

Лабораторная работа №5

Тема: «Исследование характеристик полевого транзистора и усилителя на полевом транзисторе»

Цель работы: Исследование вольт-амперных характеристик полевого транзистора и усилителя на его основе.

Теоретическая часть

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 обусловлено 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. В зависимости от выполнения затвора униполярные транзисторы делятся на две группы: с управляющим *p-n*-переходом и с изолированным затвором на основе конструкции металл-диэлектрик-полупроводник (так называемые МДП-транзисторы).

Устройство полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом показано на рисунке 5.1. Между истоком (*I*) и стоком (*C*) расположен *n*-канал из полупроводника *n*-типа и включен источник напряжения положительным полюсом к стоку. В *n*-канале есть ток проводимости I_c , значение которого зависит от сопротивления канала, связанного с его шириной. Ширину канала можно изменять, включив между затвором (*З*) и истоком (*I*) источник управляющего напряжения E_3 отрицательным полюсом к затвору. Передаточные характеристики полевых транзисторов, которые выражают зависимость тока стока от напряжения затвор-исток $I_c(U_{зи})$, показаны на рисунке 5.4.

Устройство полевого транзистора с изолированным затвором показано на рисунке 5.2.

В полевых транзисторах с изолированным затвором электрод затвора изолирован от полупроводникового канала с помощью слоя диэлектрика из двуокиси кремния SiO_2 .

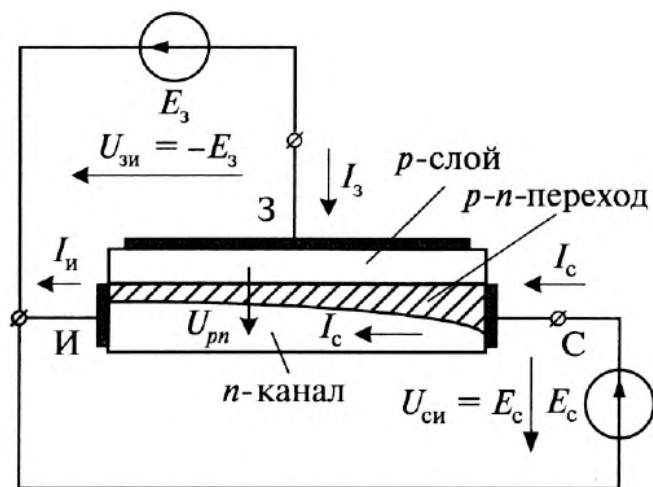


Рисунок 5.1 – Устройство полевого транзистора с управляющим p-n-переходом

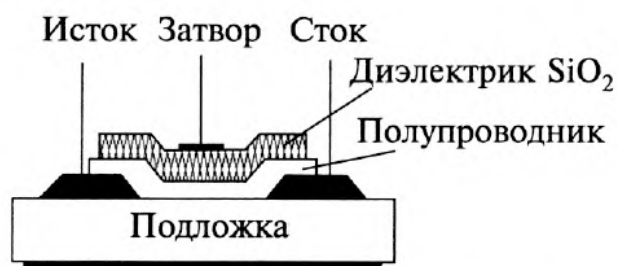


Рисунок 5.2 – Устройство полевого транзистора с изолированным затвором

Ток утечки затвора пренебрежимо мал. Полупроводниковый канал может быть обеднен носителями заряда или обогащен ими. При обедненном канале электрическое поле затвора повышает его проводимость, поэтому канал называется *индуцированным*. Если канал обогащен носителями, то он называется *встроенным*. Электрическое поле в этом случае в зависимости от полярности напряжения $U_{зи}$ может приводить либо к обеднению канала носителями зарядов, либо к обогащению его. В результате изменяется проводимость канала.

Проводимость канала может быть электронной или дырочной. Если канал имеет электронную проводимость, то он называется *n*-каналом. Каналы с дырочной проводимостью называются *p*-каналами. Подложка (П) является полупроводником, отличающимся по проводимости от канала. Как правило, подложку соединяют с истоком.

Схематические изображения полевых транзисторов показаны на рисунке 5.3. Важное значение имеют передаточные характеристики полевых транзисторов, позволяющие определить полярность управляющего напряжения, направление тока в канале и диапазон изменения управляющего напряжения (рисунок 5.4).

