

## Контрольная работа содержит 3 задачи

Задача 1 составлена в 100 вариантах.

В соответствие со своим индивидуальным шифром студент должен выбрать исходные данные для своей контрольной работы. В задаче 1 обозначены: последняя цифра шифра – **a** и предпоследняя цифра – **b**.

Задачи 2 и 3 составлены в 10 вариантах.

### Задача 1

#### Однофазная мостовая схема выпрямителя с RC сглаживающим пассивным фильтром

Однофазная мостовая схема состоит из вентилей VD1 – VD4 (рис. 1). В одну диагональ моста включена нагрузка, а в другую – переменное напряжение  $e_2$ . В положительном полупериоде открыты вентили VD1 – VD3, в отрицательном – VD2 – VD4. Ток в нагрузке протекает в одном и том же направлении в течение обоих полупериодов, поэтому эта схема относится к двухполупериодным схемам выпрямления.

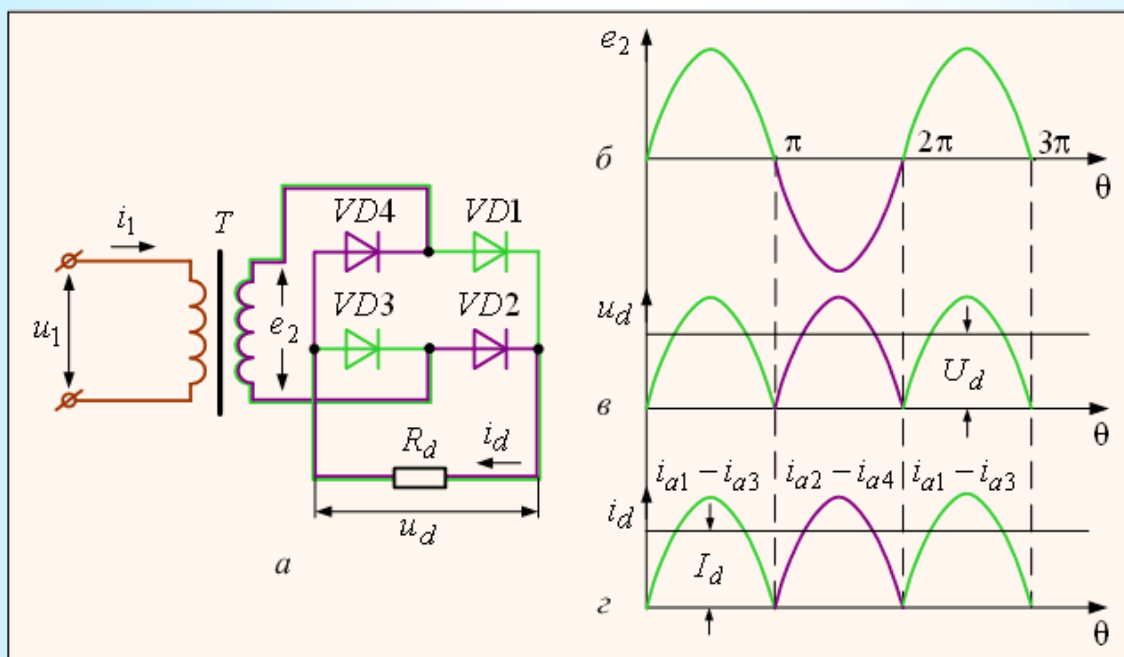


Рис. 1. Однофазный мостовой выпрямитель

Силовой трансформатор в схеме не является принципиально необходимым. Он нужен для создания требуемой величины напряжения  $e_2$  на входе выпрямителя, соответствующего заданной величине выпрямленного напряжения  $E_d$ , а также для обеспечения гальванической развязки между питающей сетью и нагрузкой выпрямителя.

На рис. 1, б, в, г, д представлены временные диаграммы для однофазной мостовой схемы выпрямителя.

Рассчитать основные параметры однофазной мостовой схемы выпрямителя с RC сглаживающим пассивным фильтром (рис. 2).

1. **Заданы:** постоянная составляющая выпрямленного напряжения  $U_0$ , постоянная составляющая тока нагрузки  $I_0$  и коэффициент пульсации  $k_{п.доп}$ .

$U_0 = 1a$  В; **a**-последняя цифра шифра;

$I_0 = 0,1b$  А; **b**-предпоследняя цифра шифра;

$k_{п.доп} = 2 \cdot 10^{-3}$ .

Полагая сопротивление вентиля в открытом состоянии равным  $R_{пр} = 1$  Ом, а сопротивление обмотки трансформатора равным  $R_{тр} = 5$  Ом, вычислить величины емкостей  $C_1$  и  $C_2$  и сопротивление сглаживающего фильтра  $R$ , обеспечивающие требуемый коэффициент пульсации  $k_{п.доп}$  на нагрузке. При расчетах частоту сети принять равной  $f = 50$  Гц.

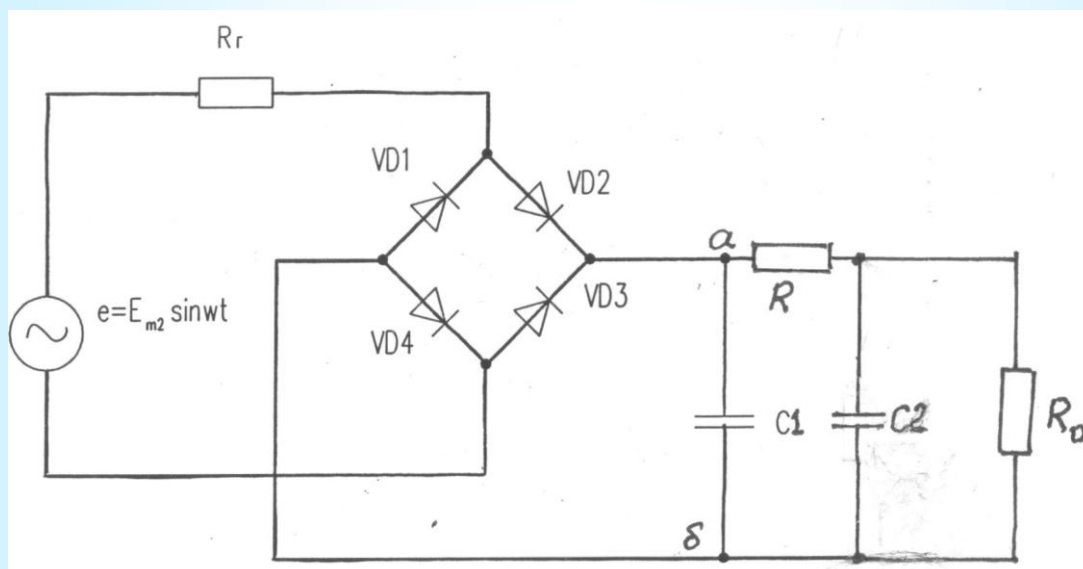


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с RC сглаживающим фильтром

## 2. Методические указания

1. Вычислить сопротивление нагрузки по формуле

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}$$

2. Вычислить максимально допустимую величину сопротивления сглаживающего фильтра  $R$ . Максимальная величина падения напряжения на сглаживающем фильтре не должна превышать половины постоянной составляющей напряжения на нагрузке. Исходя из этих соображений, примем:

$$R = 0,5 \cdot R_0$$

3. Вычислить вспомогательную величину  $A$  по графику (рис. 3) зависимости  $A$  от  $R_B/R_0$ , где:

$$R_{\Sigma} = R_{mp} + R_{np}$$

$$p = 2;$$

Тогда:

