

Кафедра вычислительных машин, систем и сетей

Курсовая работа  
**ЛИНЕЙНЫЙ ОДНОКАСКАДНЫЙ  
УСИЛИТЕЛЬ СИГНАЛА ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ**

**Выполнил**

Студент Суханова Яна Андреевна

---

Группа А-08-19

---

Дата 10 мая 2021

---

**Принял**

Преподаватель Лагутина Светлана  
Владимировна

---

Оценка

---

Дата

---

Москва, 2021

## *Содержание*

<i>1. Введение.....</i>	<i>3</i>
<i>2. Обоснование и расчет элементов усилительного каскада .....</i>	<i>4</i>
2.1 Параметры транзистора и предельно допустимые параметры .....	4
2.2 Снятие входной и выходных характеристик транзистора.....	4
2.3 Обоснование выбора схемы усилительного каскада .....	6
2.4 Графическое обоснование выбора рабочей точки.....	7
2.5 Расчет рабочей точки.....	7
2.6 Определение малосигнальных параметров транзистора .....	9
2.7 Расчет сопротивлений резисторов .....	10
2.8 Расчет режима каскада для выбранных сопротивлений.....	13
2.9 Проверка правильности расчетов рабочего режима с помощью OrCad. ....	15
2.10 Расчет возможного ухода рабочего тока .....	15
2.11 Графический расчет рабочего режима для выбранных сопротивлений .....	16
2.12 Расчет входного и выходного сопротивлений усилителя .....	18
2.13 Расчет коэффициента усиления напряжения .....	19
2.14 Расчет емкостей конденсаторов .....	19
2.15 Определение верхней граничной полосы пропускания.....	20
<i>3. Перечень элементов (спецификация) .....</i>	<i>21</i>
<i>4. Моделирование работы усилительного каскада на ЭВМ.....</i>	<i>22</i>
4.1 Расчет рабочего режима .....	22
4.2 Амплитудно-частотная характеристика .....	23
4.3 Определение входного сопротивления каскада.....	24
4.4 Расчет нагрузочной характеристики усилителя .....	24
4.5 Расчет амплитудной характеристики усилителя .....	25
4.6 Осциллограмма выходного напряжения и спектр Фурье .....	26
4.7 Фурье-анализ с данными ТЗ .....	27
<i>5. Заключение .....</i>	<i>28</i>
<i>6. Список использованной литературы .....</i>	<i>29</i>
<i>7. Приложение .....</i>	<i>30</i>

## 1. Введение

Целью работы является приобретение умения синтезировать схему усилительного каскада на основе биполярного транзистора, а также проводить её аналитический, графический анализы и схемотехническое моделирование.

Ниже представлено техническое задание на курсовую работу.

Рассчитать элементы схемы однокаскадного усилителя, удовлетворяющего указанным ниже техническим требованиям

1. Рекомендуемый транзистор КТ342Б, тип транзистора - n-p-n;
2. Амплитуда неискаженного выходного сигнала не менее 2В;
3. Коэффициент усиления напряжения  $K_e = \frac{U_{\text{вых}}}{e_{\Gamma}}$  при заданном сопротивлении

нагрузки  $R_n = 0.6$  кОм и внутреннем сопротивлении источника сигнала  $R_{\Gamma} = 1.1$  кОм не менее 0.7;

4. Усилитель при заданной емкости нагрузки  $C_n = 10$  нФ должен обеспечить полосу пропускания от  $f_n = 400$  Гц до  $f_v = 40$  кГц;

5. Температурный диапазон:  $-40^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$ .

Данные технического задания представлены в табл.1.

Табл. 1. Техническое задание

Название транзистора	Параметр	$K_{e0}$	$U_{\text{вых}},$ В	$R_n,$ кОм	$I_n,$ мА	$R_{\Gamma},$ кОм	$f_n,$ Гц	$f_v,$ кГц	$C_n,$ нФ
КТ342Б	Значение	0,7	2,0	0,6	3.3	1,1	400	40	10

Ток нагрузки рассчитан по формуле:

$$I_n = \frac{U_{\text{вых}}}{R_n} = \frac{2.0}{0.6 * 10^{-3}} = 3.333 * 10^{-3} (\text{A})$$

## 2. Обоснование и расчет элементов усилительного каскада

### 2.1 Параметры транзистора и предельно допустимые параметры

В табл. 2 представлены параметры транзистора КТ342Б.

Табл. 2. Параметры транзистора

Тип транзистора	Параметр	$\beta_{\min} \dots \beta_{\max}$	$f_T$	$C_{кп}$	$C_{эп}$
n-p-n	Единицы измерения	-	МГц	пФ	пФ
	Значение	200..500	300	8	8

В табл. 3 представлены предельно допустимые параметры.