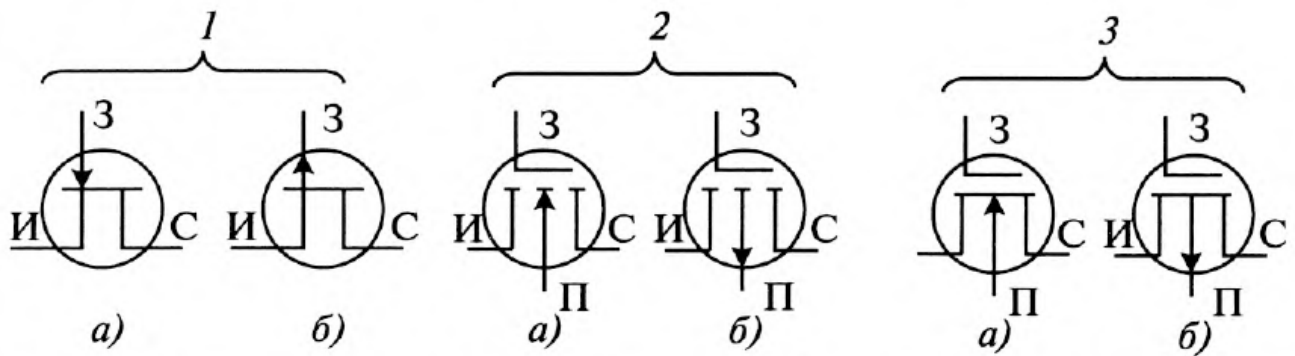


Рисунок 5.3 – Схематические изображения полевых транзисторов:
1 – с управляющим p - n -переходом; 2 – с индуцированным каналом;
3 – со встроенным каналом; а – для канала n -типа, б – для канала p -типа

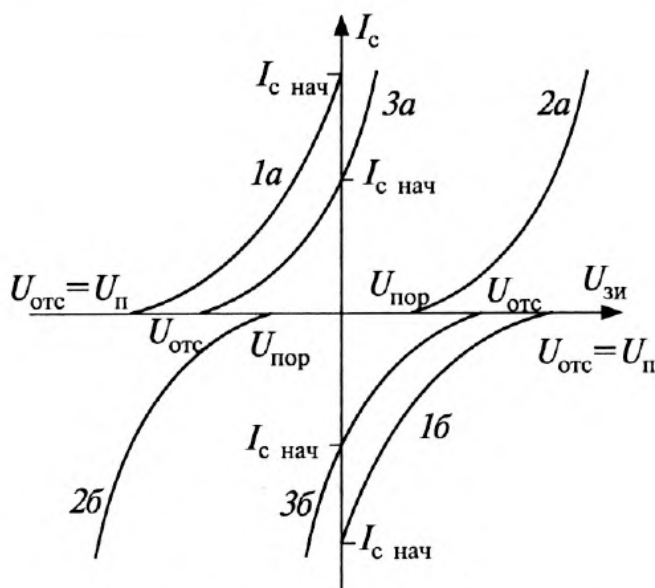


Рисунок 5.4 – Передаточные характеристики полевых транзисторов разных типов



Рисунок 5.5 – Выходные характеристики полевого транзистора КП902

Полевые транзисторы с каналом n -типа имеют положительный ток и работают при положительном напряжении на стоке, а полевые транзисторы с каналом p -типа имеют отрицательный ток и работают при отрицательном напряжении на стоке. Характеристики полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом при нулевом напряжении $U_{зи}$ имеют максимальное значение тока $I_{c \text{ нач}}$. При увеличении запирающего напряжения ток стока уменьшается и при напряжении отсечки $U_{отс}$ становится близким к нулю.

Характеристики транзисторов с индуцированным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют нулевой ток. Ток стока появляется при напряжении на затворе больше порогового и увеличивается с ростом напряжения $U_{зи}$.

Характеристики транзисторов со встроенным каналом при нулевом напряжении на затворе имеют начальное значение тока $I_{c \text{ нач.}}$. Эти транзисторы работают как при положительных, так и при отрицательных напряжениях на затворе.

Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n-типа показаны на рисунке 5.5.

В линейной области полевой транзистор используется как сопротивление, управляемое напряжением на затворе, а в области насыщения – как усилительный элемент. Усилительные свойства определяются крутизной вольт-амперной характеристики

$$S = \left| \frac{di_c}{dU_{зи}} \right|.$$

Упрощенная схема усилительного каскада на полевом транзисторе с *общим истоком* показана на рисунке 5.6,а. Источник напряжения E_z создает требуемое напряжение смещение на затворе, а источник напряжения E_c – напряжение питания цепи стока. Источник переменного сигнала u_c подключен между затвором и истоком. На рисунке 5.6,б показана схема замещения усилительного каскада на полевом транзисторе 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 $u_{си}$.

