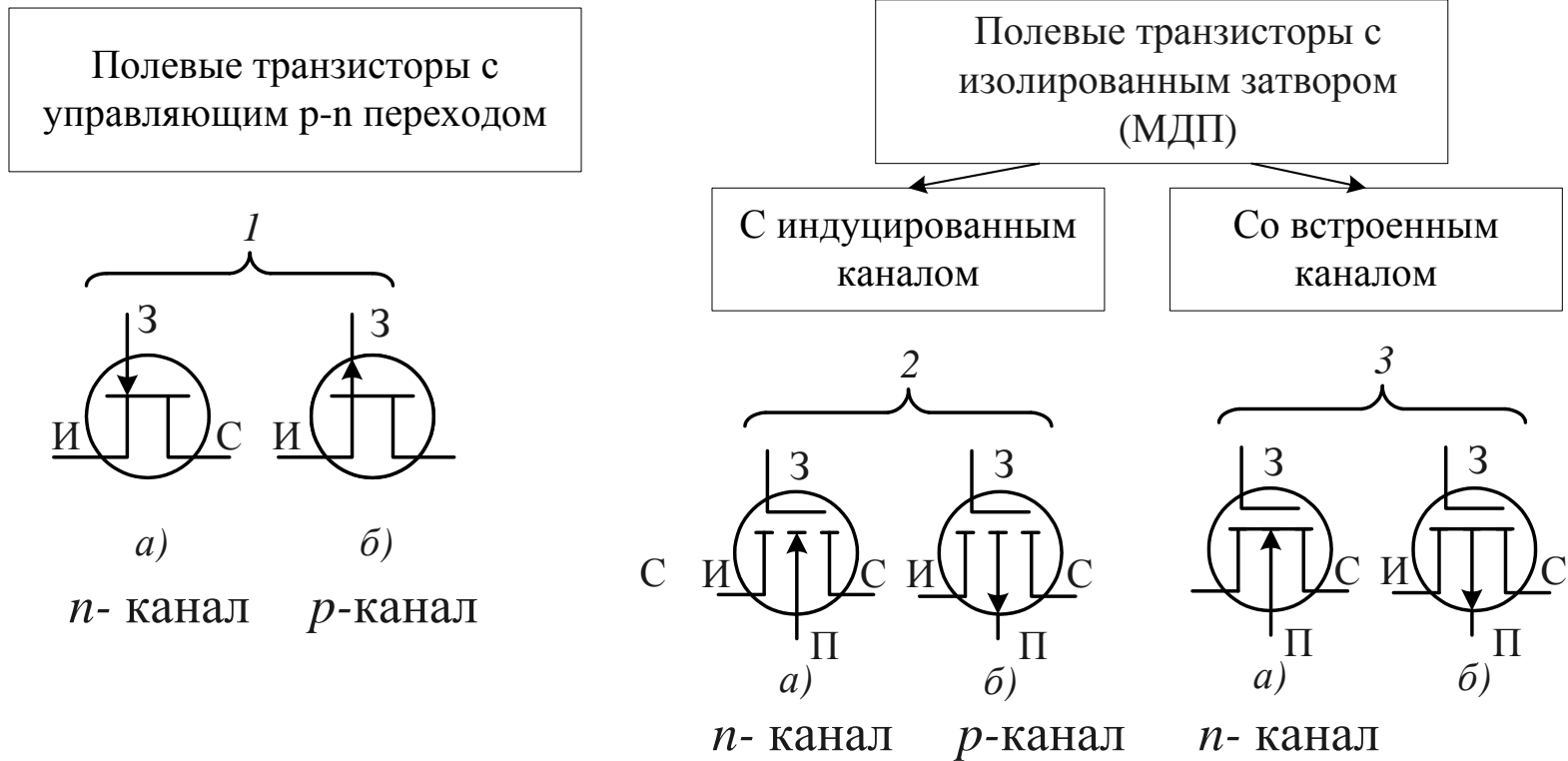
Напряжение управления прикладывается между затвором и истоком.

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

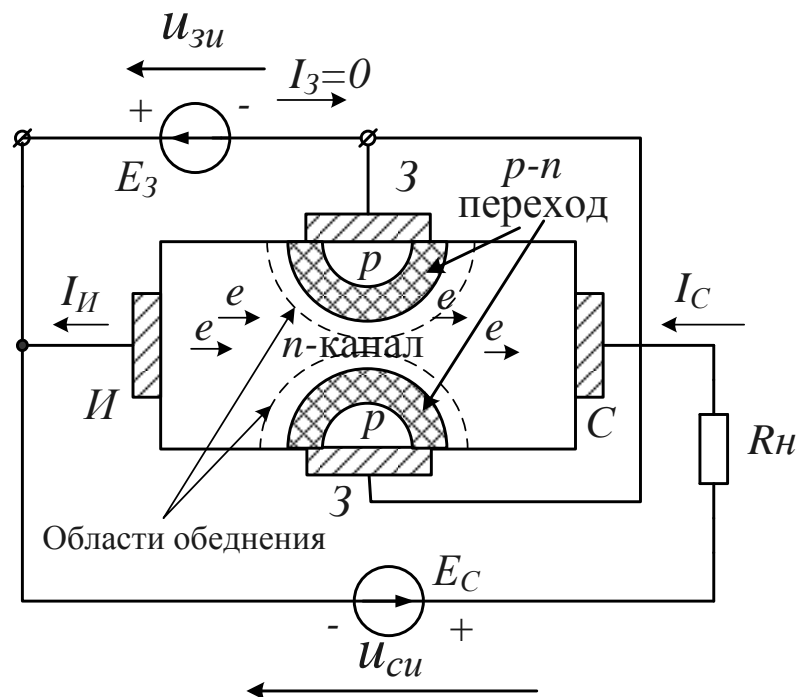
Применяют два типа полевых транзисторов:

- полевые транзисторы с управляемым р-п переходом (*junction field-effect transistor (JFET)*);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET)*); в отечественной литературе их называют: (МОП — металл — оксид кремния — полупроводник) или (МДП — металл-диэлектрик-полупроводник).
- Категория MOSFET транзисторов делится на полевые транзисторы, *работающие в режиме обогащения* (со встроенным каналом) и *в режиме обеднения* (с индуцированным каналом).
-

Классификация полевых транзисторов



Устройство полевого транзистора с управляющим p - n переходом

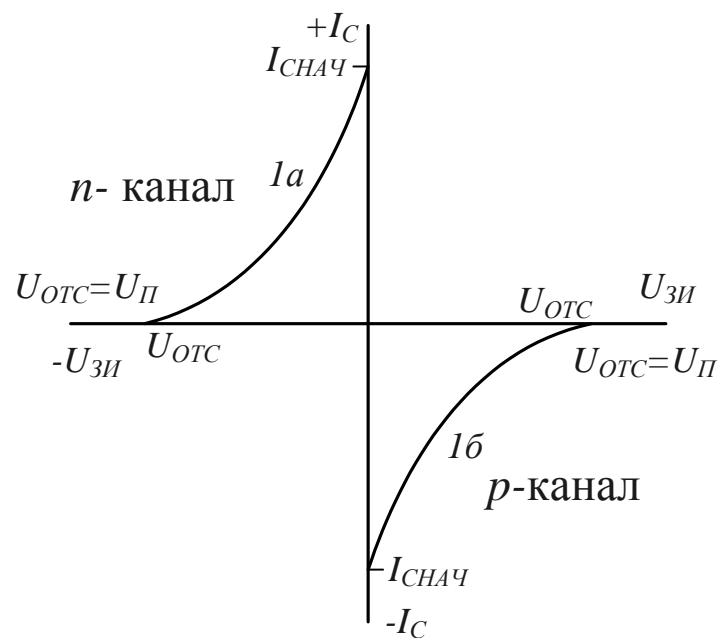


На затворе $U_{зи} < 0$, p - n переход заперт. С увеличением обратного напряжения расширяется p - n переход, уменьшается сечение проводящего канала. Отрицательное управляющее напряжение уменьшает ток между истоком и стоком.

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



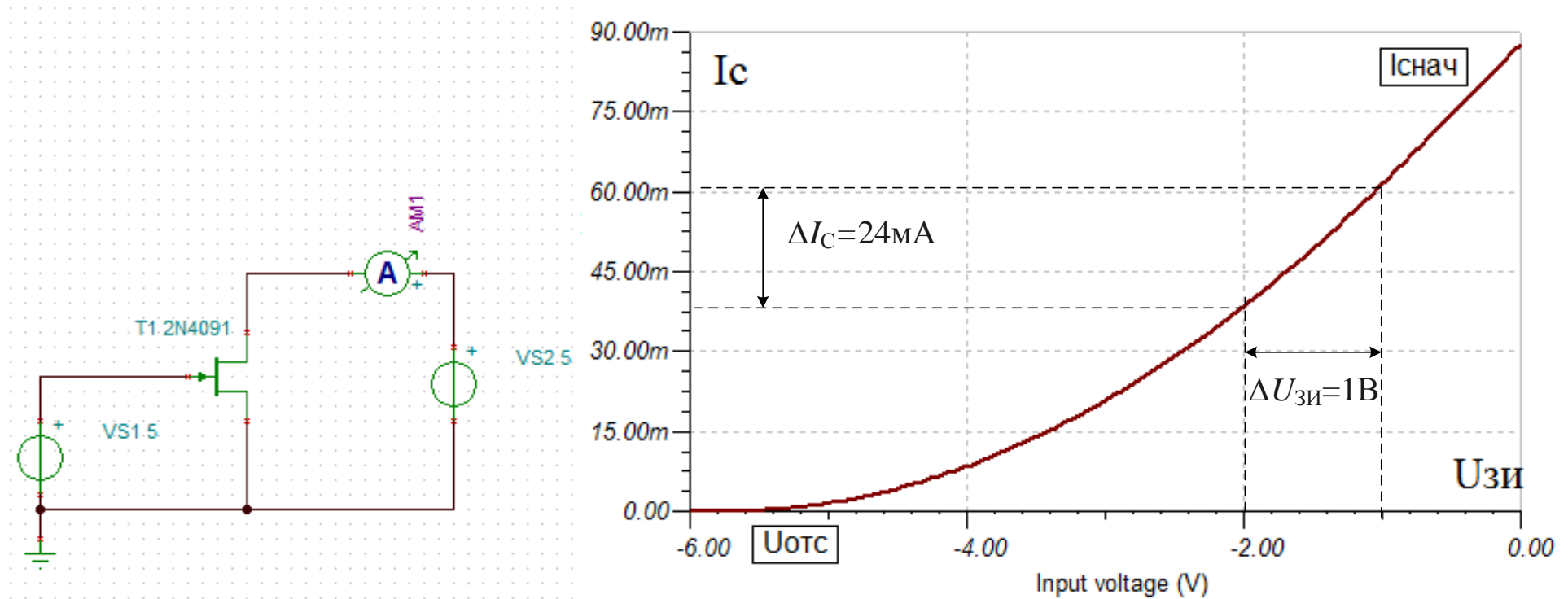


Рис.5.1

Передаточная характеристика ПТ 2N4091 с управляющим p - n переходом

Передаточная характеристика приближенно описывается квадратичной функцией:

$$I_C \approx I_{\text{снач}} \left(1 - \frac{U_{\text{зи}}}{U_{\text{отс}}} \right)^2$$

Усилительные свойства определяются крутизной передаточной ВАХ:

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} = 24 \frac{mA}{B}$$

Выходные характеристики ПТ с п-каналом

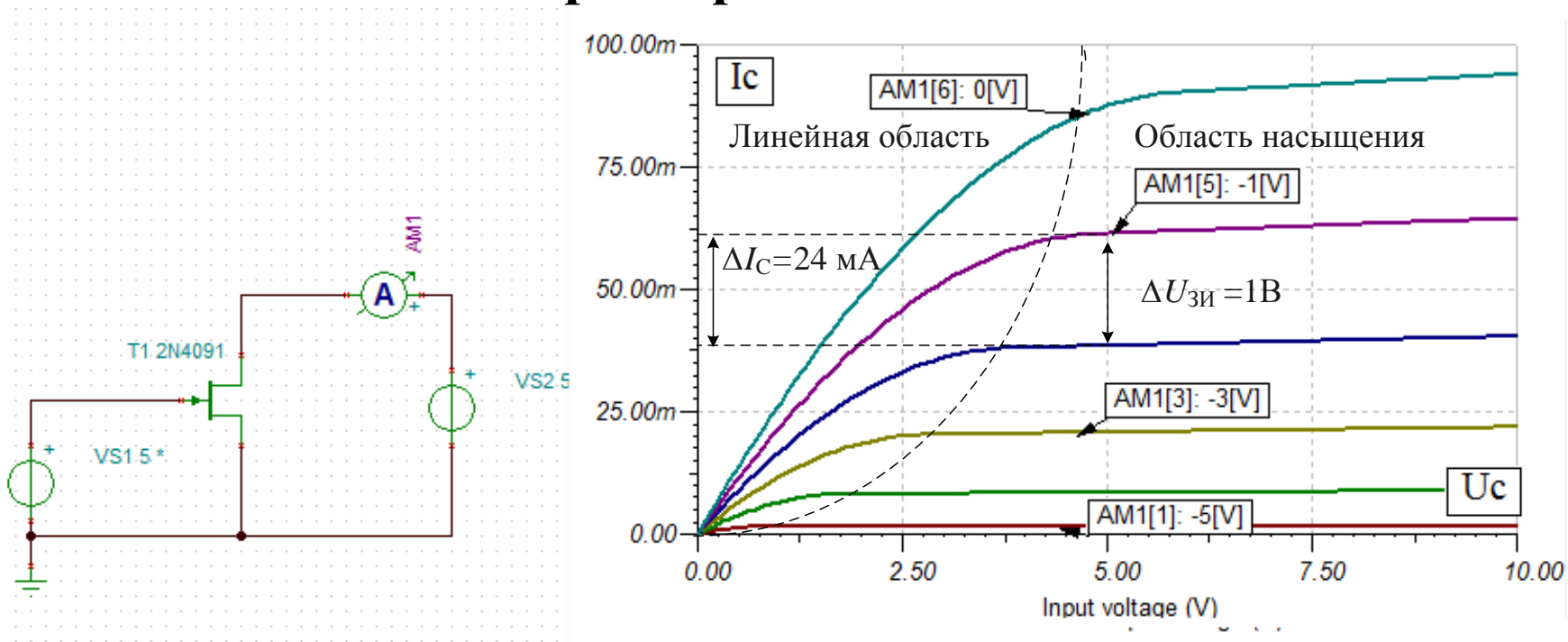


Рис.5.2

В линейной области ПТ используют как *управляемое сопротивление*. Наклон характеристики определяет омическое сопротивление транзистра и полевой транзистор ведет себя как управляемое сопротивление. Эту область выходных характеристик называют линейной омической.