Табл. 3. Предельно допустимые параметры

Параметр	$U_{кэ \text{ доп}}$	$I_{к \text{ доп}}$	$P_{\text{доп}}$
Единицы измерения	В	А	Вт
Значение	25	0.05	0.25

### 2.2 Снятие входной и выходных характеристик транзистора

Для заданного типа транзистора с помощью программы схемотехнического проектирования *OrCad 9.1* требуется снять входные и выходные характеристики для схемы усилительного каскада с общим коллектором, чтобы определить положение рабочей точки.

На рис.1 представлена схема для получения входных и выходных характеристик транзистора КТ342Б.

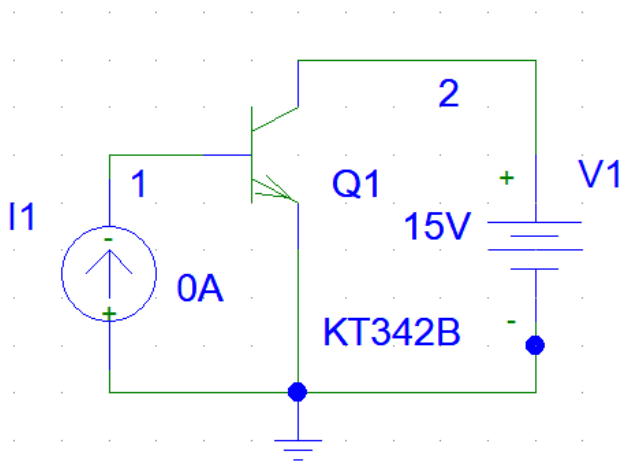


Рис.1. Схема для получения характеристик транзистора КТ342Б

На рис.2 представлена входная характеристика.

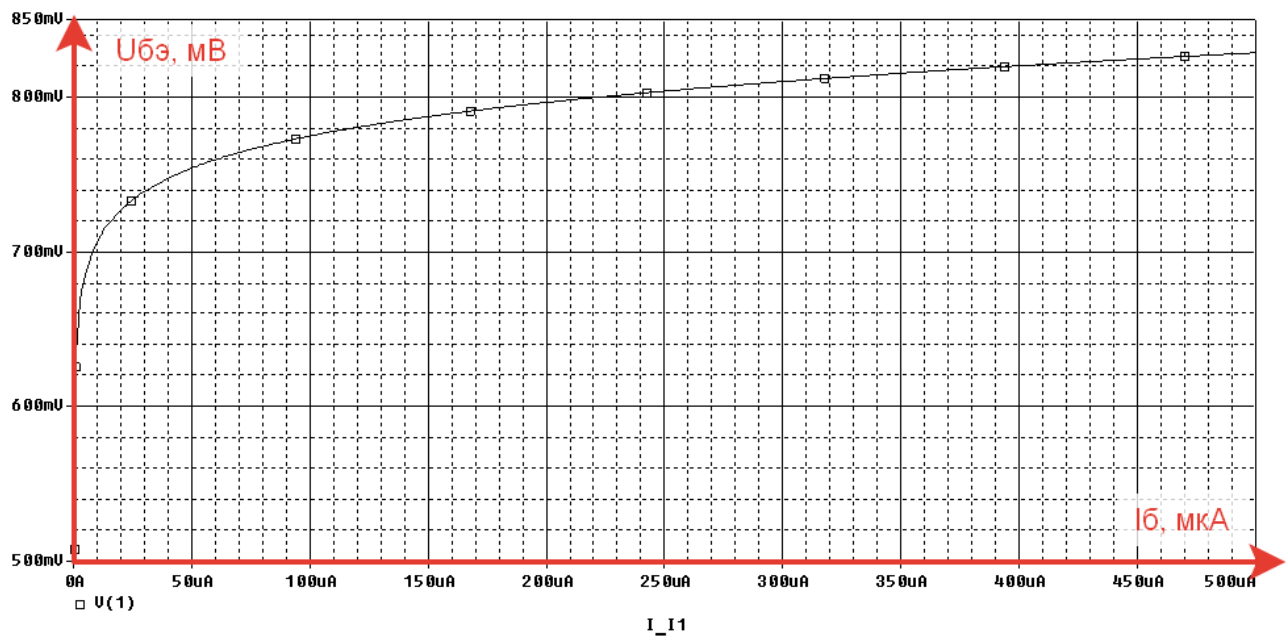


Рис.2. Входная характеристика транзистора КТ3426

На рис.3 представлена выходная характеристика и предельные допустимые значения  $I_k$  и  $U_{кэ}$ .