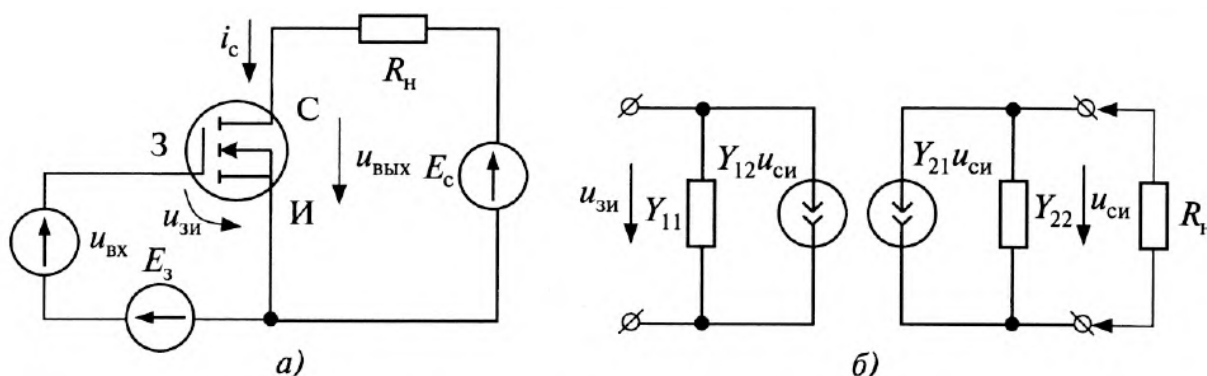


Рисунок 5.6 – Схема усилителя на полевом транзисторе (а) и схема замещения в Y-параметрах (б)

Этой схеме замещения (без учета нагрузки) соответствуют уравнения полевого транзистора в Y-параметрах:

$$i_z = y_{11}u_{зи} + y_{12}u_{си};$$

$$i_c = y_{21}u_{зи} + y_{22}u_{си}.$$

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 $y_{22} = 1/R_{\text{вых}}$, причем $R_{\text{вых}}$ составляет 30 кОм и более.

Схема усилительного каскада с общим истоком показана на рисунке 5.7.

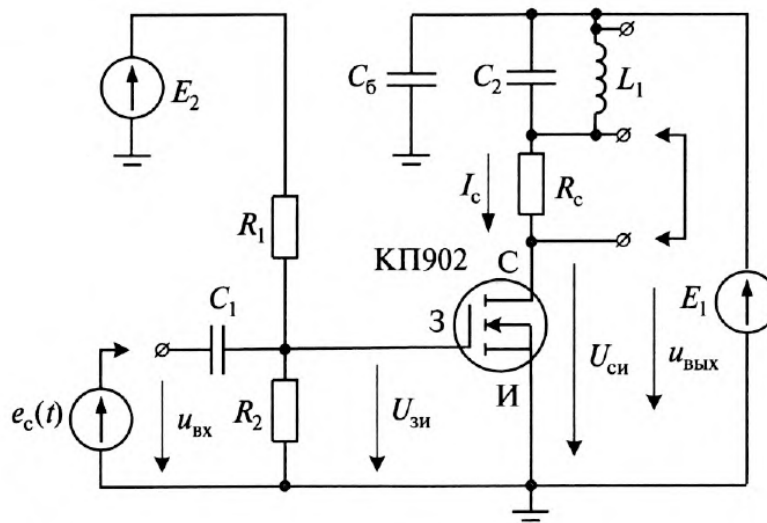


Рисунок 5.7 – Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

Источник постоянного напряжения E_1 создает режим по постоянному току в цепи стока. Источник создает смещение на затворе, которое регулируется делителем из R_1 и R_2 . Усилительный каскад может работать как резистивный усилитель. В этом случае индуктивность L_1 следует замкнуть перемычкой и нагрузкой транзистора в цепи стока будет сопротивление R_c . Для уменьшения искажений в резистивном усилителе напряжение смещения затвора выбирают таким, чтобы $U_{зи} \approx E_1/2$.

Входное сопротивление каскада без учета разделительной емкости C_1

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Коэффициент усиления каскада по напряжению для малого переменного сигнала в режиме холостого хода без учета C_1 равен $K'_{u_x} = -SR_c$ (выходное сопротивление полевого транзистора $R_{\text{вых}} \approx 30$ кОм много больше, чем R_c и не

учитывается в резистивном усилителе). С учетом коэффициента передачи входной цепи коэффициент усиления по напряжению

$$K_{Ux} = SR_c K_{ВЦ} = SR_c \frac{R_{ВХ} \omega C_1}{\sqrt{1 + (R_{ВХ} \omega C_1)^2}}.$$

В резонансном усилителе на полевом транзисторе в цепи стока включен параллельный колебательный контур, образованный индуктивностью $L1$ и емкостью $C2$. Конденсатор C_6 является блокировочным и шунтирует на высокой частоте источник напряжения E_1 . В резонансном усилителе на полевом транзисторе на средних частотах нагрузкой усилительного каскада является параллельное соединение комплексного сопротивления параллельного контура и выходного сопротивления полевого транзистора:

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_K R_{ВЫХ}}{\underline{Z}_K + R_{ВЫХ}}.$$