Приблизенно сопротивление полевого транзистора можно рассчитать по формуле:

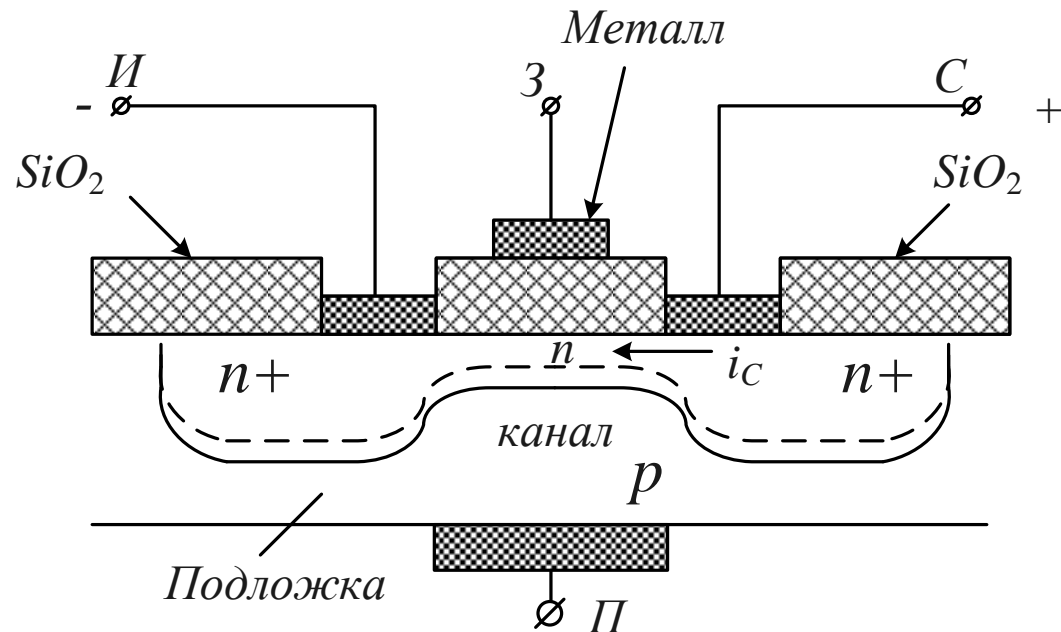
$$R_{СИ} \approx \frac{R_0}{\left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{ОТС}}\right)^2} . \text{ где } R_0 = R_{СИ} \text{ при } U_{ЗИ} = 0. \text{ К примеру, ес-}$$

ли $R_0 = 10 \text{ кОм}$, $U_{ОТС} = -6\text{В}$, $U_{ЗИ} = -3\text{В}$, то $R_{СИ} \approx 40 \text{ кОм}$.

В области насыщения ПТ используют как усилительный элемент.

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором
(МДП – металл-диэлектрик-полупроводник)
(МОП – металл – оксид кремния – полупроводник)

1. Полевые транзисторы со встроенным каналом
(режим обогащения)
depletion-type MOSFET



Исток и сток имеют сильно легированные области, обогащенные носителями.

Встроенный канал обогащен носителями, существует при $U_{зи} = 0$, протекает ток I_{CH4C} .

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

При $U_{зи} < 0$ ток i_C падает.

Передаточная ВАХ (n -канал)

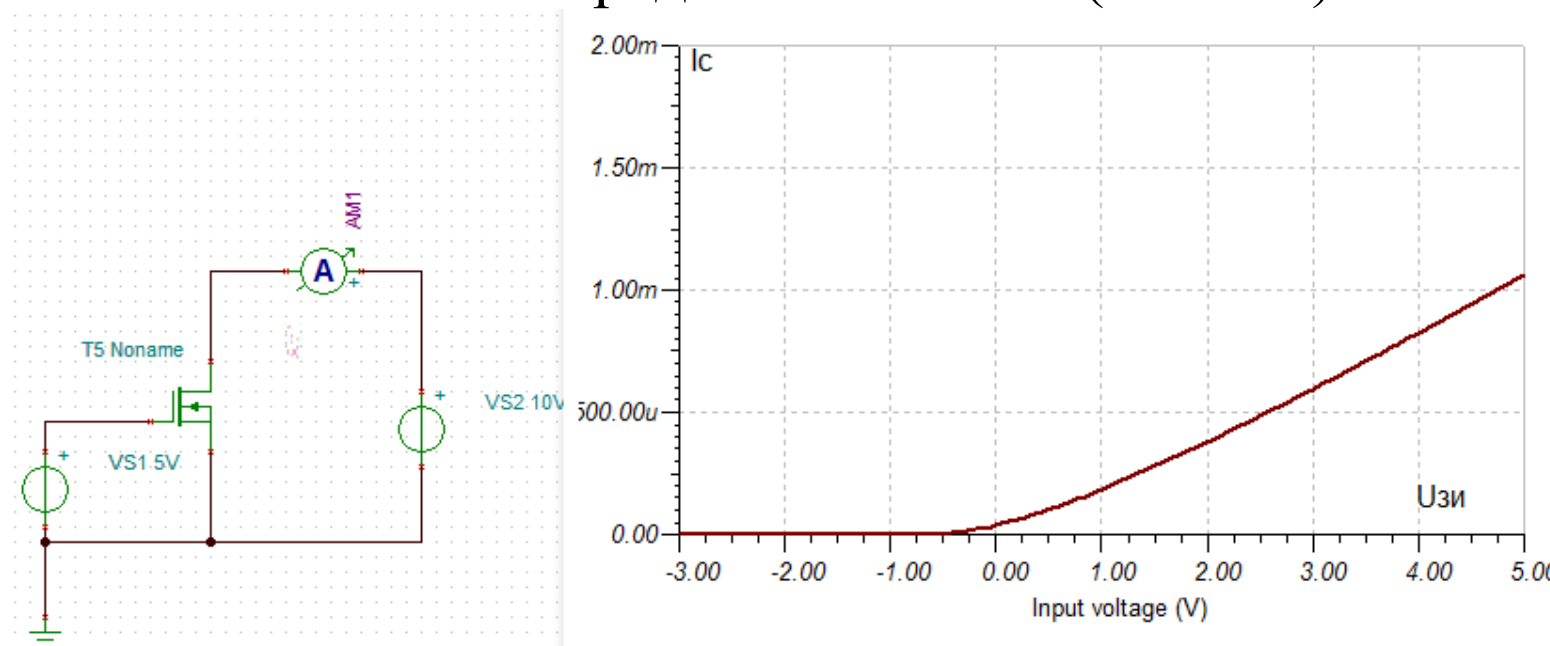


Рис.5.3
Выходные ВАХ

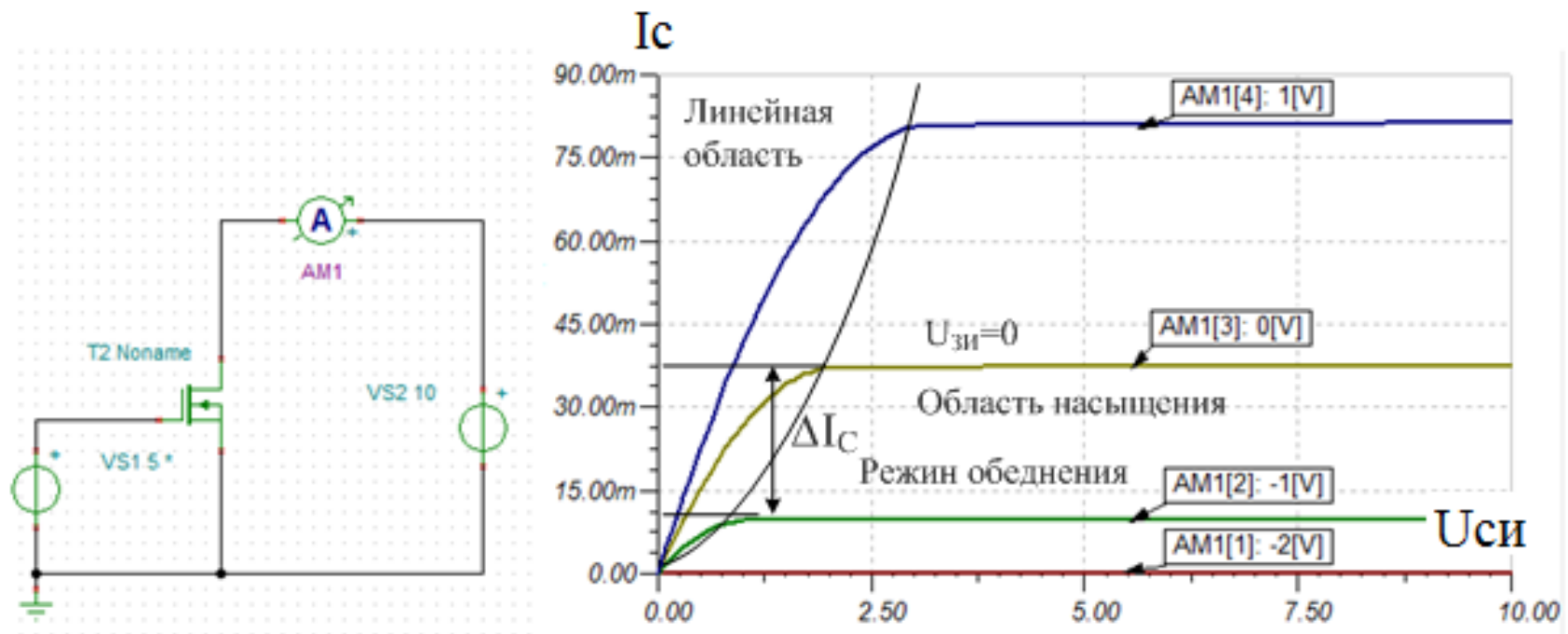
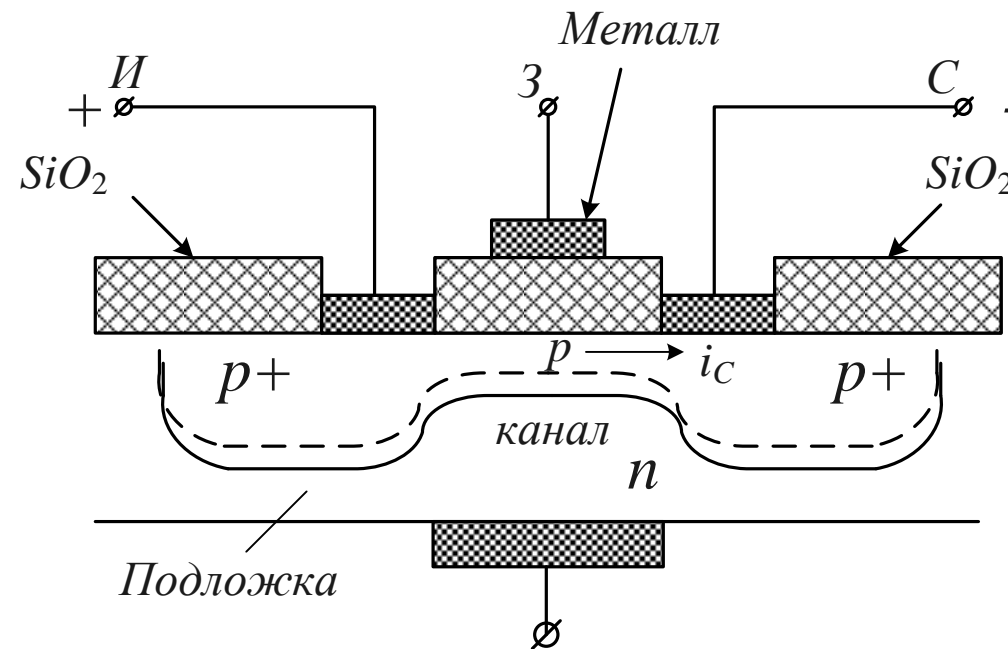


Рис. 5.4

$$S = 17 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

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



Положительное напряжение на истоке выталкивает дырки и уменьшает p -канал.