$$\frac{R_{\Sigma}}{R_0} = \dots$$

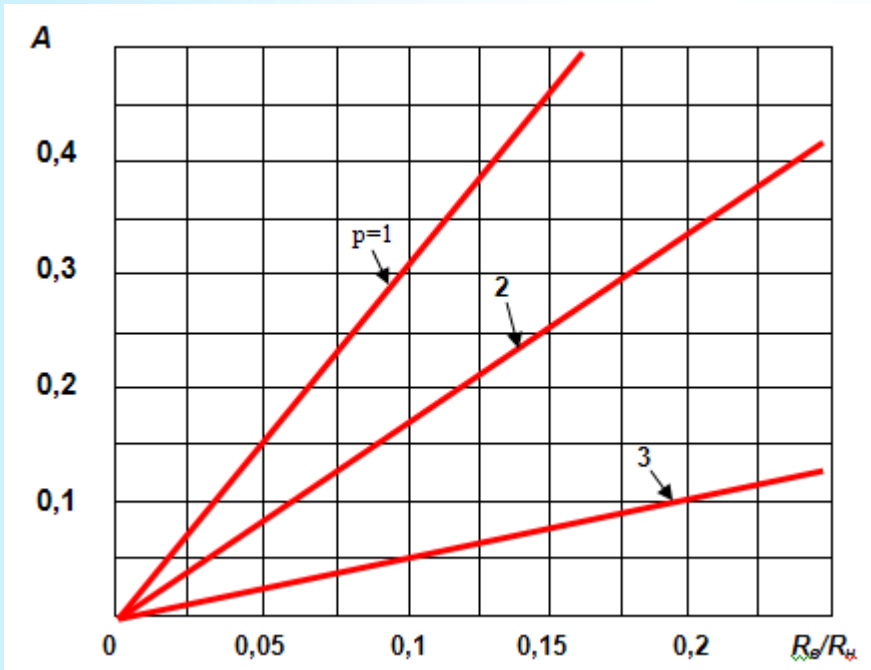


Рис. 3

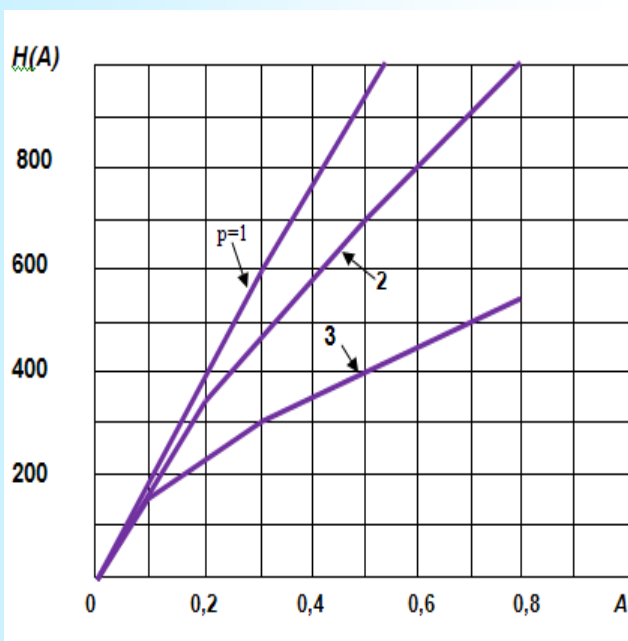
По графику рис. 3 получить значение  $A$ :

$$A = \dots$$

4. Вычислить коэффициент пульсации напряжения на нагрузке по формуле:

$$k_n^* = \frac{H(A)}{R_0 C_1}.$$

где  $H(A)$  – коэффициент, определяемый по графику  $H = f(A)$  (рис. 4).



Емкость  $C_1$  в приведенной выше формуле выражается в микрофарадах, а сопротивление  $R_n$  в Омах.

При вычислении величину емкости  $C_1$  следует задавать в пределах от 1000 до 5000 мкФ (принимая  $C_1 = 1000$  мкФ).

Рис. 4

Убедиться, что  $k_n^* \leq k_{n \text{ доп.}}$

Формула для коэффициента пульсации напряжения на нагрузке позволяет оценить максимально достижимый коэффициент пульсации выпрямителя с емкостно-активной нагрузкой, поскольку  $C_1$  при  $U_0 \leq 50$  В и при допустимых мас-

согабаритных характеристиках её обычно не должна превышать 5000 мкФ. Рекомендуется в расчетах принимать емкости  $C_1$  в пределах  $(1-2) \cdot 10^3$  мкФ.

5. Вычислить  $k_{сг}$  – коэффициент сглаживания RC фильтра по формуле:

$$k_{сг} = \frac{k_n^*}{k_{n\text{ доп}}}$$

6. Вычислить емкость  $C_2$ , используя формулу:

$$k_{сг} = 2\pi f \cdot p \cdot R \cdot C_2 \frac{R_0}{R + R_0}$$

Здесь  $R$  и  $R_n$  в Омах, а  $C_2$  в фарадах.

Формула для расчёта  $C_2$  имеет вид

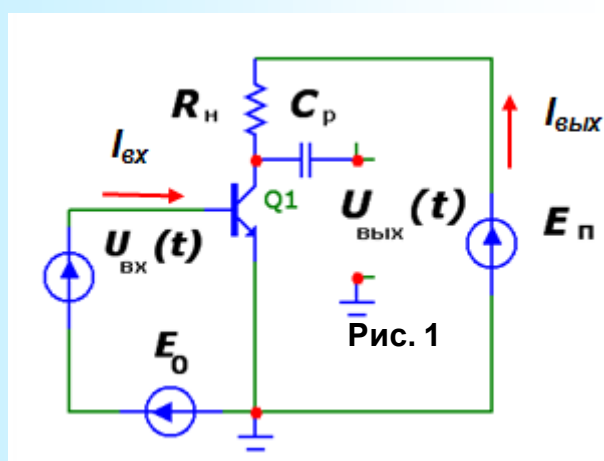
$$C_2 = \frac{k_{сг}}{2\pi f \cdot p \cdot R \cdot \frac{R_0}{R + R_0}}.$$

7. Принять в качестве номинальной величины емкости  $C_2$  ближайшее значение (большее) из стандартного ряда.

## Задача 2

### Расчёт статических ВАХ транзистора в программе «MicroCap 9 DEMO»

В схеме типового построения аналогового электронного устройства присутствуют два замкнутых контура: входной (управления) и выходной (нагрузки).



На рис. 1 показаны протекающие в выходном контуре выходной ток  $I_{вых}$  а во входном - входной  $I_{вх}$ .

Наибольшее представление о процессах в усилительном каскаде дает анализ его работы, проведенный с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ).

По входной ВАХ транзистора определяют напряжение в цепи базы на уровне, соответствующем требуемому току базы, при котором получают исходную рабочую точку (ИРТ) малосигнального (линейного) режима.

Выходная ВАХ представляет зависимость выходного тока  $I_{вых}$  от выходного напряжения  $U_{вых}$ . На рис. 2 приведены выходные ВАХ транзистора, в которых ток базы  $I_b$  выступает как параметр.

Линией насыщения 1 и линией отсечки 2 отмечены границы управляемой области характеристик.

При значениях тока коллектора, лежащих левее линии 1 и ниже линии 2 не только нарушается линейная зависимость выходных сигнальных приращений от входных, но также вообще прекращается управляющее воздействие входного сигнала на выходной ток.

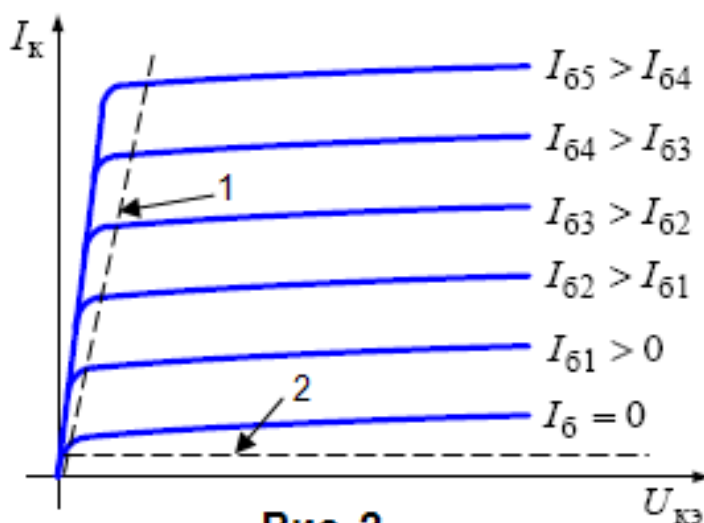


Рис. 2

## Методические указания

Расчёт статических ВАХ транзистора в среде «MicroCap 9 DEMO».

1. Для расчёта входной статической ВАХ открыть файл «олс VxVAX Транз» (рис. 3).

В схеме использовать транзистор, тип которого выбрать из табл. 1 в соответствии с последней цифрой шифра.

Таблица 1

| Последняя цифра шифра | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Тип транзистора       | 2N2218 | 2N2222 | 2N2368 | 2N2369 | 2N3252 |
| Последняя цифра шифра | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| Тип транзистора       | 2N3439 | 2N3501 | 2N3506 | 2N3725 | 2N3903 |