По схеме замещения полевого транзистора вычислим выходное напряжение на контуре:

$$u_{ВЫХ}(f) = \frac{\frac{-S u_{ВХ} R_{рез} R_{ВЫХ}}{R_{рез} + R_{ВЫХ}}}{\sqrt{1 + Q_{ЭКВ}^2 \left(\frac{f}{f_{рез}} - \frac{f_{рез}}{f} \right)^2}},$$

где $R_{рез} = \rho^2 / R_K$ – резонансное сопротивление контура; $f_{рез} = 1 / (2\pi \sqrt{LC})$ – резонансная частота контура; $\rho = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление контура; R_K – сопротивление потерь в контуре ($R_K \approx 10$ Ом); $Q = \rho / R_K$; $Q_{ЭКВ} = Q / (1 + R_{рез} / R_{ВЫХ})$ – эквивалентная добротность контура с учетом потерь в катушках и внутреннего сопротивления источника сигнала $R_{ВЫХ}$.

Практическая часть

Задание 1. Исследование передаточной характеристики полевого транзистора с общим истоком

1. Выбрать необходимый полевой транзистор (2N4091). Открыть свойства транзистора и записать в отчет значение порогового напряжения
2. Собрать схему исследования полевого транзистора (рисунок 5.8).

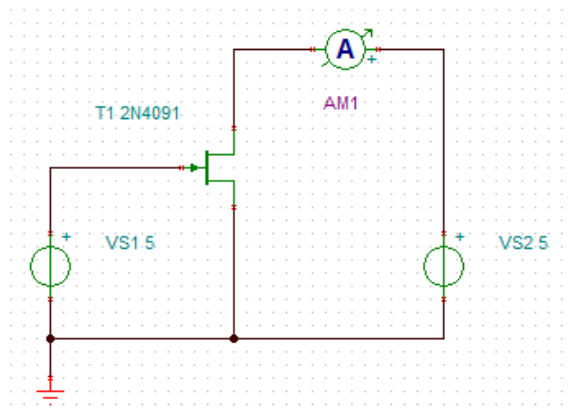


Рисунок 5.8 – Схема исследования полевого транзистора

В этой схеме переменным параметром сделать напряжение на стоке ($VS2$). Задать необходимые значения: *Начальное значение* = 5 В, *Конечное значение* = 15 В, *Количество случаев* = 3. Выбрать Провести исследование полевого транзистора *Анализ – Анализ постоянного тока – Анализ переходных характеристик постоянного тока*. Установите параметры источника входного напряжения ($VS1$). Необходимые значения параметров *Начальное значение* и *Конечное значение* выбрать с учетом типа транзистора и передаточных характеристик (рисунок 5.4). Начальное значение входного напряжения выбирается большим по абсолютному значению чем пороговое значение транзистора.

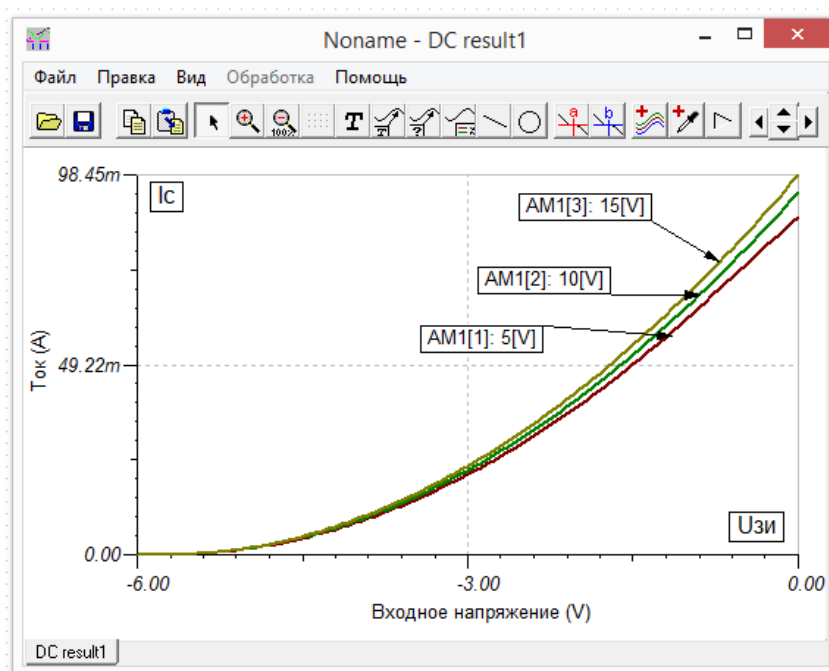


Рисунок 5.9 – Передаточная характеристика полевого транзистора

Задание 2. Исследование выходных характеристик полевого транзистора в схеме с общим истоком

3. В схеме (рисунок 5.8) переменным параметром выбрать напряжение затвор-исток (V_{S1}). Установить *Начальное значение* и *Конечное значение* в соответствии с типом транзистора. *Количество случаев* = 6. Провести исследование полевого транзистора *Анализ – Анализ постоянного тока – Анализ переходных характеристик постоянного тока*. Установить при этом следующие значения для V_{S2} – *Начальное значение* = 0 В, *Конечное значение* выбрать по типу транзистора. Семейство выходных характеристик (рисунок 5.10) в программе легко получить для широкой номенклатуры транзисторов, имеющейся в каталоге программы.