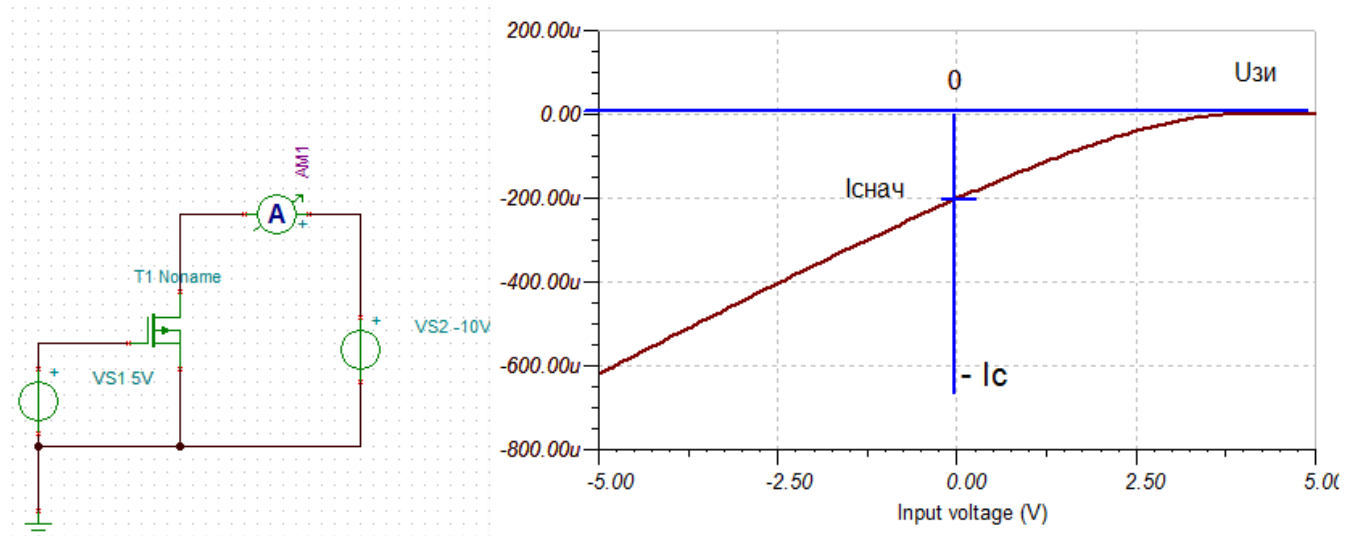


Рис.5.5.

Передаточная ВАХ МОП-транзистора со встроенным p -каналом

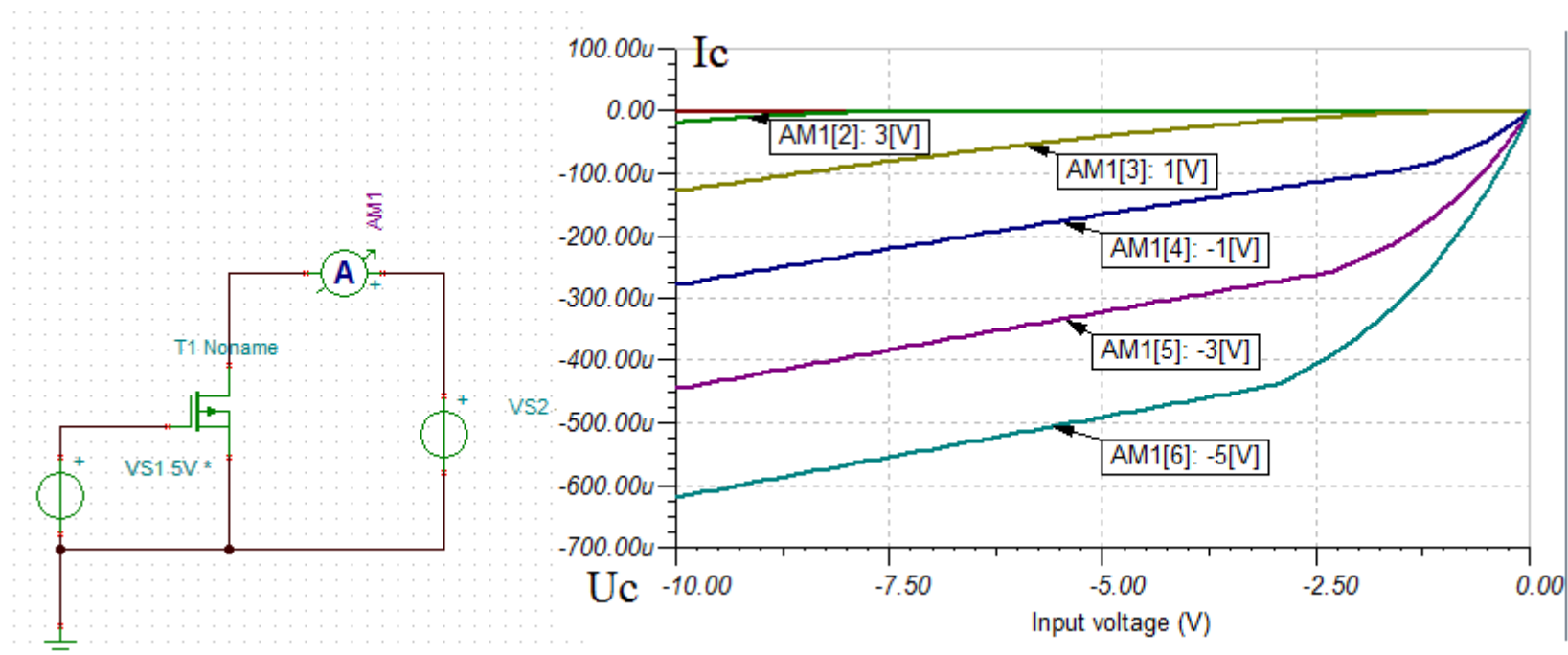
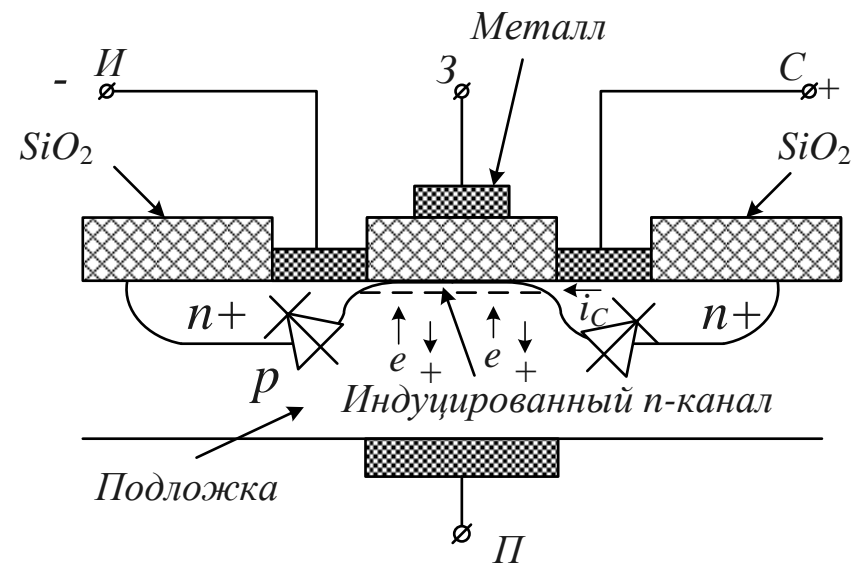
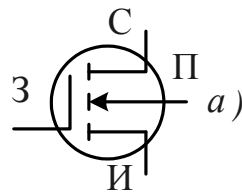


Рис.5.6

Выходные ВАХ МОП-транзистора со встроенным p -каналом

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом (режим обеднения) enhancement-type MOSFET



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*.

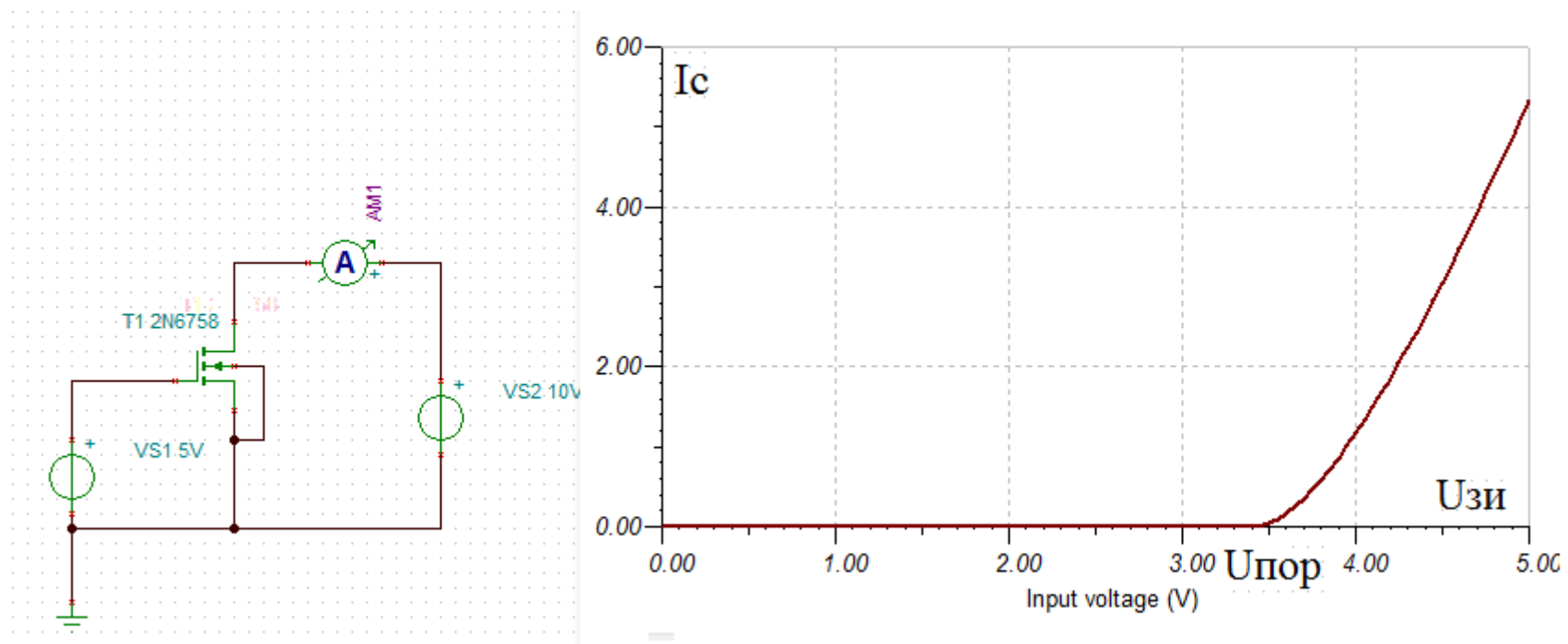


Рис.5.7. Передаточная ВАХ

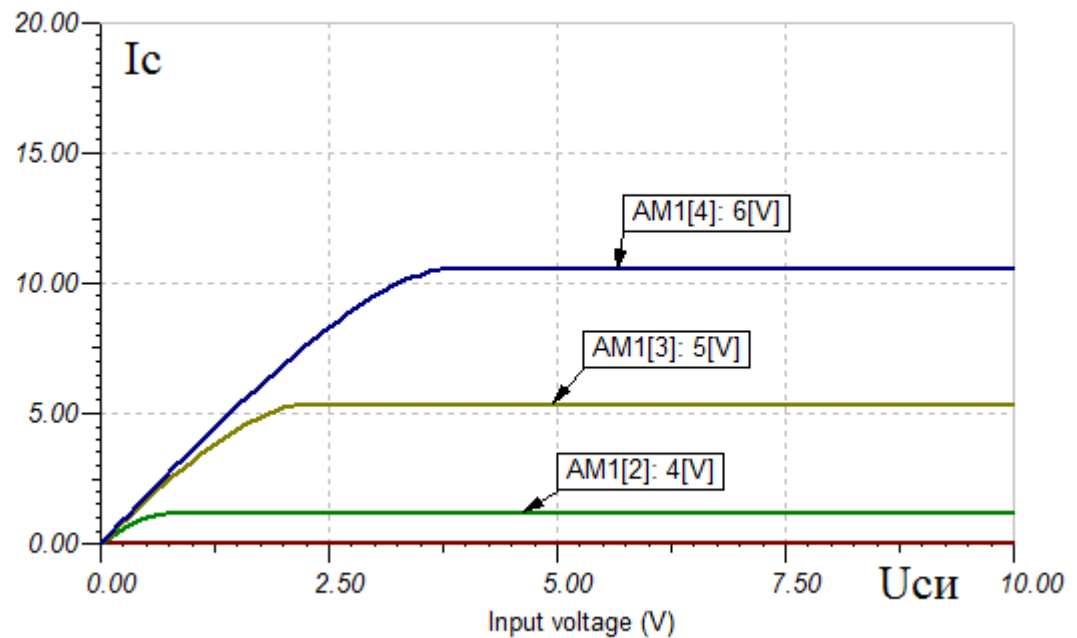
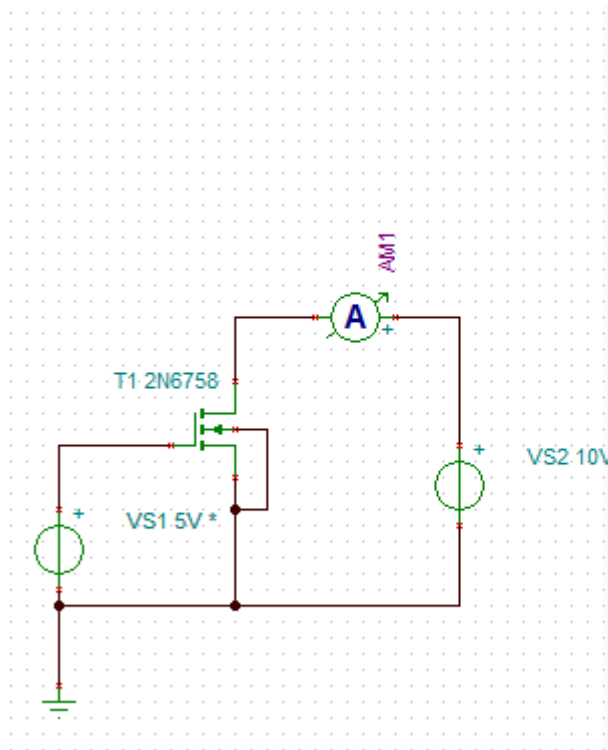
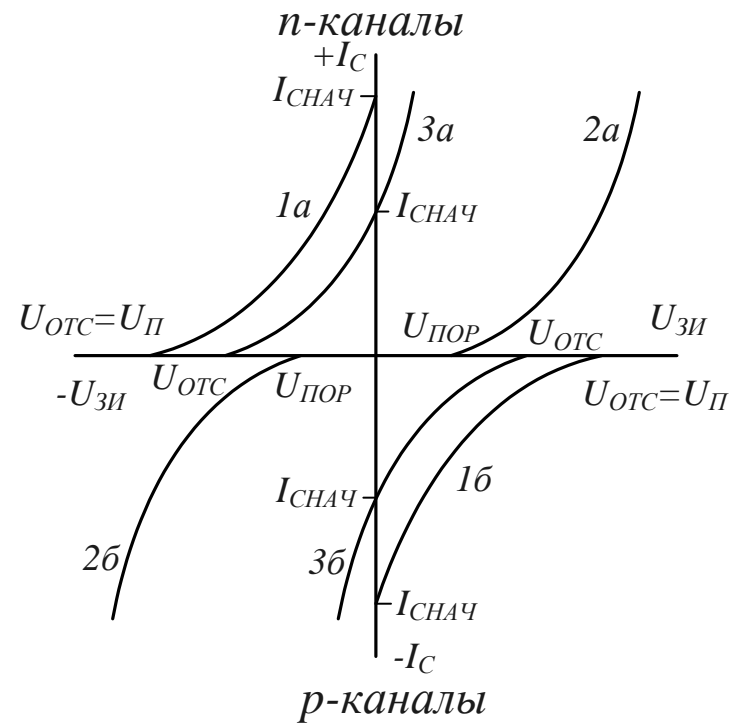