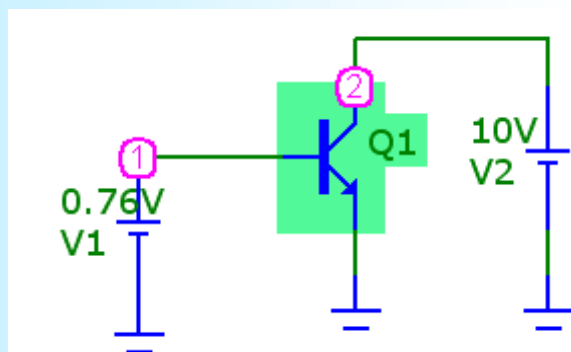


Рис. 3. Схема для измерения входной статической ВАХ транзистора



Результат расчёта  
входной ВАХ приведен на рис. 6

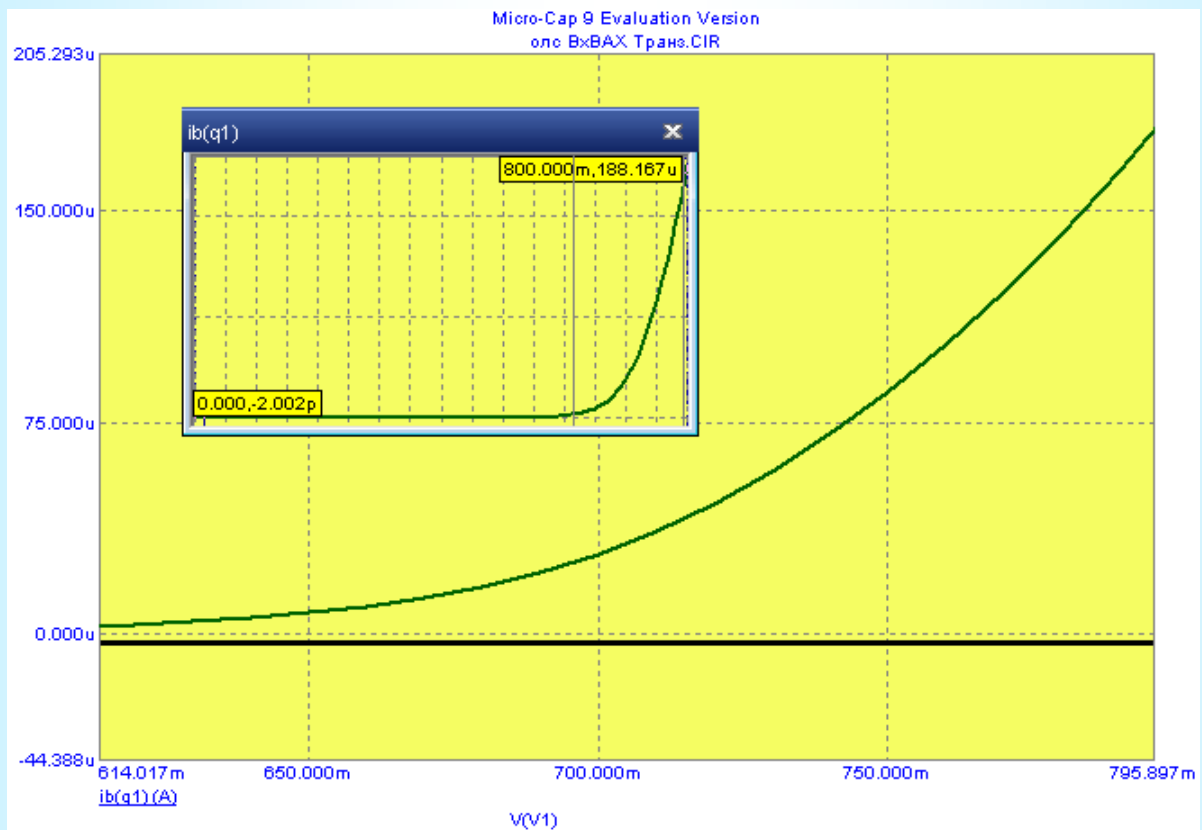


Рис. 6. Входная ВАХ транзистора 2N3020

Если задать в качестве зависимой величины определить ток коллектора  $i_c(q1)$ , то будет построен график передаточной характеристики транзистора - зависимости тока коллектора от напряжения база-эмиттер (рис. 7).

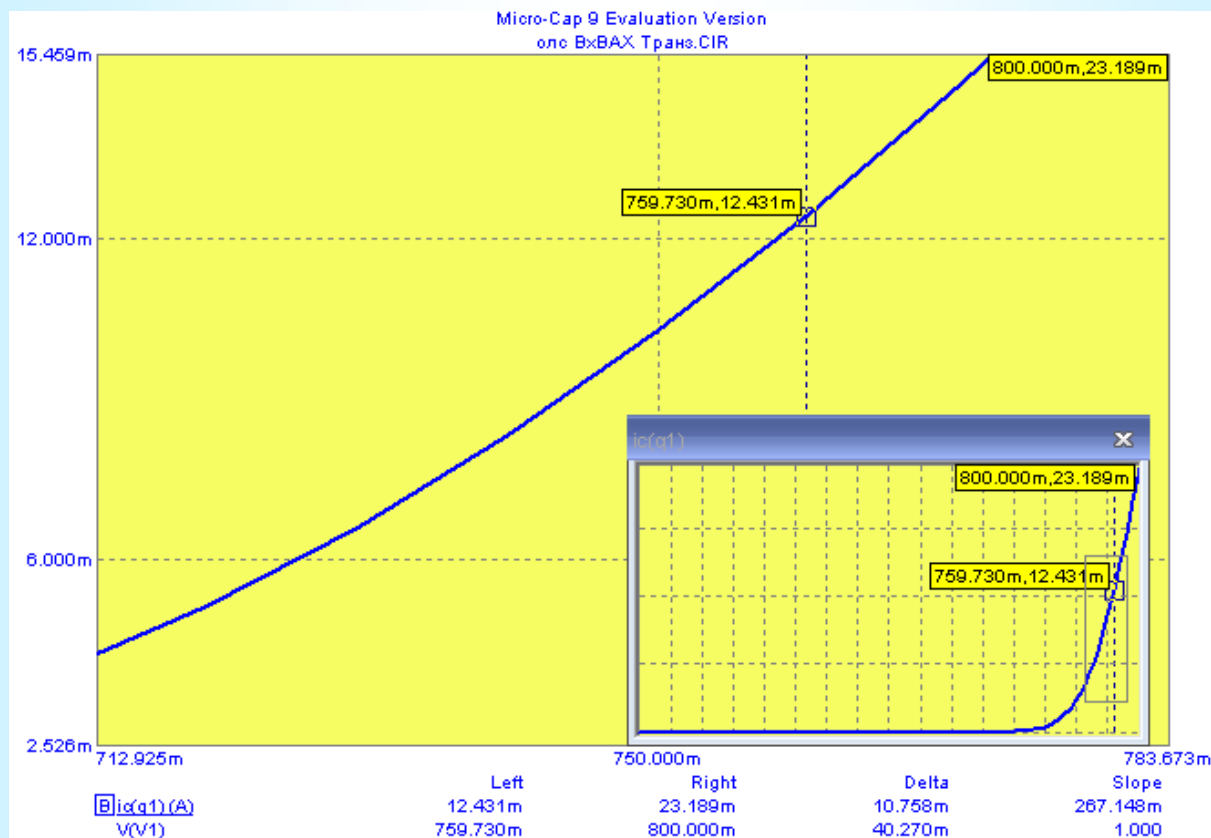


Рис. 7. Передаточная характеристика транзистора 2N3020

2. Для расчёта выходной статической ВАХ открыть файл «олс ВыхВХ Транз» (рис. 8).

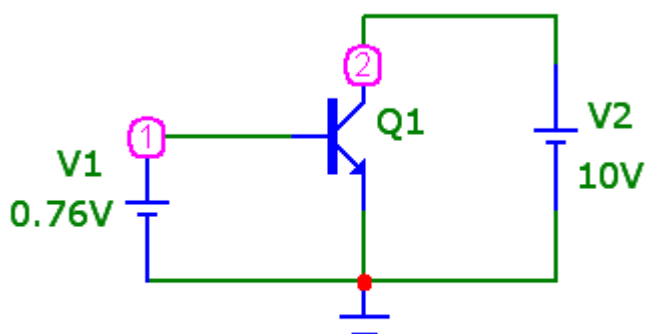


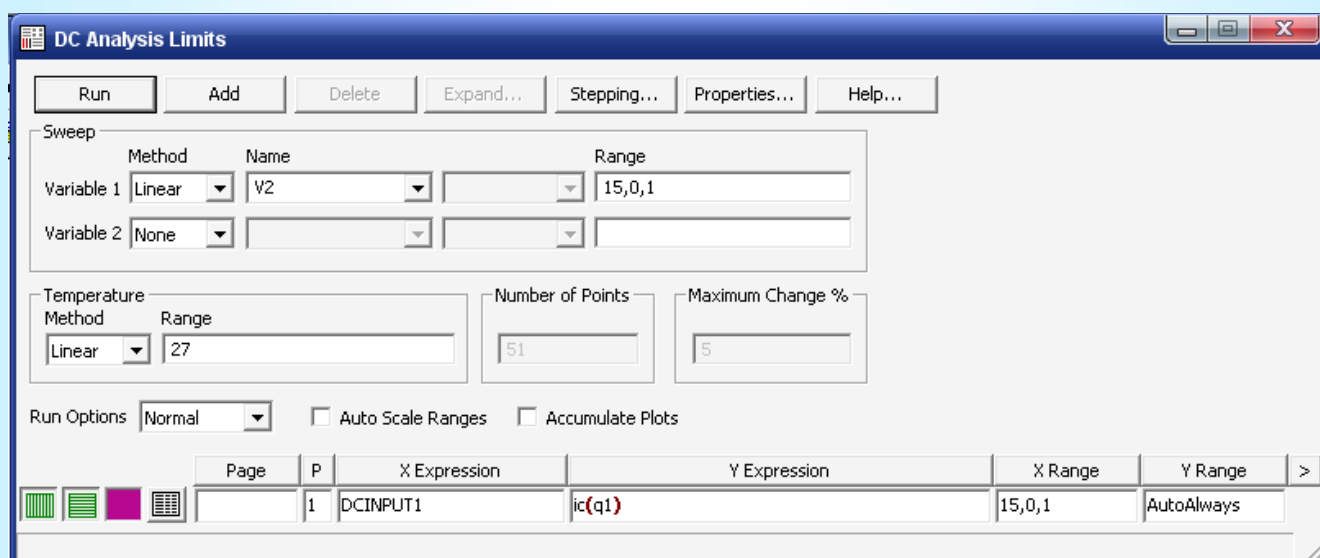
Рис. 8. Схема для расчёта выходной статической ВАХ

Для построения выходной ВАХ следует зафиксировать напряжение источника в цепи базы на уровне, соответствующем требуемому току коллектора.