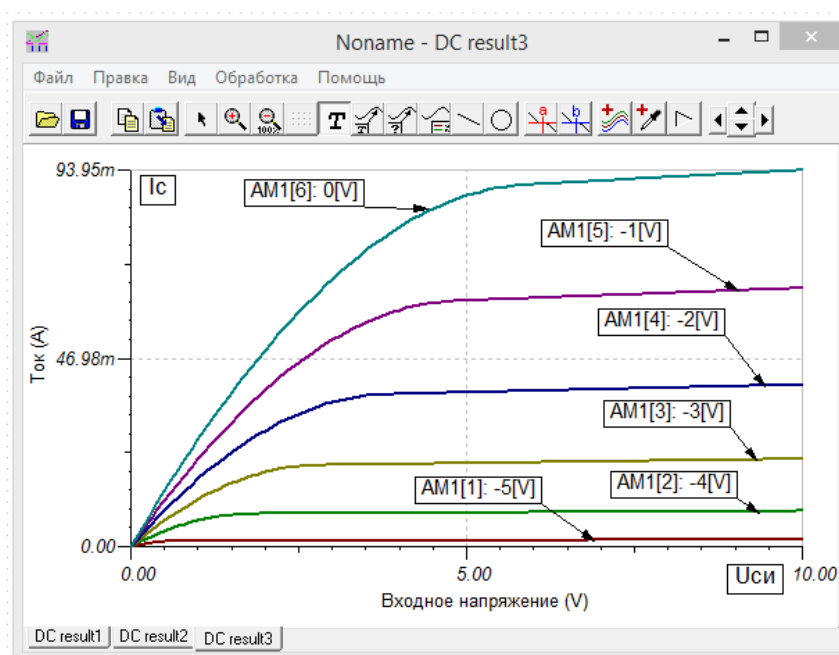


Рисунок 5.10 – Выходная характеристика полевого транзистора

Задание 3. Исследование работы резистивного транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала.

4. Исследовать резистивный усилитель. Для этого собрать схему (рисунок 5.11) замкнуть ключ $SW1$ и разомкнуть ключ $SW2$. Амплитуду источника гармонического сигнала (V_{G1}) установить 200 мВ, частоту 0,2 кГц, форма сигнала – синусоидальный.

5. Проведем оптимизацию напряжения на затворе V_{S1} , при котором напряжение на стоке составит 5 В. Для этого используя мультиметр и контролируя

им напряжение на вольтметре $VM1$ провести изменение напряжения на затворе пока напряжение на стоке не достигнет нужного значения.

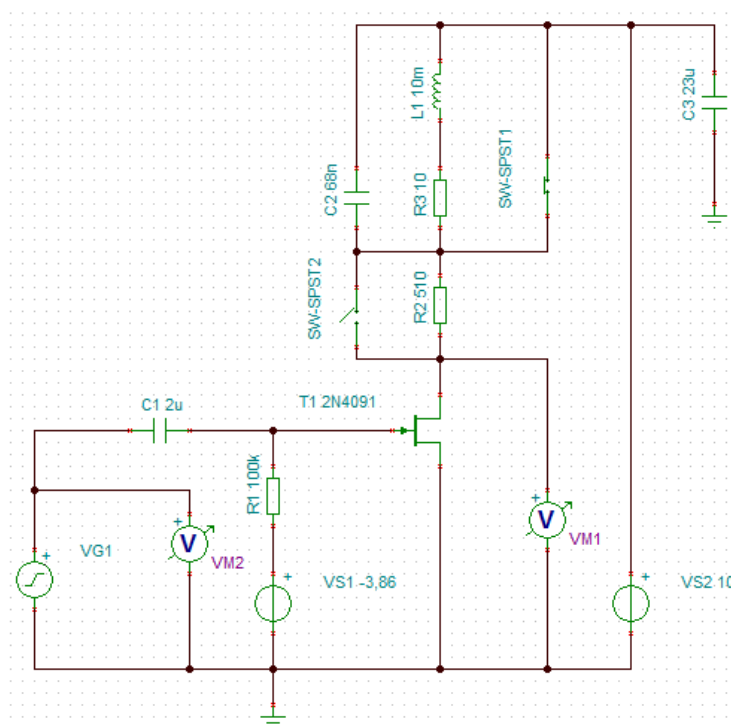


Рисунок 5.11 – Схема усилителя на полевом транзисторе

6. Исследуем работу усилителя используя осциллограф проконтролируем изменение выходного сигнала от входного сигнала. По графикам (рисунок 5.12) видно, что коэффициент усиления составит $K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 5$ при этом выходной сигнал инвертирован относительно входного.