Рис.5.8. Выходные ВАХ

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.

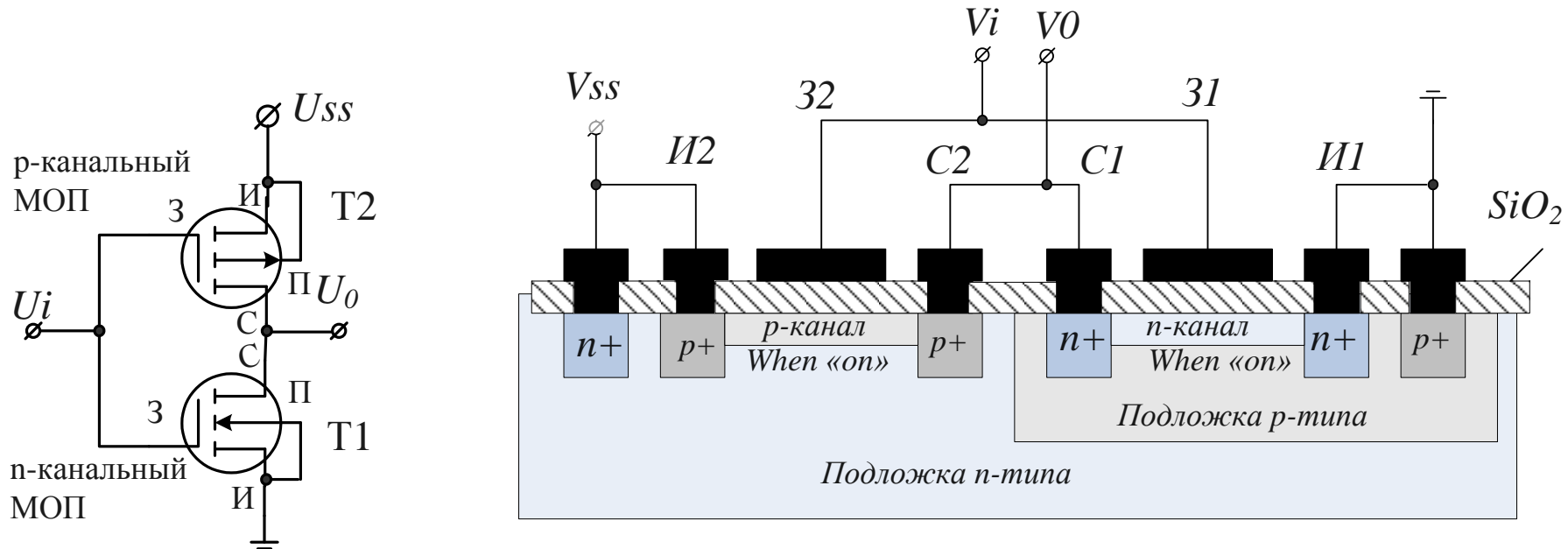


Передаточные характеристики полевых транзисторов разных типов

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

3.5. Комплементарные МОП транзисторы (КМОП)

На одной и той же подложке МОП транзисторы в р-каналом и n- каналом.



Конструкция комплементарного полевого транзистора КМОП

Если на вход поступает $U_i=5\text{В}$, напряжение $U_{zu1}=5\text{В}$, транзистор Т1 будет открыт. Так как в это время $U_i=5\text{В}=U_{ss}$, то транзистор

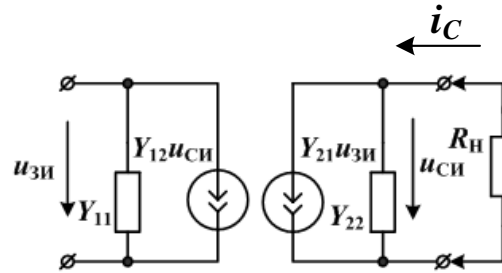
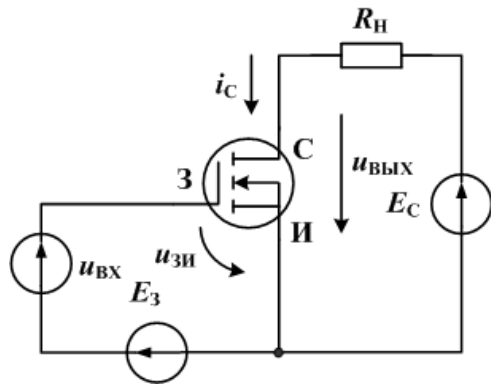
T2 будет закрыт и его сопротивление будет велико. В результате выходной сигнал на стоках транзисторов $U_0=0\text{В}$.

Если приложить к затворам напряжение $U_i=0\text{В}$, то транзистор T1 будет закрыт, а T2 откроется. Получим выходное напряжение $U_0=5\text{В}$.

Получили инвертер на КМОП транзисторах. Всегда один из транзисторов закрыт и имеет очень малый ток, потребляемая мощность весьма мала.

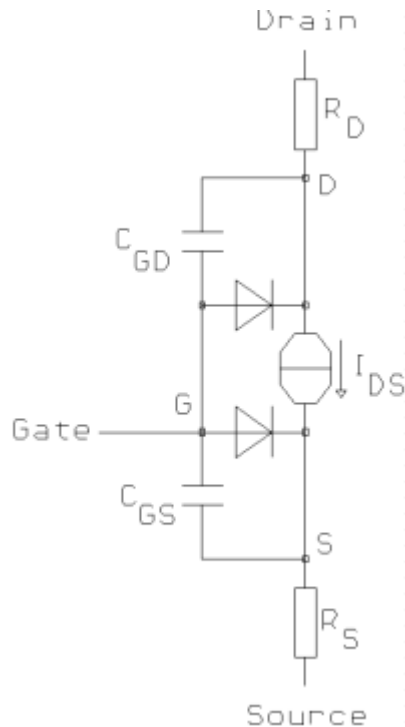
Достоинством КМОП микросхем является их высокая скорость переключения.

Эквивалентные схемы полевых транзисторов



$$i_z = y_{11}u_{zu} + y_{12}u_{cu}$$

$$i_c = y_{21}u_{zu} + y_{22}u_{cu}$$



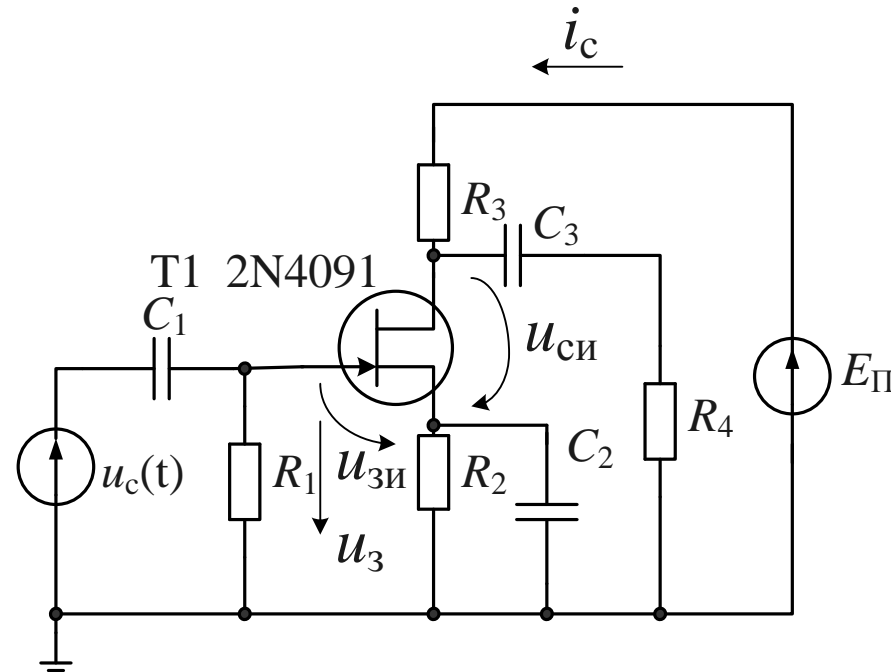
В этих уравнениях:

- 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.

Spice модель

Пример расчета усилителя низкой частоты на полевом транзисторе

Схема с общим истоком



Параметры усилителя:

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

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

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

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 $u_{zu0} = -i_{c0}R_2$.

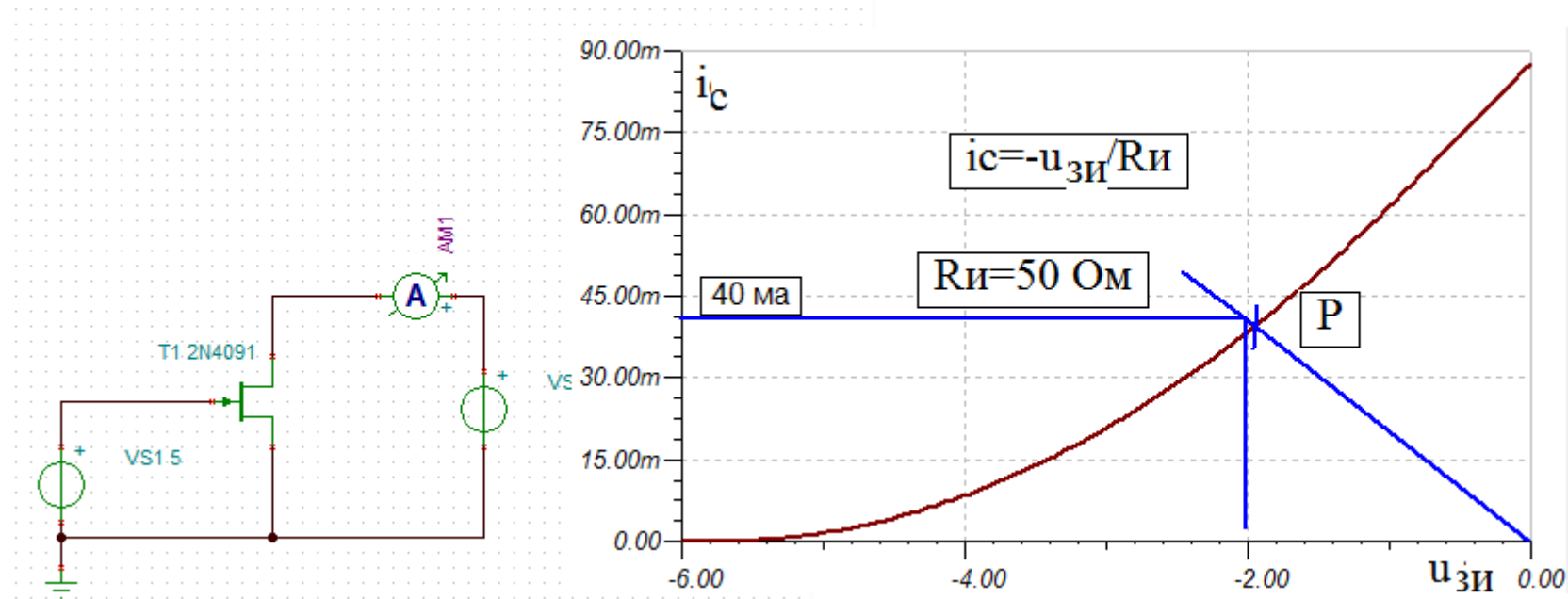
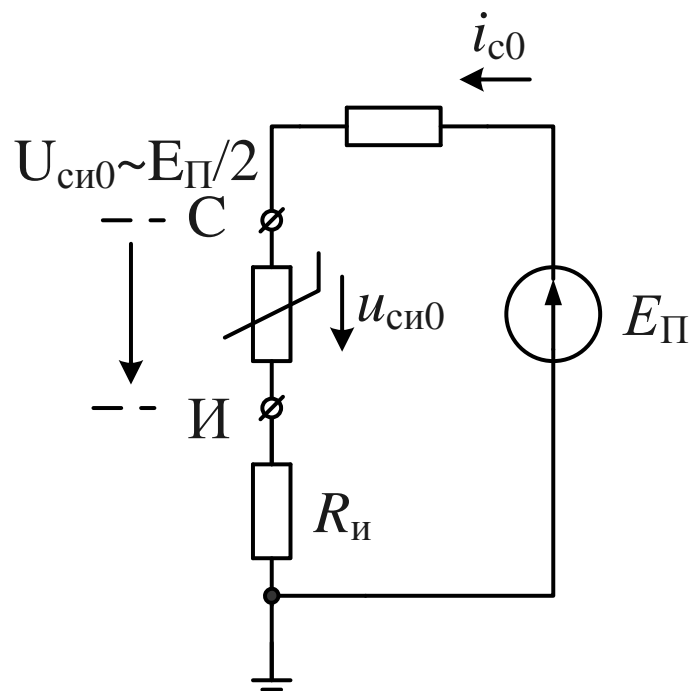


Рис.5.9.