Из передаточной характеристики (рис. 7) следует, что для обеспечения тока коллектора 12.5 мА к базе относительно эмиттера нужно

приложить напряжение 0.76 В.

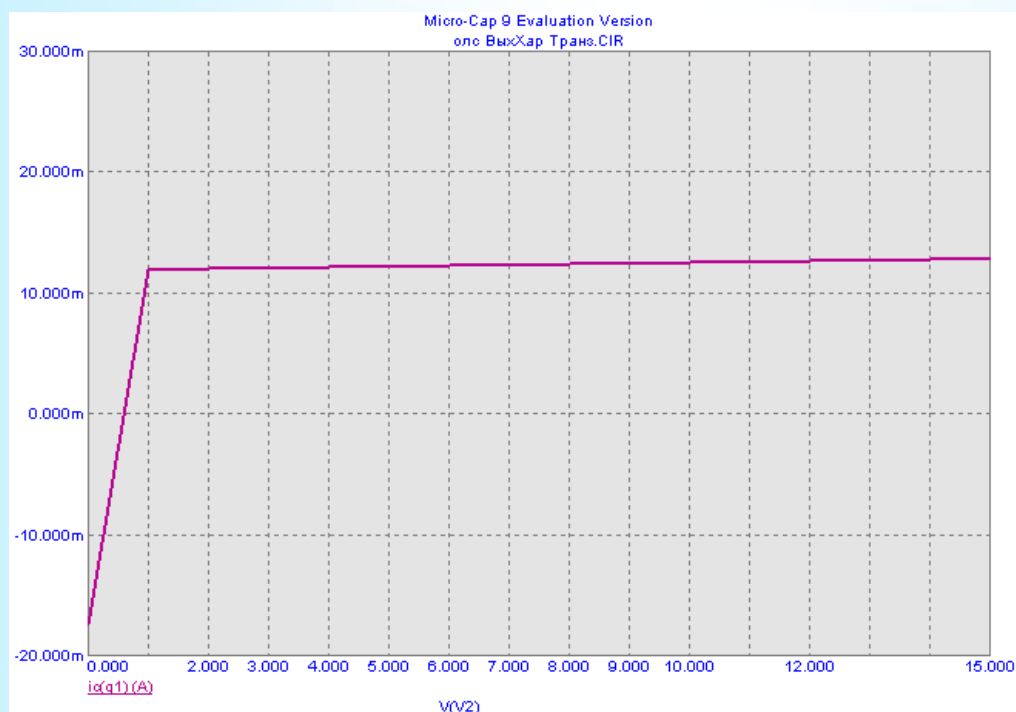
Для получения выходной статической ВАХ транзистора командой «Analysis - DC» получить окно задание параметров расчёта на постоянном токе. В окне (рис. 9) указать имя источника, напряжение, которое следует варьировать, диапазон изменения напряжения, имя зависимой величины и диапазоны величин для отображения на графике.



**Рис. 9. Задание параметров расчёта выходной ВАХ**

В качестве источника с изменяемым в процессе расчёта напряжением следует указать V2 с диапазоном изменения 0, 1,...15 В.

В качестве зависимой величины следует указать ток  $ic(q1)$  коллектора транзистора.



Результат расчёта выходной ВАХ приведен на рис. 10.

**Рис. 10. Выходная ВАХ транзистора 2N3020**

Из графика рис. 10 следует конечный наклон выходной ВАХ в области больших коллекторных напряжений, вызванных эффектом Эрли\*).

\*) В процессе усиления электрического сигнала в транзисторе происходит изменение ширины базового слоя, так как под действием внешних источников  $E_1$  и  $E_2$  толщина  $p$ -  $n$ - переходов изменяется.

А это в условиях малой ширины базового слоя приводит к модуляции. Данное явление называется эффектом Эрли.

### Задача 3

#### Расчёт и моделирование усилителя в малосигнальном режиме

##### Методические указания

1. Расчёт сквозной передаточной характеристики кремневого транзистора в среде «MicroCap 9 DEMO».

Для расчёта характеристики открыть файл «олс  $ic\_f(V_{eb})$ » (рис. 1). В схеме файла использовать транзистор, тип которого выбрать из табл. 1 в соответствии с последней цифрой шифра.

Таблица 1

| Последняя<br>Цифра<br>шифра | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Тип<br>транзистора          | 2N2218 | 2N2222 | 2N2368 | 2N2369 | 2N3252 |
| Последняя<br>Цифра<br>шифра | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
| Тип<br>транзистора          | 2N3439 | 2N3501 | 2N3506 | 2N3725 | 2N3903 |

**Пример расчёта приведён для транзистора 2N3020.**

В усилителе рис. 1 (см. Задание 1) на транзисторе 2N3020 задано положение исходной рабочей точки ( $U_{кз0} = 10$  В;  $I_{к0} = 10$  мА).

А) Вычислить напряжение источника V2 по формуле

$$V2 = U_{кз0} + I_{к0} R1 = 10 + 0.01 \cdot 1000 = 20 \text{ В.}$$

Б) Напряжение источника V2=20 В установить в схеме.

#### Внимание!

Положение исходной рабочей точки для типа транзистора в табл. 1 студенты вычисляют в Задаче 2.

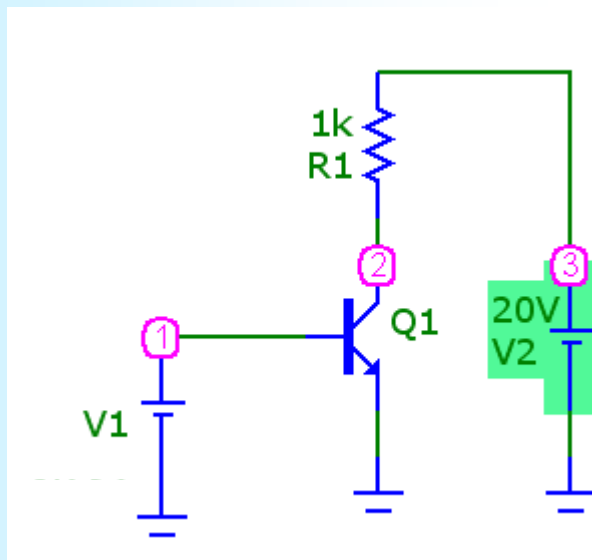


Рис. 1. Схема усилителя

В) Получить сквозную передаточную характеристику кремневого транзистора 2N3020. Для этого командой «Analysis\DC» получить окно задание параметров расчёта на постоянном токе (рис. 2).

В этом окне выбрать диапазон изменения напряжения базового источника V1 от 0,6 до 0,8 В.

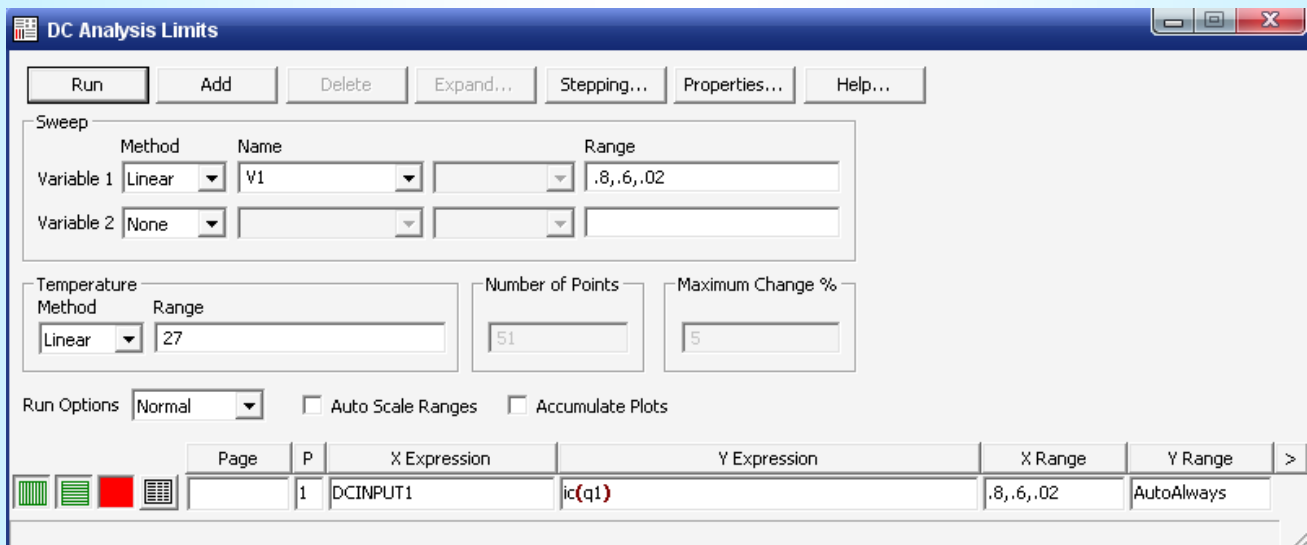


Рис. 2. Задание параметров расчёта на постоянном токе

Г) Выполнить анализ на постоянном токе, получить зависимость тока коллектора  $ic(q1)$  транзистора от напряжения база-эмиттер источника V1 (рис. 3).