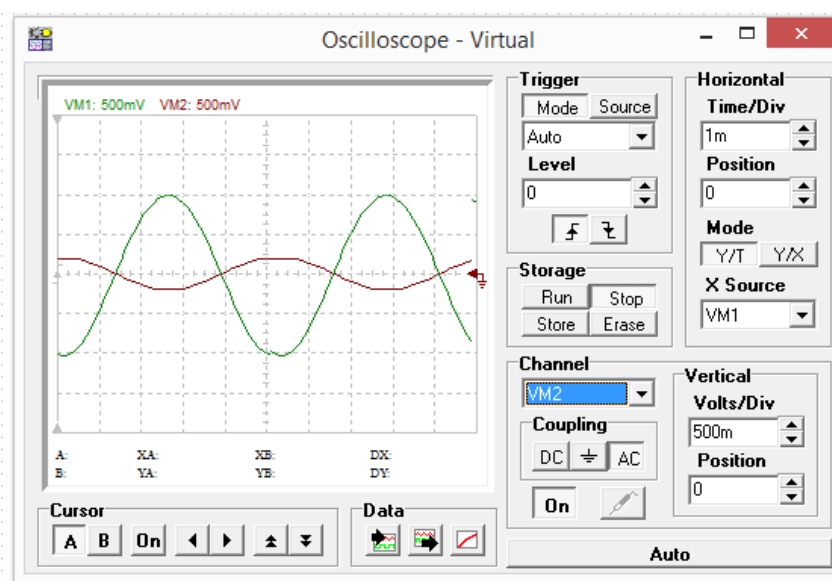


Рисунок 5.12 – Осциллограммы входного и выходного сигналов

Задание 4. Исследование работы резонансного транзисторного усилителя с общим истоком в режиме малого сигнала

8. Замкнем ключ SW2 и разомкнем ключ SW1. Установим амплитуду генератора 50мВ и частоту 1кГц.

9. Проведем анализ АЧХ: *Анализ – Анализ переменного тока – Анализ переходных характеристик* (рисунок 5.13). Установить пределы изменения частоты от 1 до 10 кГц и логарифмический масштаб.

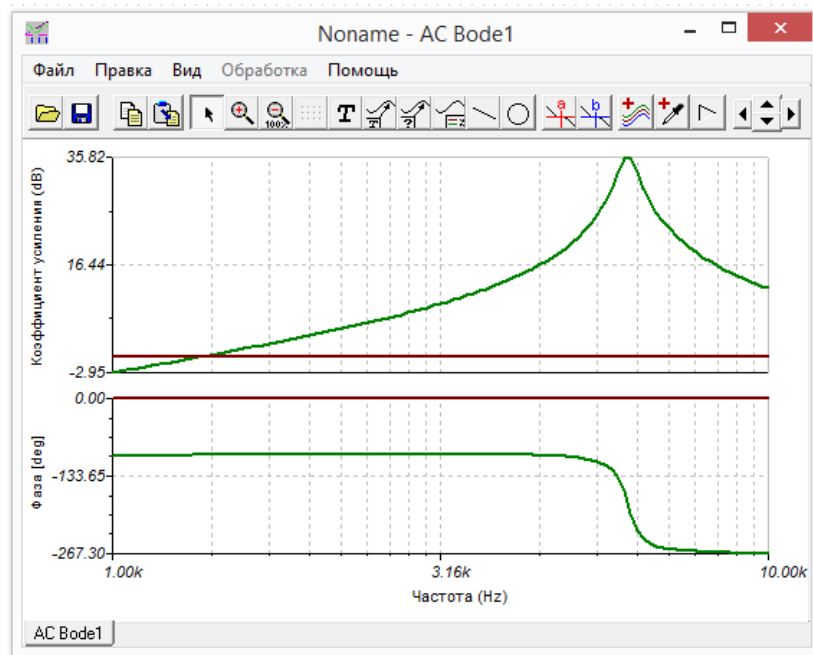


Рисунок 5.13 – АЧХ транзисторного резонансного усилителя с ОИ

10. Более точно определим резонансную частоту. Для этого пределы установим от 5 до 7 кГц и выберем линейную шкалу. По графику АЧХ (рисунок 5.14) видно, что резонанс наступает на частоте 6,1 кГц. Линейное усиление составляет на резонансе примерно 37. Сдвиг фаз выходного сигнала относительно входного сигнала равен 180° .