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

Выходная цепь.



- Строим выходную ВАХ для $u_{зи0} = -2V$.

- Строим нагрузочную прямую и находим режим покоя:

$$u_{си0} = 10V, i_{c0} = 40mA.$$

- По передаточной ВАХ в рабочей точке находим крутизну:

$$S = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{зи}} = 20 \frac{mA}{V}.$$

Рассчитаем: $i_{c0} \cdot R_c = 40mA \cdot 200\Omega = 8V$,

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

С помощью двух курсоров найдем выходную проводимость транзистора:

$$Y_{22} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{СИ}} = \frac{789,63 \mu A}{2,02 V} = 390,9 \cdot 10^{-6} C_m.$$

Выходное сопротивление $R_{вых} = \frac{1}{Y_{22}} = 2558 \Omega.$

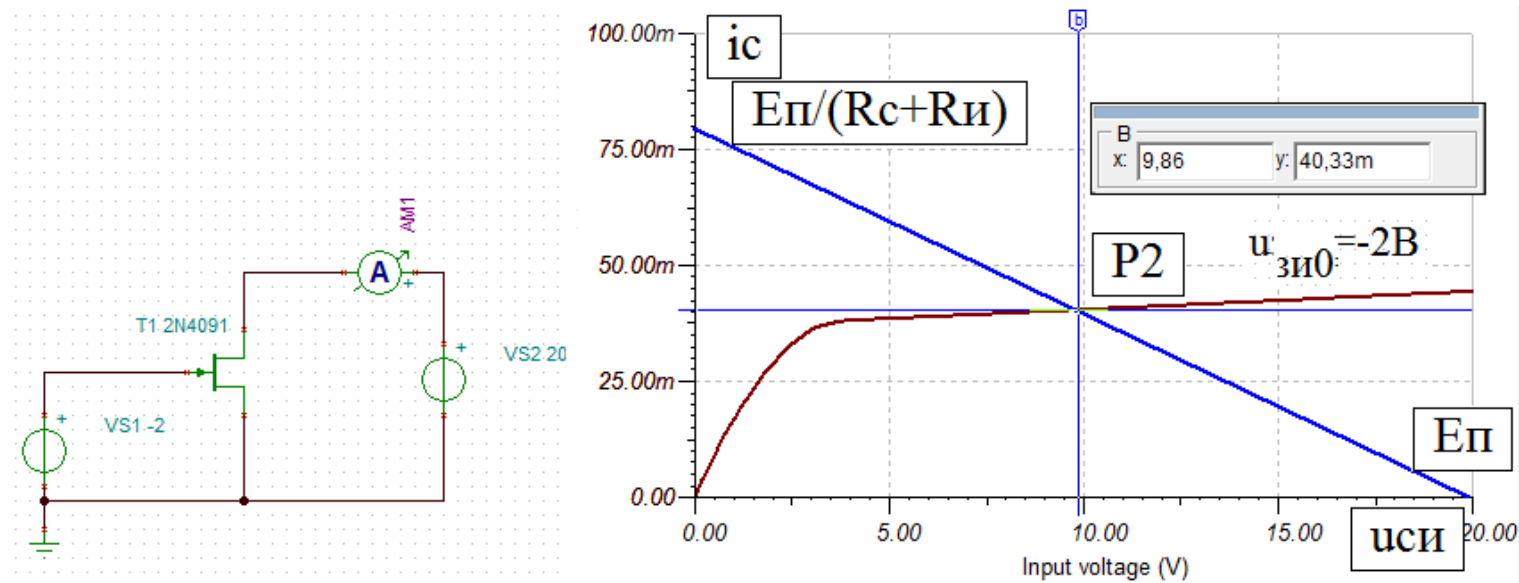
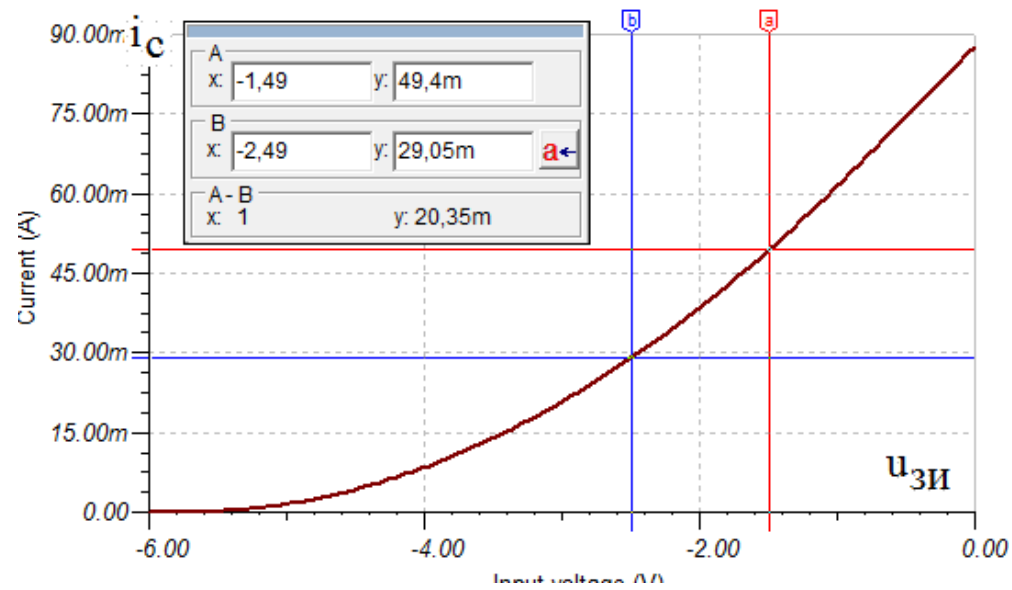


Рис.5.10

Расчет рабочей точки выходной цепи



Расчет крутизны

$$S = 20 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

Выполним моделирование схемы в режиме покоя.

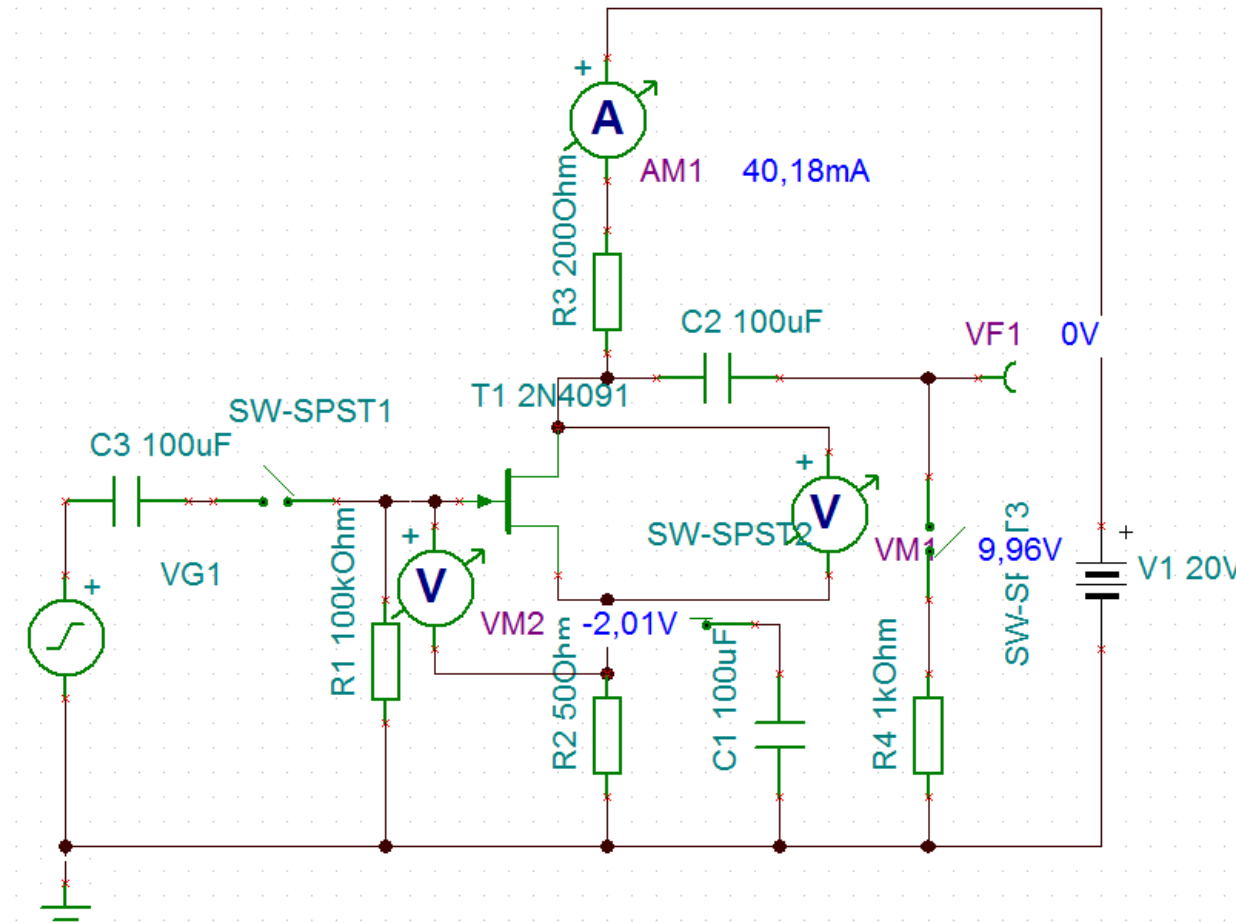
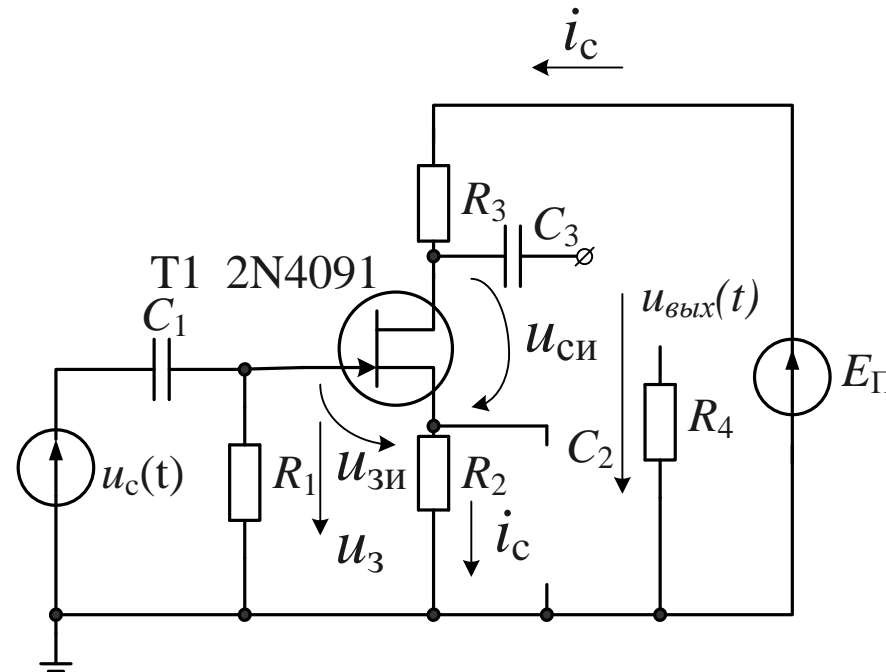


Рис.3.23*

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:

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

$$\Delta u_{зи} = \frac{\Delta u_{c\sim}}{1 + S R_2}.$$

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

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

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

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

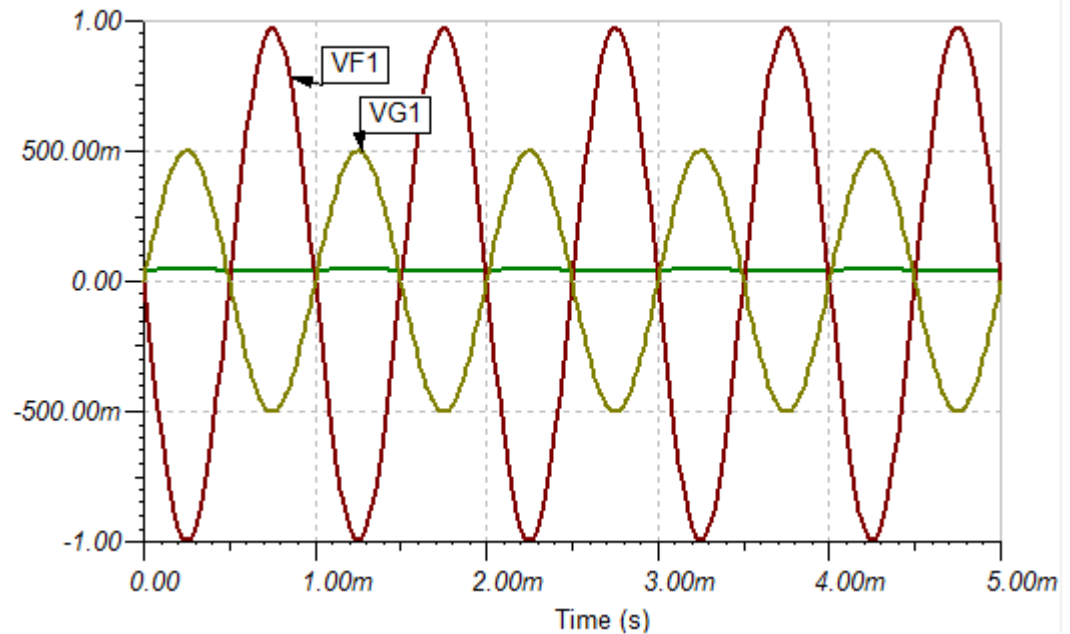
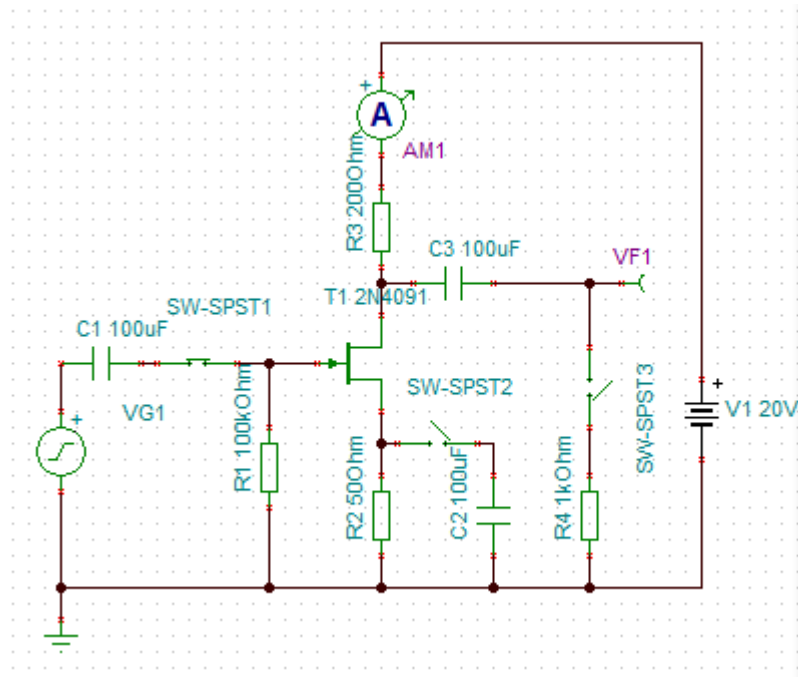
$$i_c(t) = i_{c0} + I_{Cm} \sin \omega t = (40 + 5 \sin \omega t) \text{ мА},$$

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

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{твых}}}{U_{\text{твх}}} = 2.$$

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.

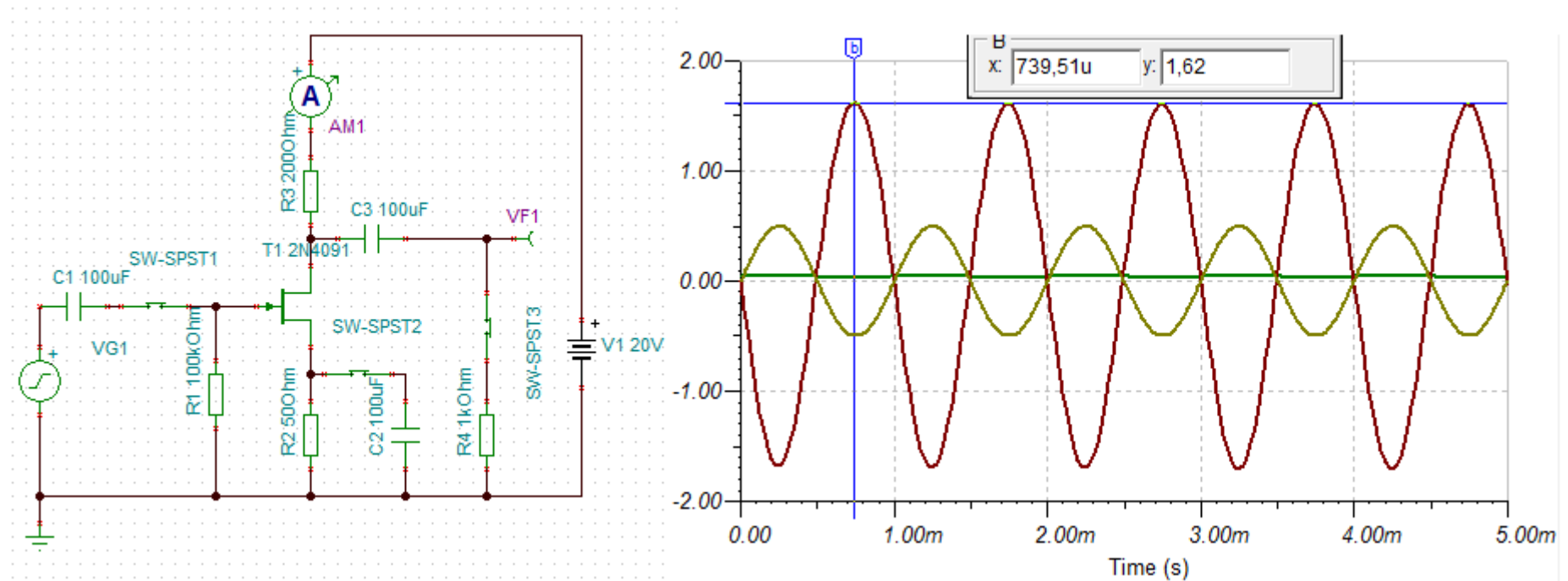
Получим:

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

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

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

$$K_U = 3,32.$$



Частотные свойства усилителя на ПТ с нагрузкой

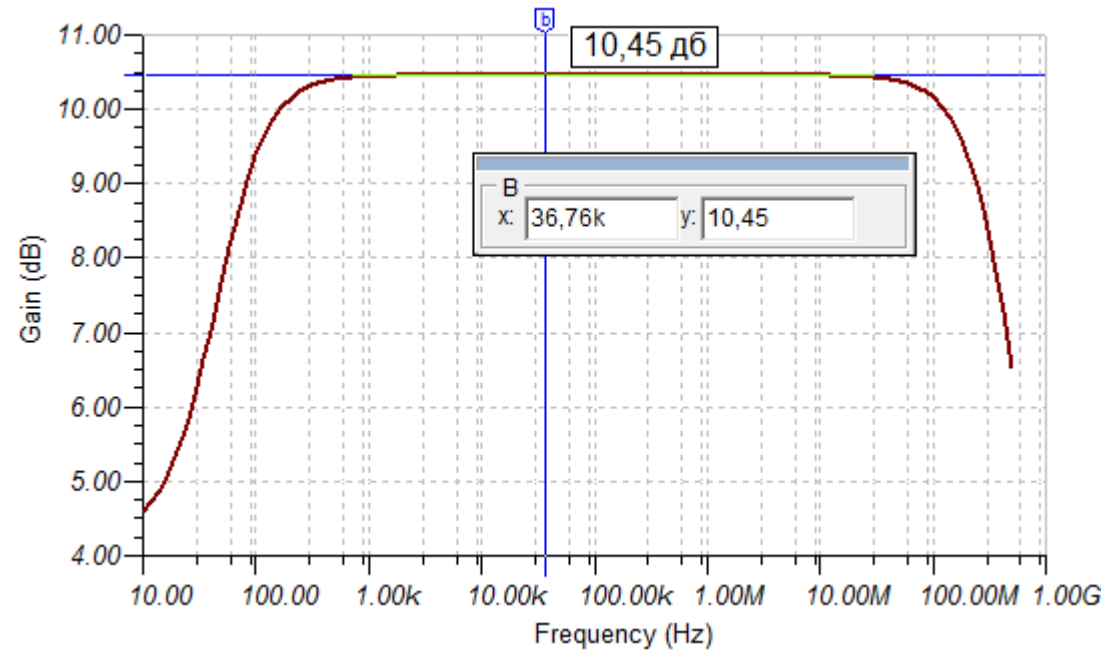


Рис.5.12

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

Истоковый повторитель напряжения

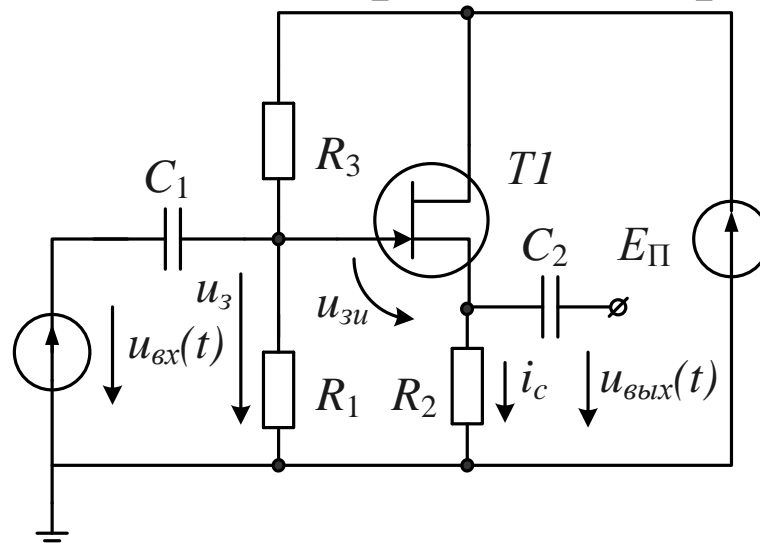


Рис.5.13

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* – *R3*.
Получим $R_3=200$ кОм.

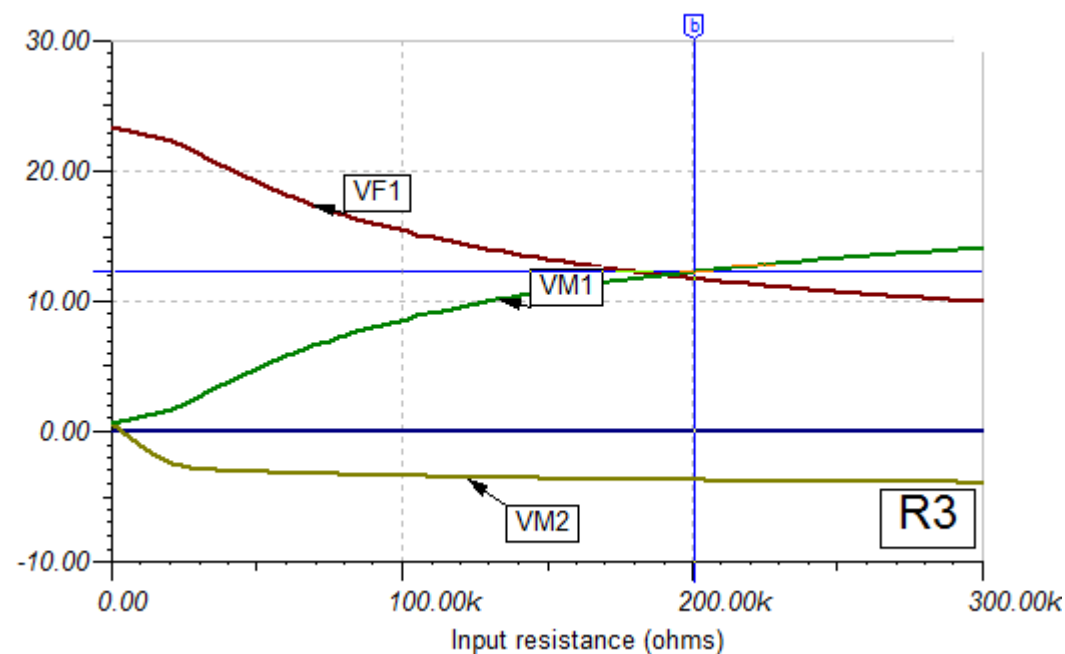
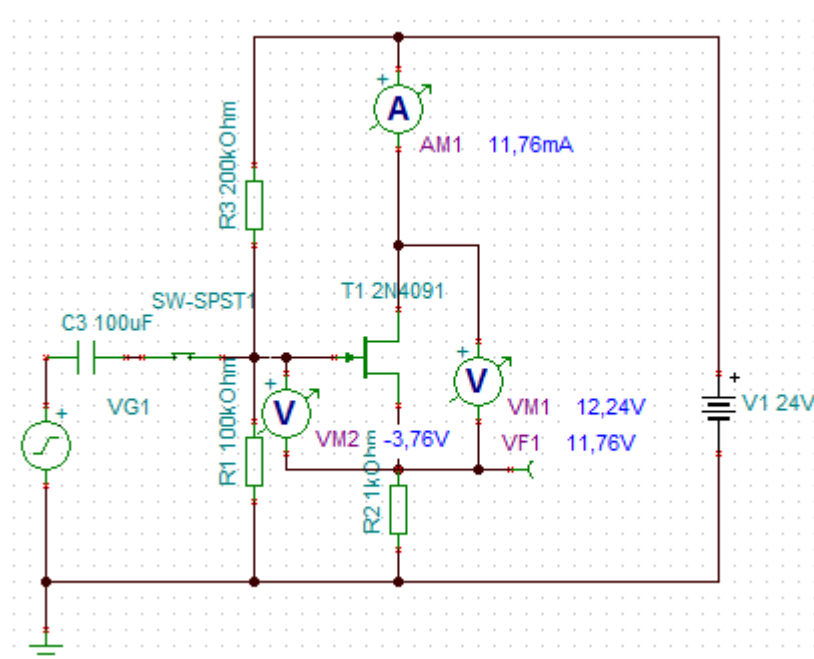