Д) По графику рассчитанной передаточной характеристики найти номинальное напряжение база-эмиттер, обеспечивающий требуемый ток коллектора  $I_{к0} = 10 \text{ mA}$ .

На рассчитанном графике рис. 3 выделена точка с координатами  $\sim(U_{\text{бэ ном}} = 0,748 \text{ В}; 10 \text{ мА})$ . Откуда следует номинальное напряжение база-эмиттер 0,748 В, обеспечивающее требуемый ток коллектора  $I_{\text{к0}} = 10 \text{ мА}$ .

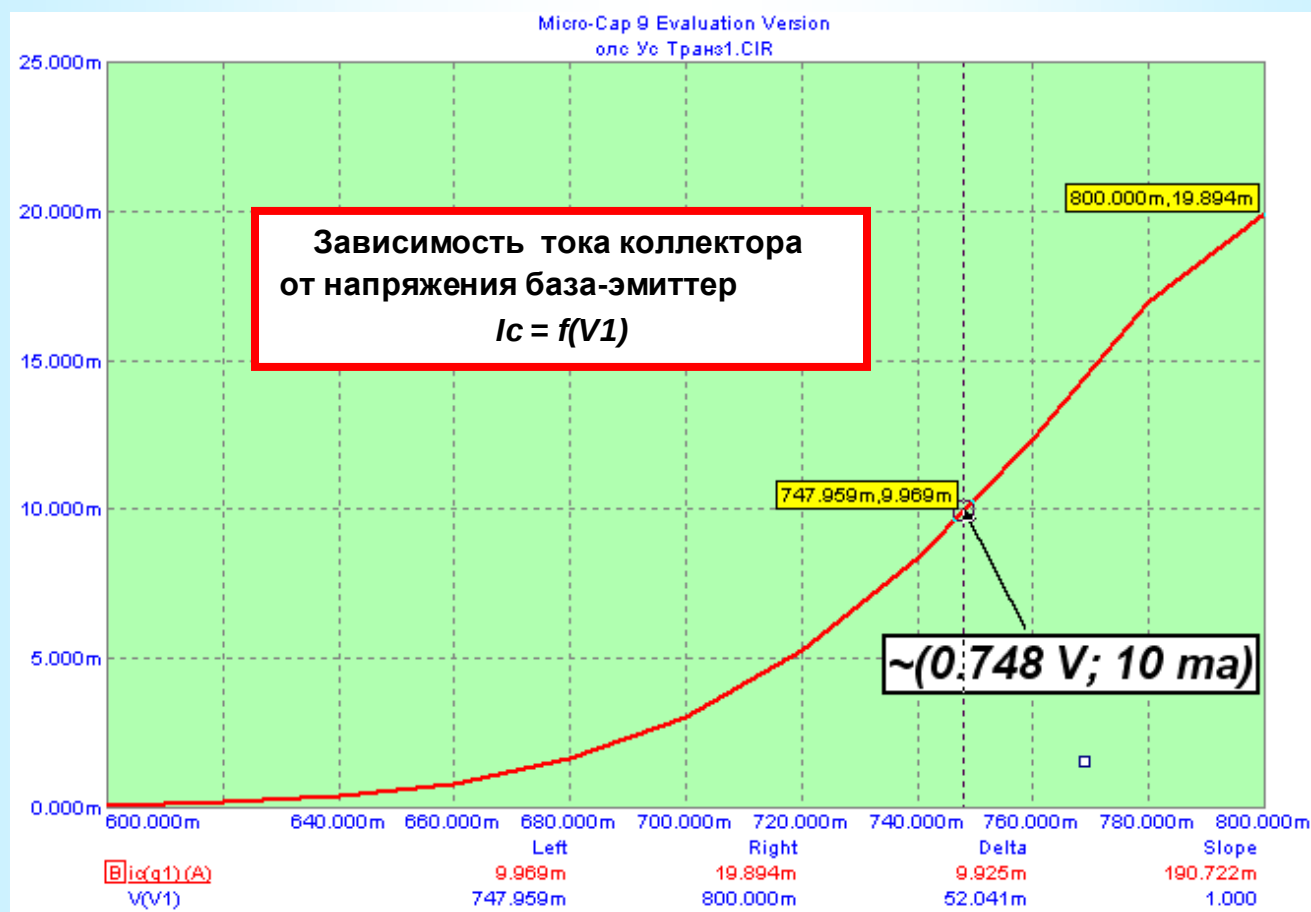


Рис. 3. Сквозная передаточная характеристика транзистора 2N3020

Е) Для расчёта сквозной передаточной характеристики - зависимости напряжения  $v_{\text{с}}(Q1)$  на коллекторе транзистора от напряжения база-эмиттер источника  $V1$  открыть файл «олс  $v_{\text{с}}_f(V_{\text{еб}})$ » Рассчитать по команде «Analysis-DC» указанную характеристику (рис. 4).

Ж) По графику сквозной передаточной характеристики при номинальном напряжении база-эмиттер  $U_{\text{бэ ном}} = 0,748 \text{ В}$  оценить малосигнальный коэффициент усиления. Для этого найти наклон касательной к передаточной характеристики в точке, соответствующей номинальному напряжению база-эмиттер  $U_{\text{бэ ном}} = 0,748 \text{ В}$  при малых приращениях  $\Delta U_{\text{бэ}}$  напряжения база-эмиттер

$$k = \frac{\Delta U_{\text{кэ}}}{\Delta U_{\text{бэ}}} = \frac{9,76 - 10,01}{0,750 - 0,748} = \frac{-0,25}{0,002} = -125.$$

Знак (-) означает инверсию выходного сигнала относительно входного.

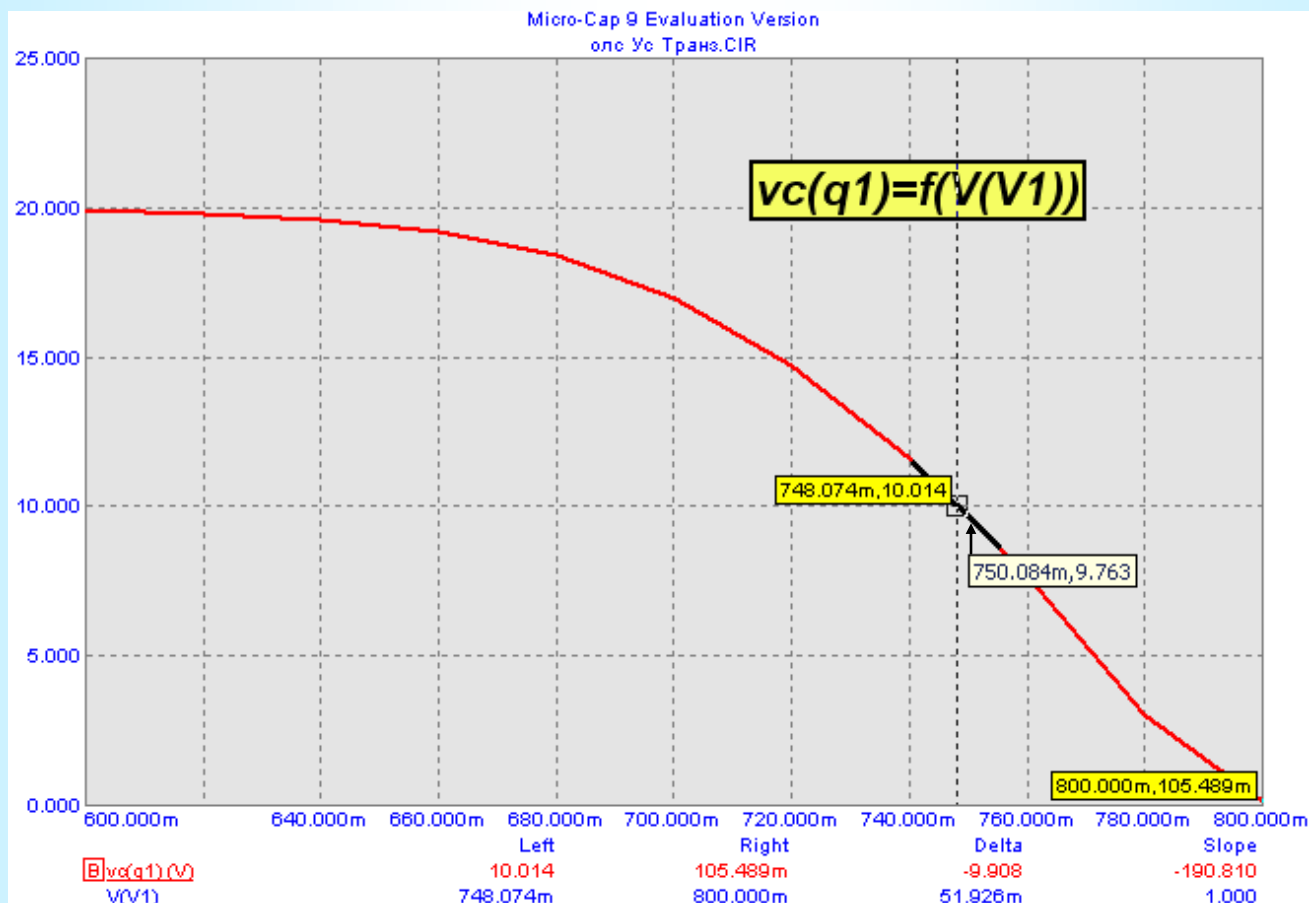


Рис. 4. Зависимость напряжения  $vc(Q1)$  на коллекторе транзистора от напряжения база-эмиттер