11. Установим на генераторе частоту 6,1 кГц. Проведем анализ постоянных напряжений и токов в схеме (рисунок 5.15). Как видно, при смещении на затворе -3,86 В в режиме резонансного усилителя за счет малого сопротивления потерь $R3 = 10$ Ом напряжение на истоке увеличивается до 9,9 В.

Установим амплитуду генератора 200 мВ. Исследуем выходной сигнал с помощью осциллографа. На осциллографе необходимо установить следующие параметры: развертка 50 мкс/дел, усиление при измерении входного сигнала

200 мВ, усиление выходного канала 5 В, выбрать вход *Coupling* – *AC*. Каналы переключаются в блоке *Channel* (*VM1* и *VM2*). Осциллограмму надо зафиксировать в установившемся режиме, выждав 5...10 секунд после выполнения команды запуска *Run*.

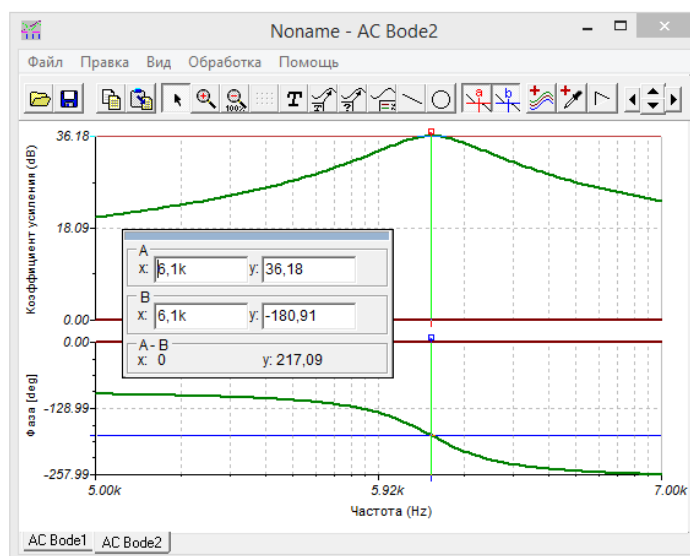


Рисунок 5.14 – Определение резонансной частоты

V_R2[5.6]	0V
V_R3[6.7]	-103.14mV
V_SW-SPST1[6.3]	-103.14mV
V_SW-SPST2[5.6]	0V
V_VG1[4.0]	0V
V_VM1[5.0]	9.9V
V_VM2[4.0]	0V
V_VS1[2.0]	-3.86V
V_VS2[3.0]	10V
VM1	9.9V
VM2	0V
VP_1	-3.86V
VP_2	-3.86V
VP_3	10V
VP_4	0V
VP_5	9.9V
VP_6	9.9V
VP_7	10V

Показать

☒ Узловые напряжения ☒ Токи

☒ Другие напряжения ☒ Выводы

Рисунок 5.15 – Таблица постоянных напряжений и токов в схеме

По осциллограмме амплитуда напряжения на контуре 9 В (рисунок 5.16).

Если на панели *Data* осциллографа нажать *Export Curve*, получим результаты в графической форме (рисунок 5.17).

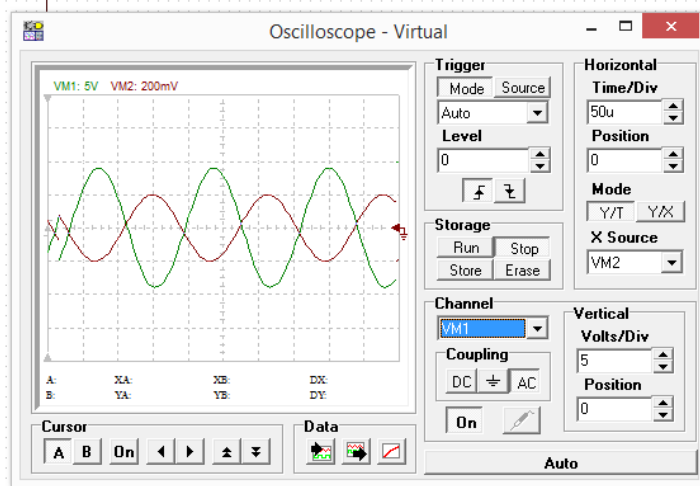


Рисунок 5.16 – Осциллограммы в резонансном режиме (входной сигнал $VM2$, выходной сигнал $VM1$)