Рис.5.14

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:

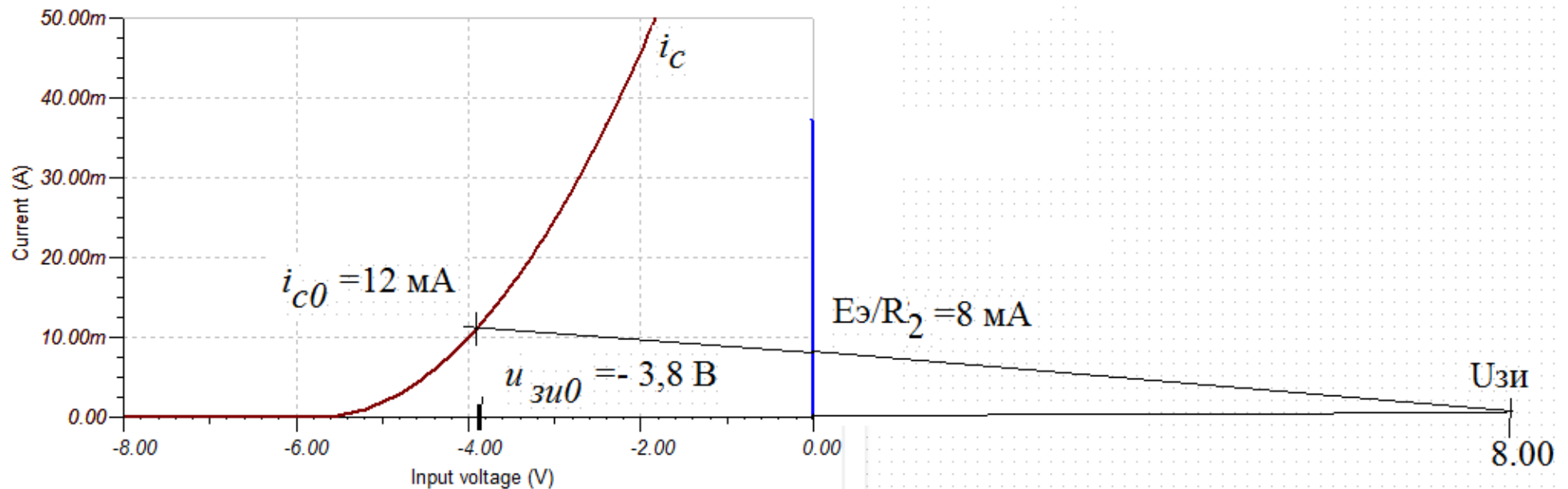
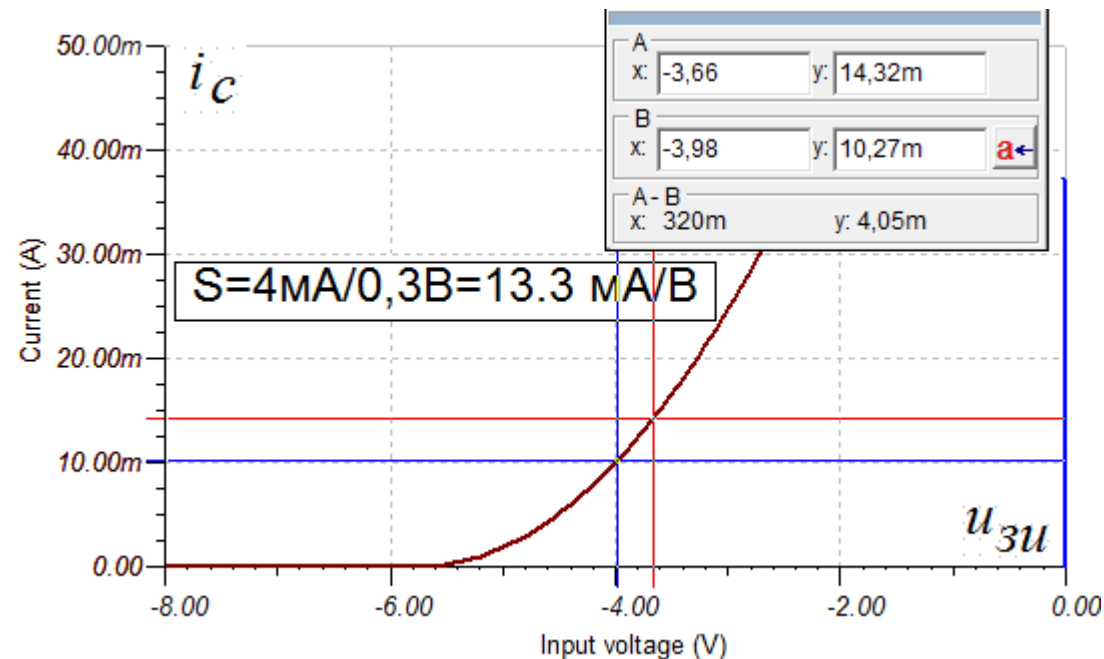


Рис.5.15

Результаты совпадают с моделированием.

Определяем крутизну в рабочей точке.



$$S = 13,3 \frac{mA}{V}$$

3. Расчет выходной цепи

На выходных ВАХ строим нагрузочную прямую с отрезками на

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

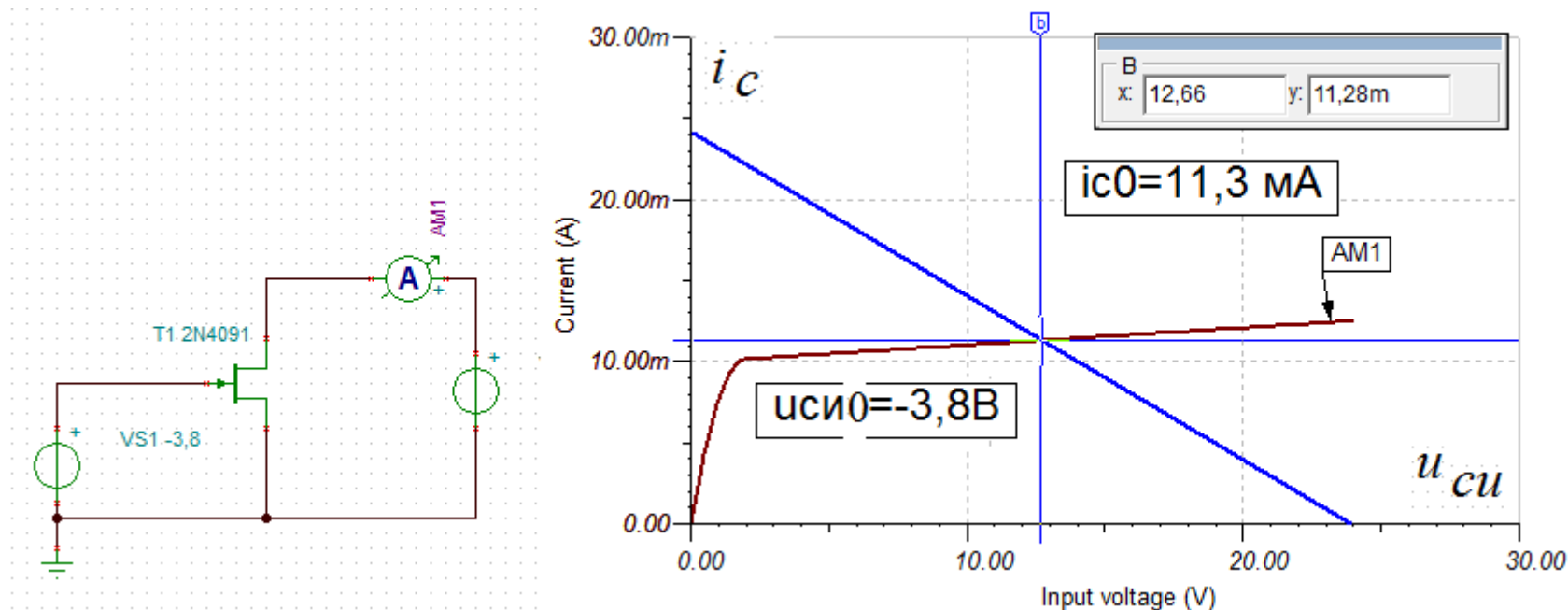


Рис.5.16

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:

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

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

Вычислим мгновенные значения:

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

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

$$U_{\text{нт}} = 0,464 \text{ В}.$$

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:

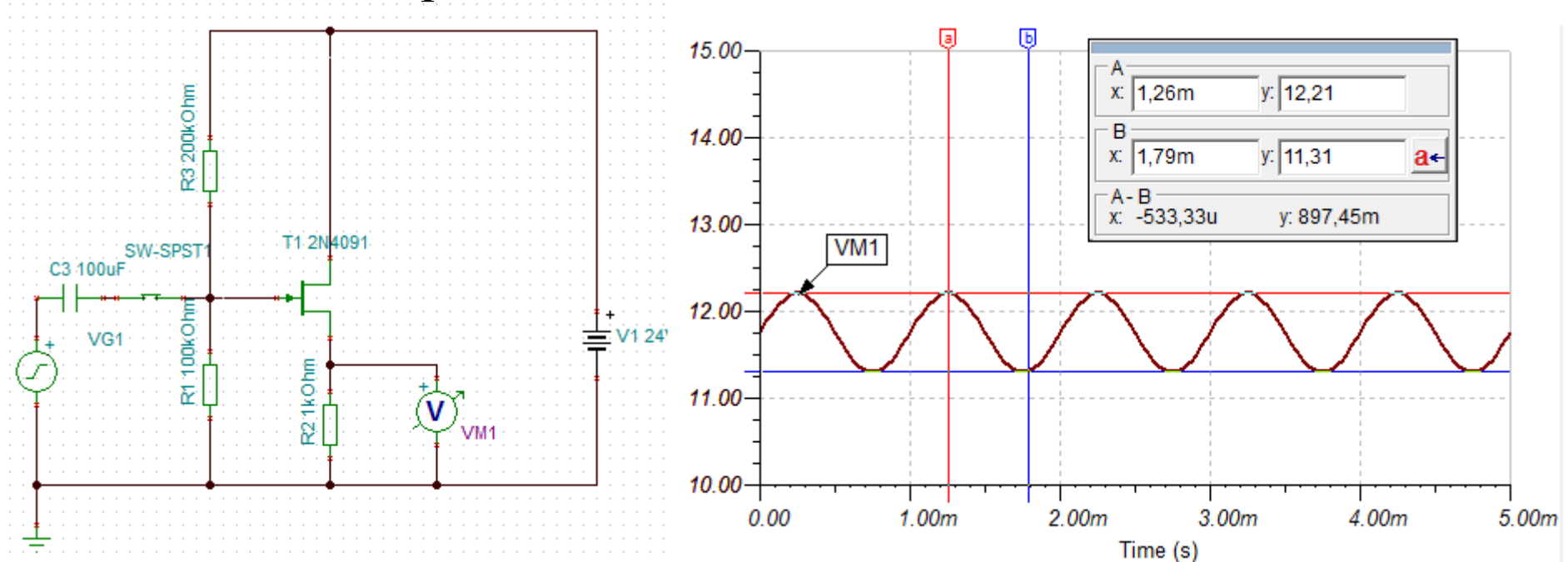
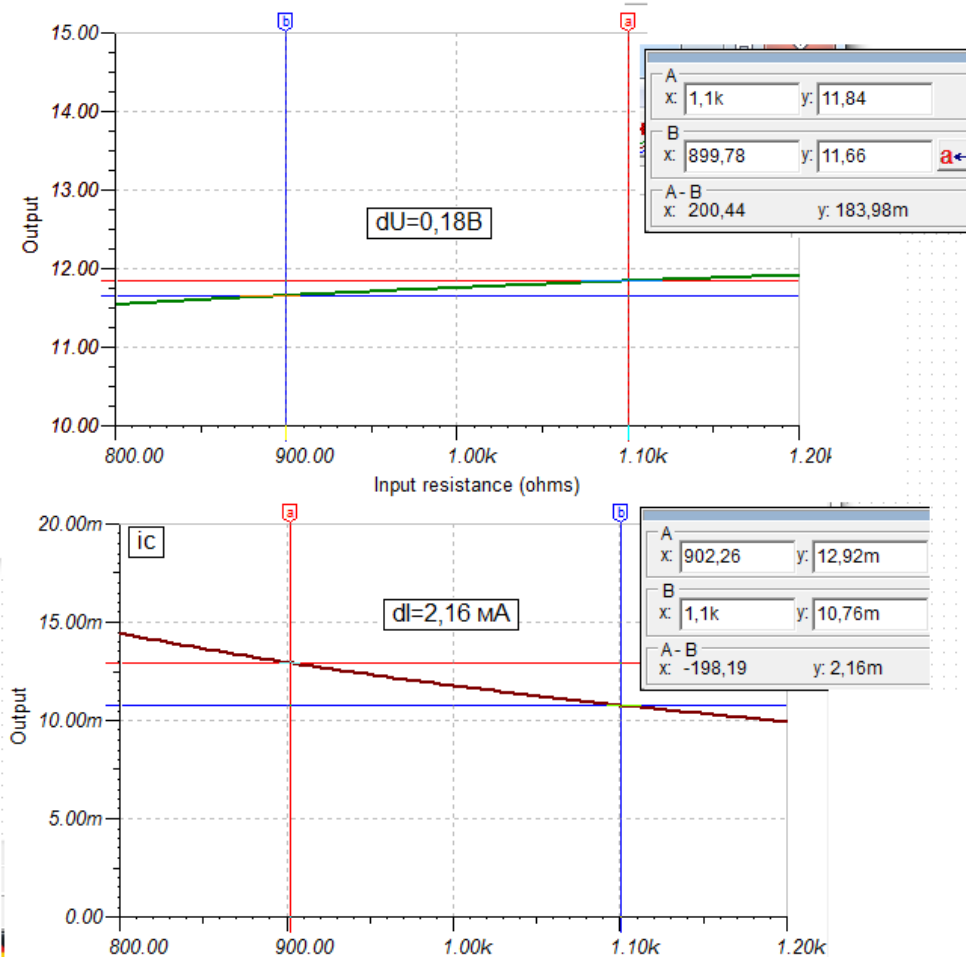
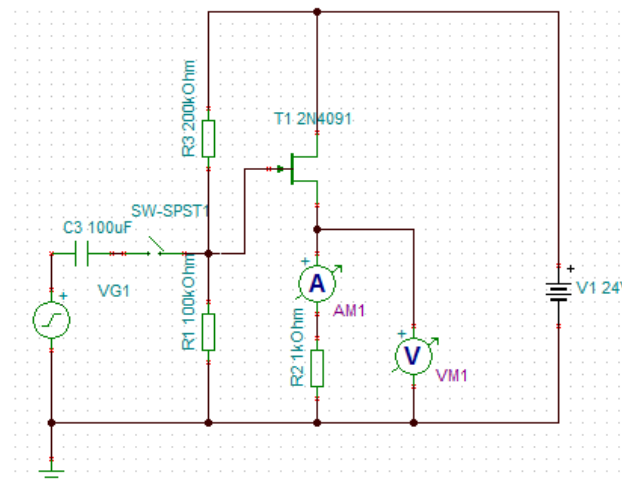