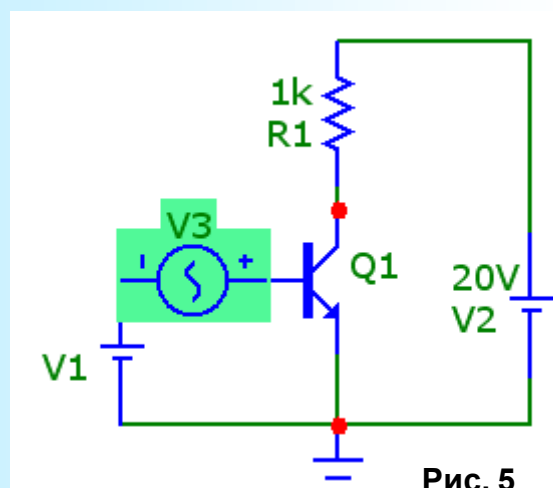


Рис. 5

2. Исследовать возникновение нелинейных искажений выходного сигнала. Для этого во входную цепь транзистора последовательно с источником V1 включить источник синусоидального сигнала (Component\AnalogPrimitives\Waveform Sources\Sine Source) (файл «олс Ус Лин-Режим») (рис. 5).

В окне параметров источника указать его имя (например S1), а также параметры: амплитуду  $A = 0,005$  В и частоту 1кГц (рис. 6).

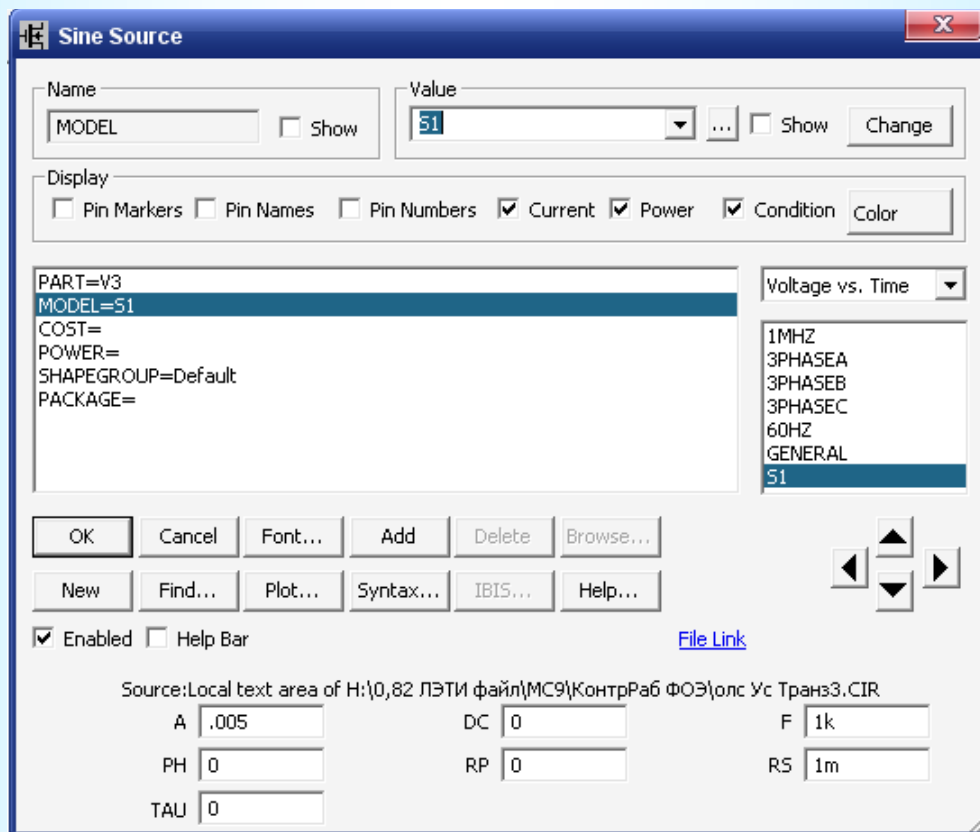


Рис. 6. Параметры источника синусоидального сигнала

А) Наблюдать осциллограммы на базе  $v_b(q1)$  и коллекторе  $v_c(q1)$  транзистора Q1 при указанных в окне рис. 6 параметрах источника синусоидального сигнала (рис. 7). Сделать вывод.

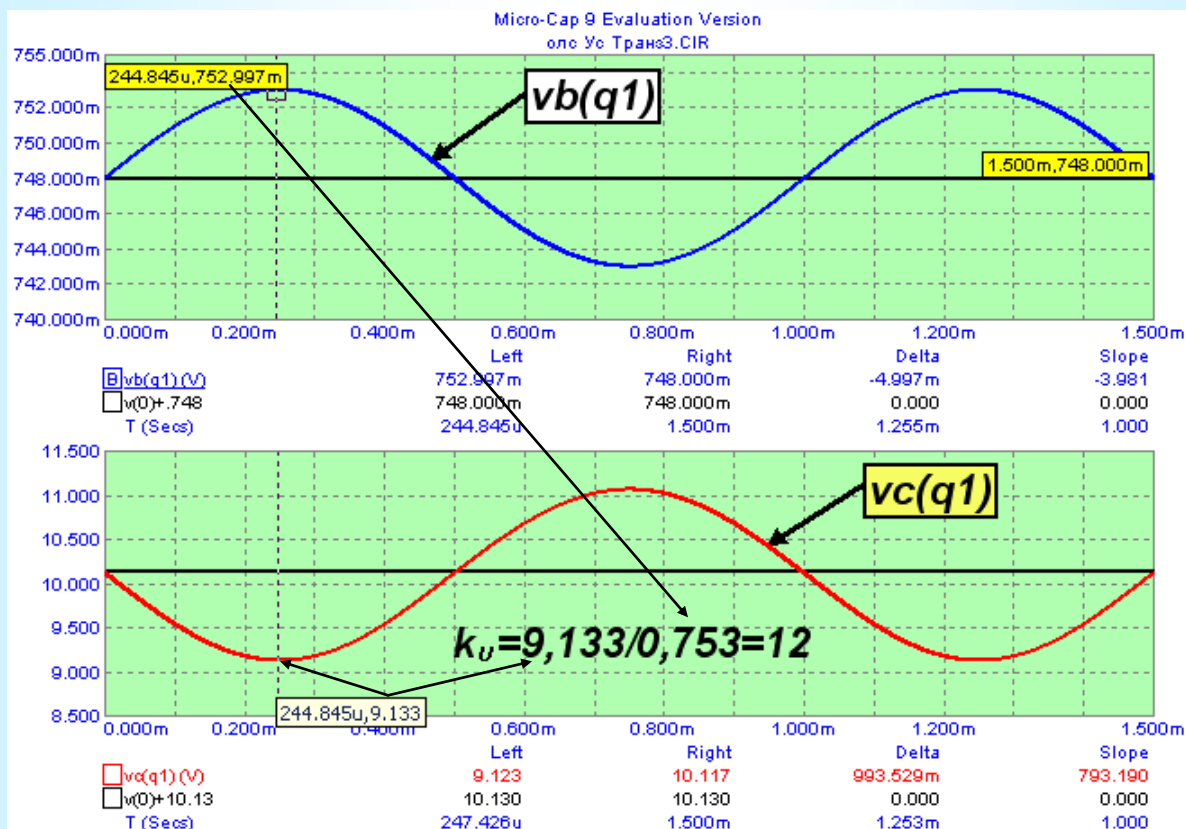


Рис. 7.

На нижней осциллограмме рис. 7 видно неискаженное синусоидальное напряжение на коллекторе  $vc(q1)$  транзистора Q1.

Б) Исследовать возникновение нелинейных искажений выходного сигнала. Для этого в окне параметров источника (рис. 6) увеличить амплитуду его колебаний в 10 раз ( $A=0,05\text{ В}$ ).

Файл в среде «MicroCap 9 DEMO»: «олс Ус НелинИскаж».

В) Установить задания параметров расчётов выходного сигнала  $vc(q1)$  транзистора Q1, его амплитудного спектра ( $HARM(vc(q1))$ ) и коэффициента нелинейных искажений ( $IHD(HARM(vc(q1)))$ ) отдельных составляющих спектра в процентах относительно составляющей на частоте первой гармонике (рис. 8).