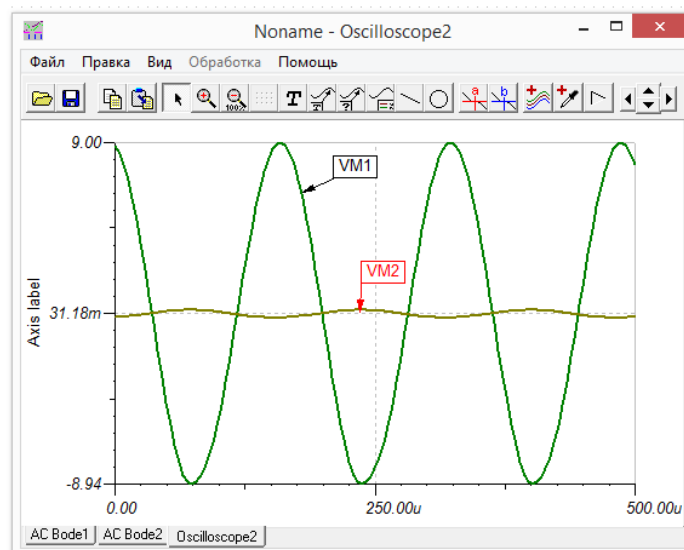


Рисунок 5.17 – Графики из осциллографа после нажатия *Export Curve*

12. Расчет амплитуды напряжения на контуре в резонансном режиме:

$U_2 = U_{\text{ген}} R_{\text{рез}} S = U_{\text{ген}} LS/CR$, где S – крутизна ВАХ полевого транзистора. Для значений $L = 10^{-2}$ Гн, $C = 68$ нФ, $R = 10$ Ом, $S = 2,66 \cdot 10^{-3}$ А/В получим $U_2 = 7,824$ В. Как видно из графиков, амплитуда выходного сигнала около 9 В. Входной сигнал имеет амплитуду 200 мВ. Таким образом, усиление в резонансном режиме составляет 45.

Задание 5. Исследование искажений выходного сигнала в резистивном усилителе

13. Восстановим схему резистивного усилителя. Установим частоту входного сигнала 20 кГц. Амплитуду будем устанавливать равной 200 мВ. В режиме *Анализ*

– Анализ переходных процессов на интервале 0,5...1 мс получим графики входного и выходного сигнала (рисунок 5.18).

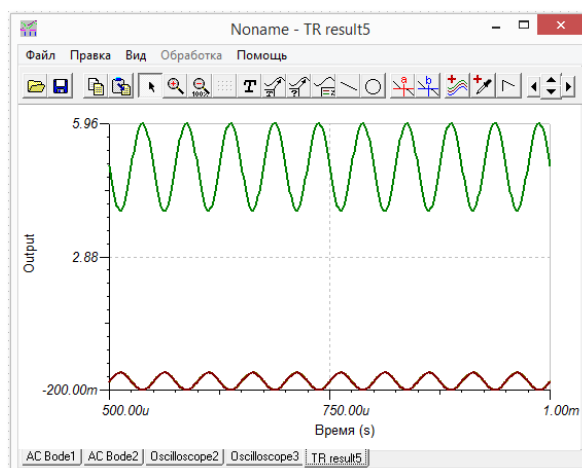


Рисунок 5.18 – Диаграммы выходного сигнала для $U_{\text{вх}} = 200 \text{ мВ}$

Проведем Фурье-анализ выходного сигнала (рисунок 5.19). Для этого выбираем *Анализ – Анализ Фурье – Ряд Фурье* для действующих значений выходного сигнала VM1. Время начала дискретизации должно быть 500 мкс, чтобы переходные процессы успели закончиться. Записать рассчитанные нелинейные искажения (2,086 %) (рисунок 5.19).

14. Повторить исследования по п. 13 для амплитуды выходного сигнала 500 мВ, 1 В и 2 В и определить нелинейные искажения.

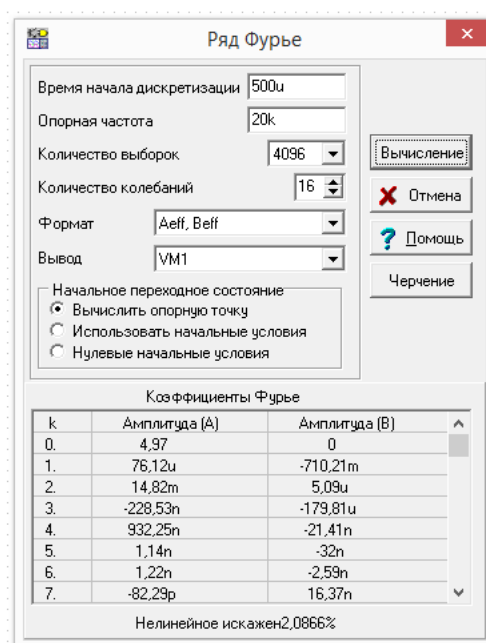


Рисунок 5.19 – Окно Фурье-анализа выходного сигнала

Оформить отчет и сделать выводы.