Рис.5.18

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

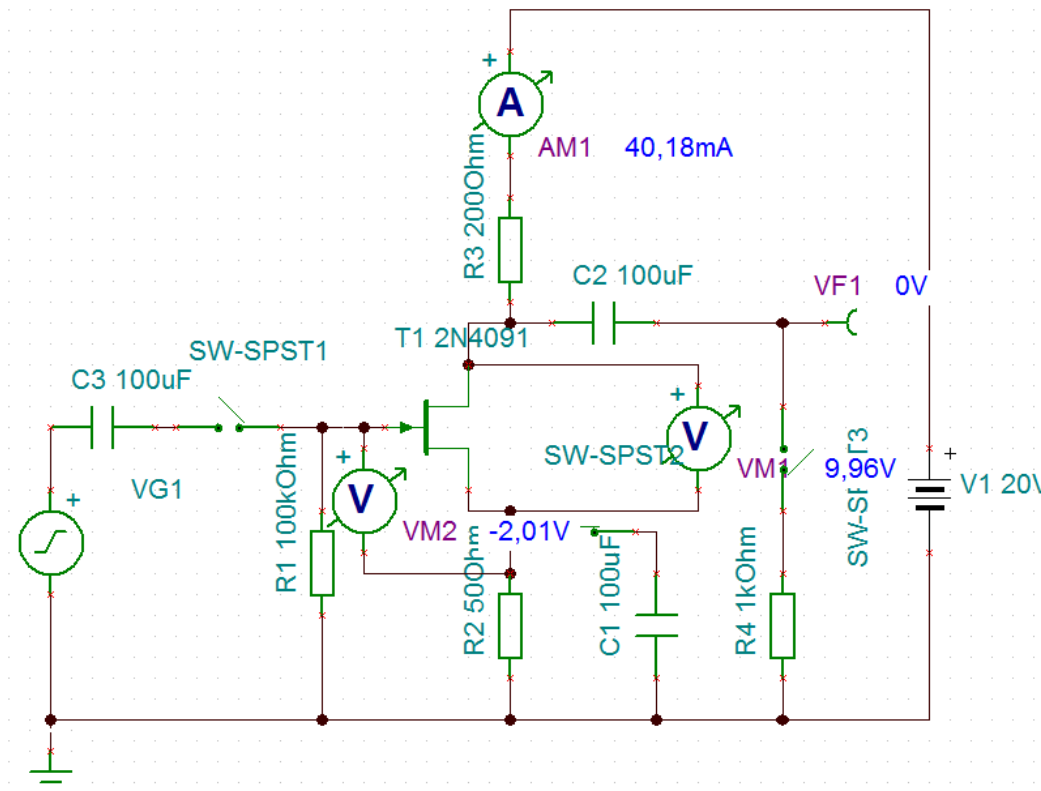
Расчет выходного сопротивления истокового повторителя в схеме рис.5.19



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

Расчет каскада на полевом транзисторе в режиме малого сигнала с использованием Y-параметров

Для модели усилительного каскада на полевом транзисторе 2N4091 с общим истоком (рис.3.23*), в которой подключен источник сигнала и нагрузка, выполним расчет по переменной составляющей в режиме малого сигнала.



В схеме модели на полевом транзисторе 2N4091 с общим истоком установлены следующие компоненты: $R_1=100\text{кОм}$, $R_2=R_{\text{И}}=50\text{Ом}$, $R_3=R_{\text{С}}=200\text{Ом}$, $R_4=R_{\text{Н}}=1\text{кОм}$. Емкости $C1$, $C2$, $C3$ имеют номиналы 100мкФ и могут не учитываться в расчетах на средних частотах.

Полевой транзистор в приближенных расчетах для малых сигналов заменяют четырехполюсником в Y - параметрах (уравнения 3.3).

Для транзистора 2N4091 в рабочей точке мы ранее нашли крутизну $Y_{21} = S = 20\text{мА} / \text{В}$ и выходную проводимость $Y_{22} = 390,9 \cdot 10^{-6} \text{См}$. Выходное сопротивление

$$R_{\text{вых}} = \frac{1}{Y_{22}} = 2558 \text{Ом}.$$

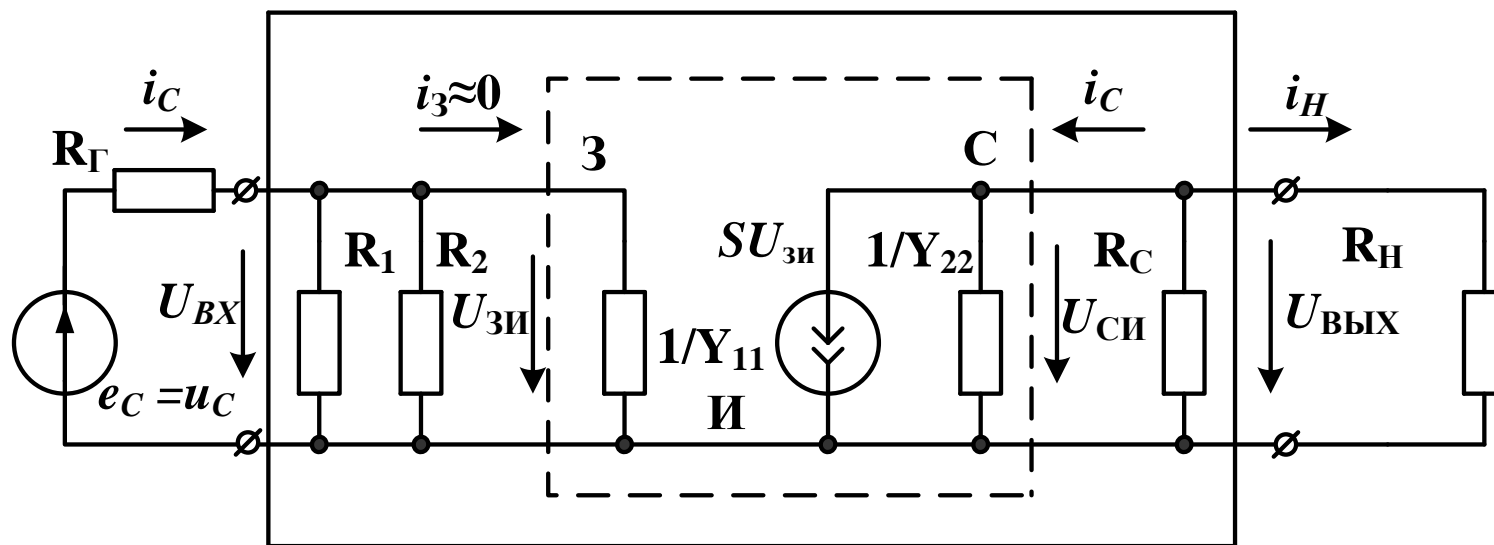


Схема замещения усилителя с Y -параметрами

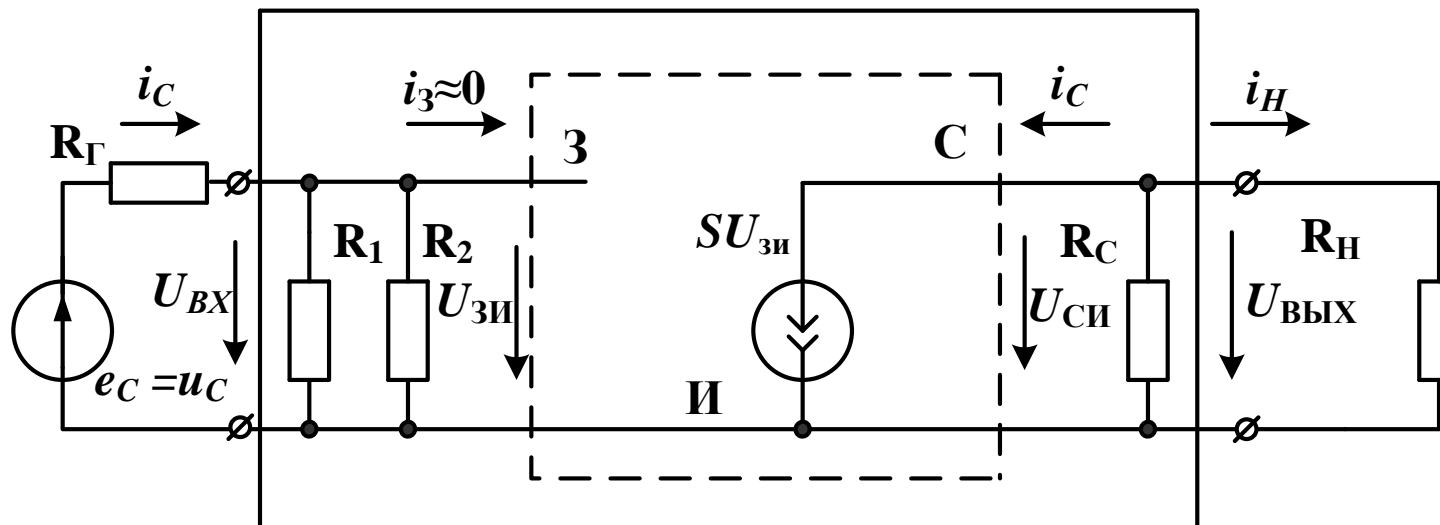
Исключим из этой схемы элементы $\frac{1}{Y_{11}}$ и $\frac{1}{Y_{22}}$, которые превышают значения остальных резисторов. Получим упрощенную схему.

Обозначим $R_{вх} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$, $R_{вых} = R_C$.

Находим коэффициент усиления по напряжению:

$$\underline{K}_E = \underline{U}_{\text{вых}} / \underline{E}_c = \frac{-S R_C \cdot R_H / (R_C + R_H) \cdot R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)}{R_\Gamma + R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)} = 3,35.$$

В расчете учтено, что $R_\Gamma=0$, $R_{\text{вх}}=100\text{кОм}$.



Упрощенная схема с Y-параметрами

Экспериментальное значение усиления по напряжению в модели составляло 3,33.

Находим коэффициент усиления по току:

$$\underline{K}_I = \underline{I}_n / \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_{вых} R_{BX}}{R_H \underline{E}_c} = \underline{K}_E \frac{R_{BX}}{R_H} = 3,35 \frac{100 \text{кОм}}{1 \text{кОм}} = 335 .$$

Находим коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \underline{K}_E \cdot \underline{K}_I = 3,35 \cdot 335 = 1122.$$

Достоинством усилительного каскада на полевом транзисторе является большое входное сопротивление. К недостаткам следует отнести меньшее усиление и быстродействие.