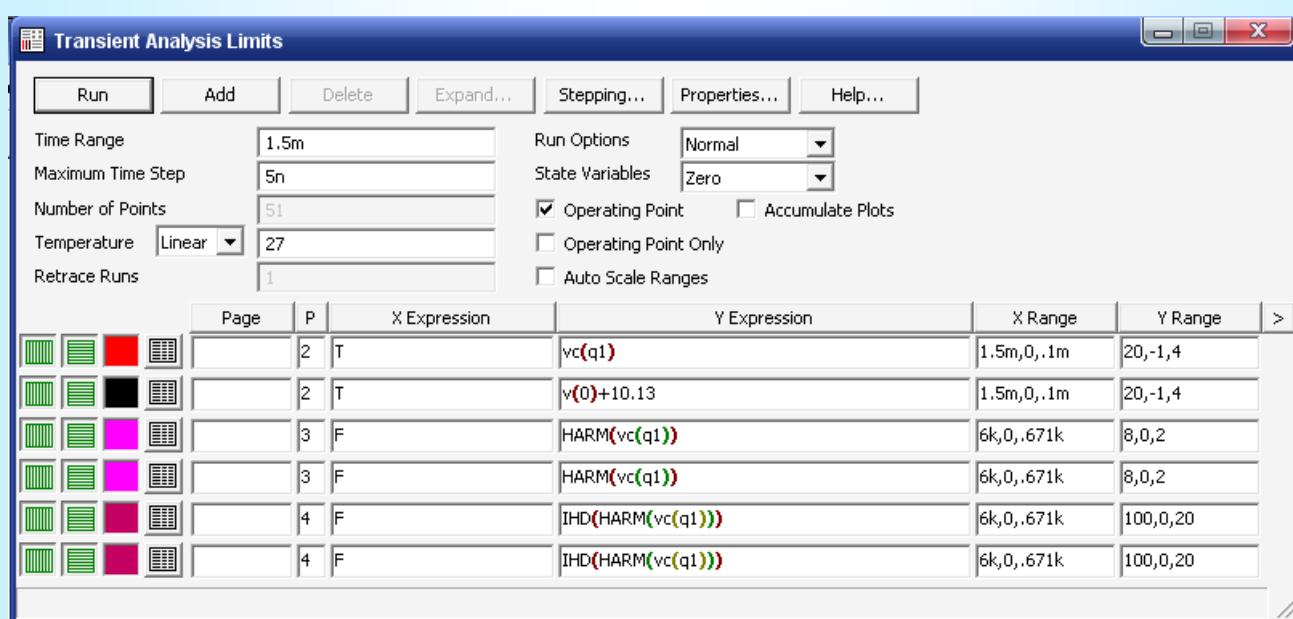


Рис. 8. Установки заданий параметров расчётов выходного сигнала, его амплитудного спектра и коэффициента нелинейных искажений

Г) Произвести по команде «Analysis\Transient\Run» расчёты осциллограммы, амплитудного спектра выходного сигнала  $vc(q1)$  и коэффициента нелинейных искажений отдельных составляющих спектра (рис. 9). Сделать вывод(ы).

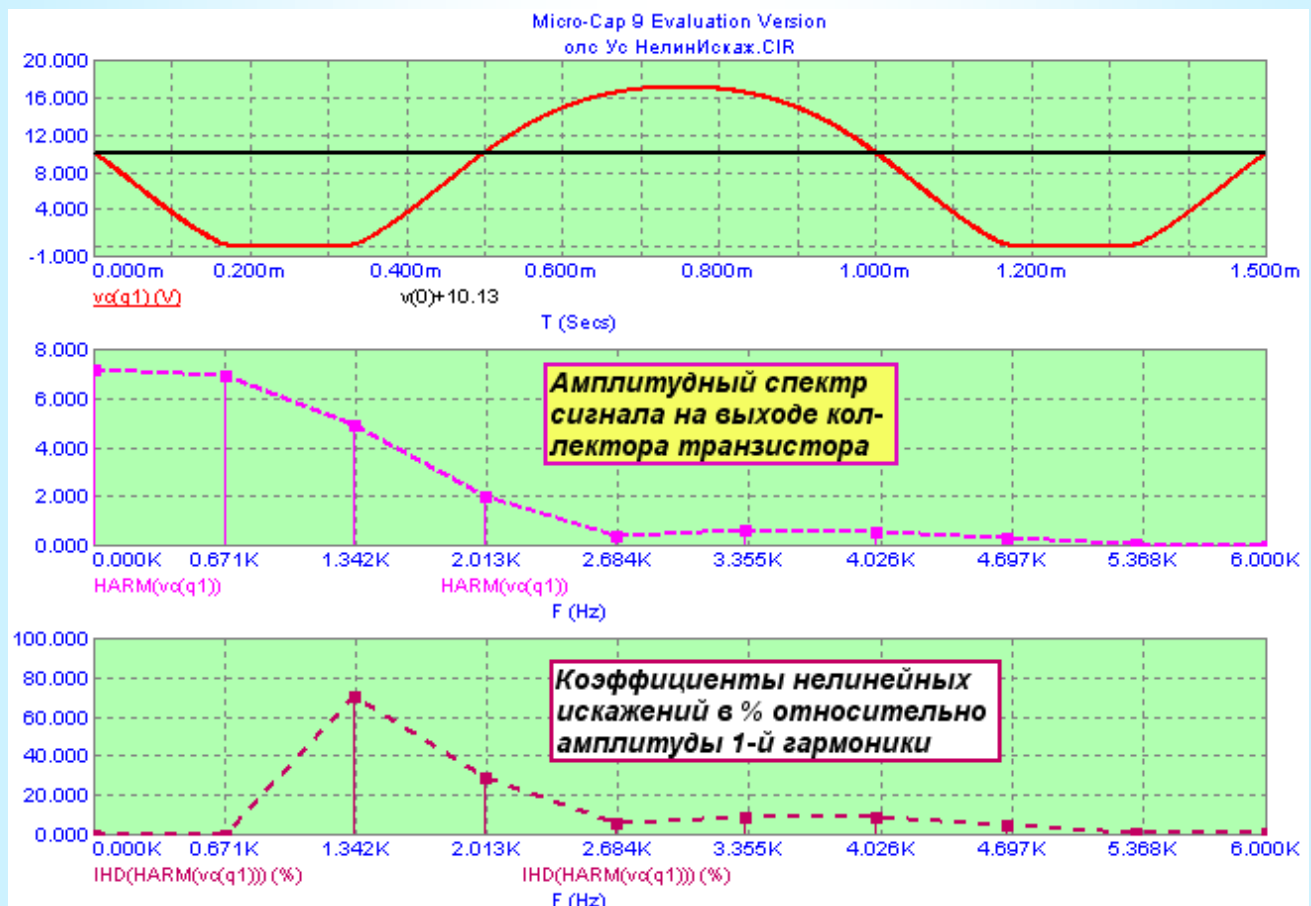
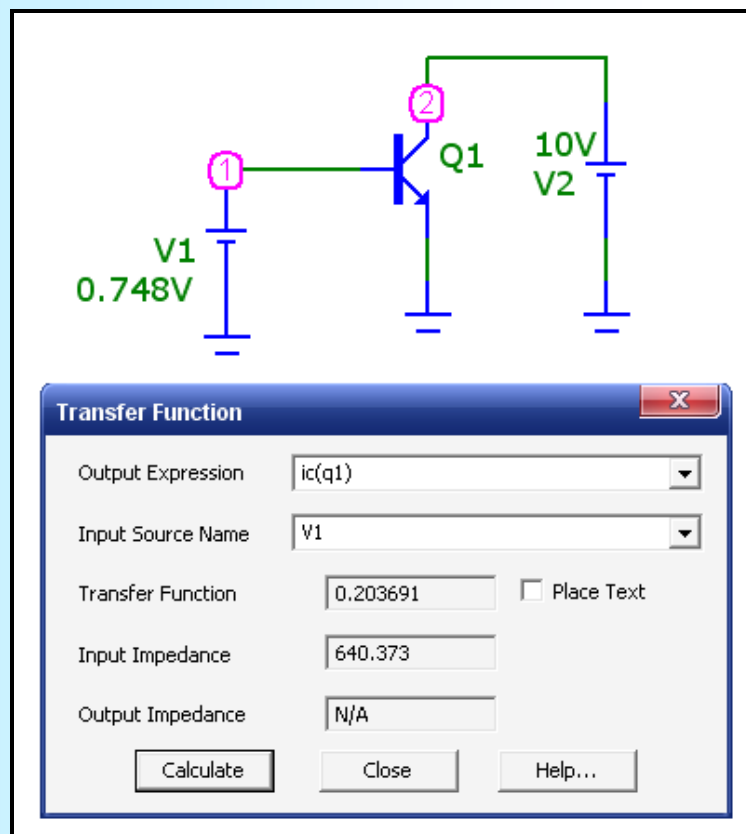


Рис. 9

3. Оценить малосигнальные параметры транзистора  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{21}$ ,  $g_{22}$  для схемы с общим эмиттером (ОЭ) при заданном положении исходной рабочей точки.



Файл в среде «MicroCap 9 DEMO»: «олс  $g$ -парам».

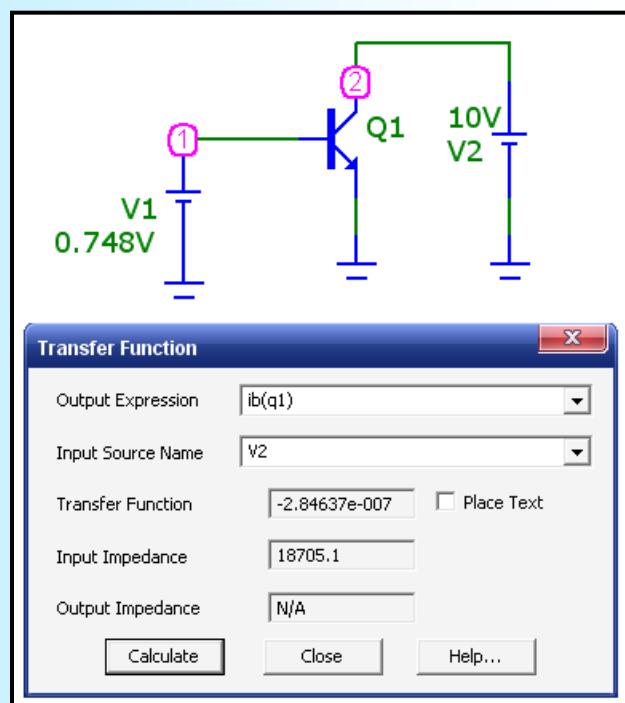
Для этого с помощью источников ЭДС  $V1$  и  $V2$  (рис. 10) установить заданное положение ИРТ (для транзистора 2N3020:  $U_{кэ0} = 10 \text{ В}$ ;  $I_{к0} = 10 \text{ мА}$ ).

Для измерений использовать команду «Analysis\ TransferFunction». При измерении передаточной  $g_{21}$  и входной  $g_{11}$  проводимостей считать входным (испытательным) источником (Input Source Name) источник  $V1$ .

Рис. 10. Схема оценки малосигнальных параметров  $g_{21}$  и  $g_{11}$  транзистора  $Q1$

При этом в качестве выходной величины (*Output Expression*) указать ток коллектора  $i_c(q1)$  транзистора Q1.

В этом случае в поле *Transfer Function* отобразится передаточная проводимость  $g_{21}$ , а в поле *Input Impedance* отобразится входное сопротивление  $1/g_{11}$ .



Для измерения выходной проводимости  $g_{22}$  и проводимости обратной передачи  $g_{12}$  следует входным сигналом (*Input Source Name*) установить сигнал источника V2, в качестве выходной величины (*Output Expression*) указать ток  $i_b(q1)$  базы транзистора (рис. 11). В поле *Input Impedance* отобразится выходное сопротивление  $1/g_{22}$ .

Рис. 11. Схема оценки малосигнальных параметров  $g_{12}$  и  $g_{22}$  транзистора Q1

В табл. 2 проводится сравнение измеренных значений малосигнальных параметров с расчётными:  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{21}$ ,  $g_{22}$ .

Таблица 2

|                                                    |                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Передаточная проводимость измеренная $g_{21}$      | Передаточная проводимость расчётная $g_{21p} = I_{k0}/0,026 = 0,01/0,026$                                                                                 |
| 0,2                                                | 0,38                                                                                                                                                      |
| Входное сопротивление измеренное $1/g_{11}$        | Входное сопротивление расчётное $1/g_{11p} = g_{21p}/\beta$                                                                                               |
| 640 Ом                                             | $g_{11p} = 0,38/\beta$ , где $\beta$ - значение по току для модели данного транзистора принимать равным $BF=199,9$ ;<br>$1/g_{11p} = 199,9/0,38 = 526$ Ом |
| Проводимость обратной передачи измеренная $g_{12}$ | Проводимость обратной передачи расчётная $g_{12p}$                                                                                                        |
| $\approx 0$                                        | $\approx 0$                                                                                                                                               |
| Выходное сопротивление измеренное $1/g_{22}$       | Выходное сопротивление расчётное $1/g_{22p}$                                                                                                              |
| 18705 Ом                                           | $1/\frac{I_{k0}}{ U_{Эп} + U_{кэ} } = \frac{100+10}{0,01} = 11000$ Ом<br>где $U_{Эп}$ – потенциал Эрли в модели транзистора обозначен $VAF = 100$ В       |

Выводы по результатам сравнения измеренных значений малосигнальных параметров с расчётными параметрами.

А. Как следует из табл. 2, измеренная передаточная проводимость  $g_{21}$  в 1,9 меньше расчётной проводимости  $g_{21p}$ .

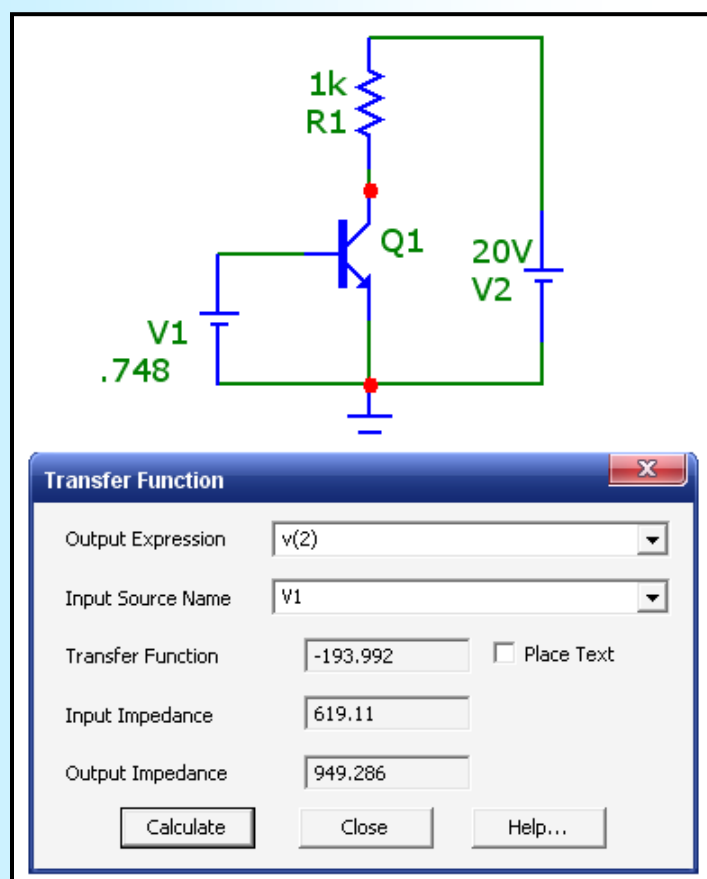
Б. Измеренное входное сопротивление  $1/g_{11}$  в 1,2 больше расчётного  $1/g_{11p}$ .

В. Проводимости обратной передачи, измеренная  $g_{12}$  и расчётная  $g_{12p}$  близки нулю.

Г. Измеренное выходное сопротивление  $1/g_{22}$  в 1,7 больше расчётного  $1/g_{22p}$ .

4. Оценить коэффициент усиления каскада, его входное и выходное сопротивления в схеме с общим эмиттером.

Файл в среде «MicroCap 9 DEMO»: «олс  $g$ -парам».



Перед началом измерений следует обеспечить заданное положение ИРТ, а также коррекцией напряжения источника V1 обеспечить требуемый ток коллектора.

Измерения проводятся по команде *Analysis\Trancfer Function*. При оценке коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений считать входным (испытательным) источником (*Input Source Name*) источник V1 (рис. 12).

Рис. 12

При этом в качестве выходной величины (*Output Expression*) указать напряжение коллекторе транзистора V(2). В этом случае в поле *Trancfer Function* отобразится коэффициент усиления, в поле *Input Impedance* – входное сопротивление, а в поле *Output Impedance* – выходное сопротивление.

В табл. 3 проводится сравнение измеренных значений коэффициента усиления  $k$ , входного  $R_{вх}$  и выходного  $R_{вых}$  сопротивлений с расчётными:  $k_p$ ,  $R_{вхp}$ ,  $R_{выхp}$ .

Таблица 3

| Измеренный коэффициент усиления $k$         | Расчётный коэффициент усиления $k_p = -g_{21p} / (g_{22p} + 1/R_1)$                                                                                                 |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $k = -194$                                  | $k_p = -\frac{0,38}{9,1(e-5)+1(e-3)} = -\frac{0,38}{0,00109} = -348,6$                                                                                              |
| Измеренное входное сопротивление $R_{вх}$   | Расчётное входное сопротивление $R_{вхр} = 1/g_{11p}$                                                                                                               |
| 619 Ом                                      | $1/g_{11p} = 526 \text{ Ом}$                                                                                                                                        |
| Измеренное выходное сопротивление $R_{вых}$ | Расчётное выходное сопротивление $R_{выхр}$                                                                                                                         |
| 949,3 Ом                                    | $1/\frac{I_{к0}}{ U_{эp} + U_{кз} } = \frac{100+10}{0,01} = 11000 \text{ Ом}$<br>где $U_{эp}$ – потенциал Эрли в модели транзистора обозначен $VAF = 100 \text{ В}$ |

Выводы по результатам сравнения измеренных значений параметров с расчётными.

А. Как следует из табл. 3, измеренный коэффициент усиления  $k$  меньше расчётного в 1,8 раз.

Б. Измеренное входное сопротивление  $R_{вх}$  в 1,18 больше расчётного  $1/g_{11p}$ .

В. Различие в измеренном и расчётном выходном сопротивлении значительно. Это объясняется тем, что расчётное выходное сопротивление относится только к транзистору, а измеренное к параллельному соединению  $R_{вых}$  и  $R_1$ .