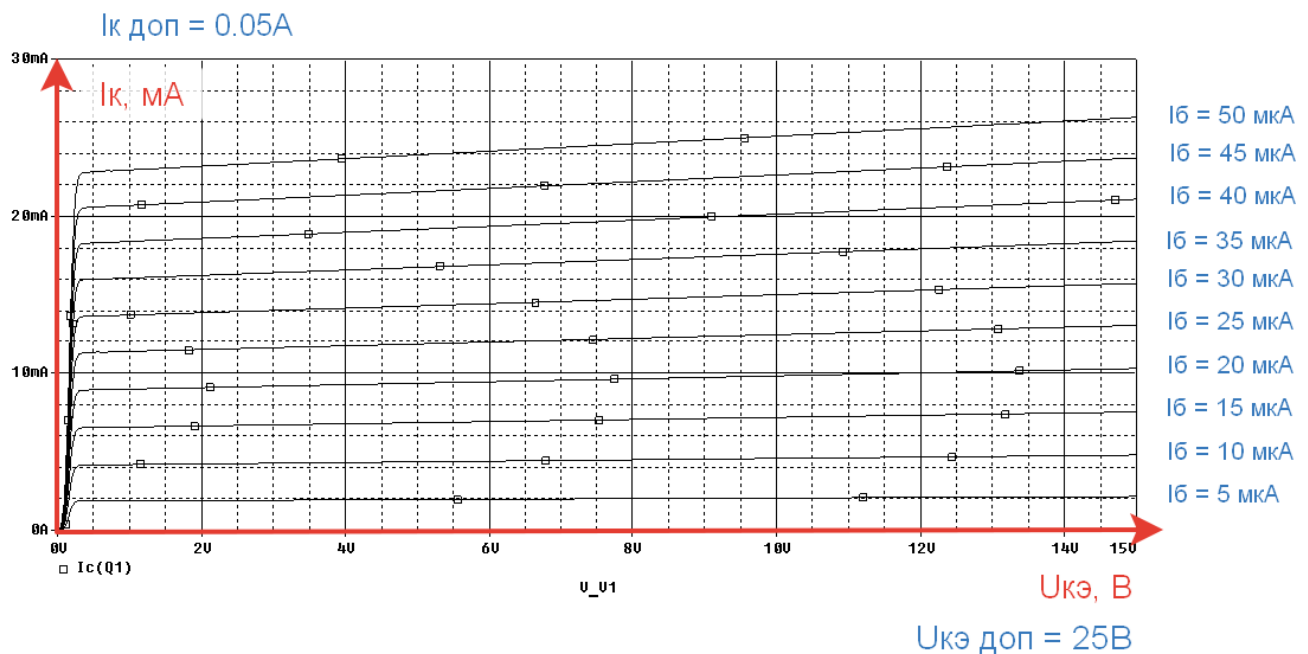


Рис.3. Семейство выходных характеристик транзистора КТ3426

## 2.3 Обоснование выбора схемы усилительного каскада

ЗДЕСЬ ДОЛЖНА БЫТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СПРАВКА ПО ВЫБОРУ СХЕМЫ КАСКАДА

Таким образом, схема усилительного каскада будет принимать вид, отраженный на рис. 6.

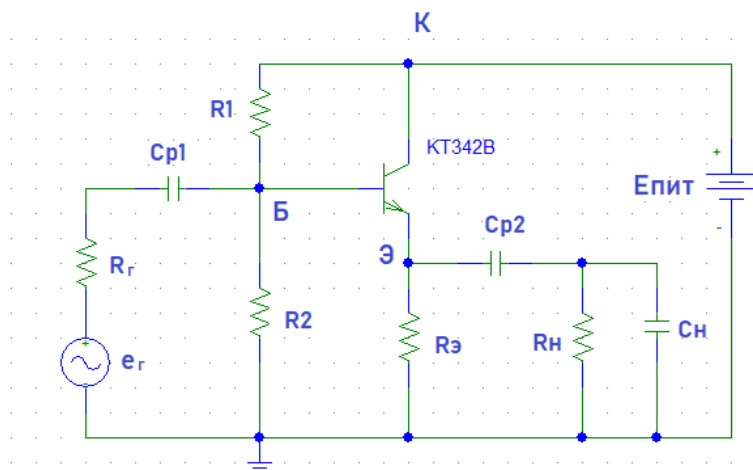


Рис.6. Схема усилительного каскада с общим коллектором (ОК)

## 2.4 Графическое обоснование выбора рабочей точки

Используя выходные характеристики транзистора по максимальной амплитуде выходного сигнала и сопротивлению нагрузки определяются рабочий режим транзистора и номинальное напряжение источника питания.

Проведем построение выходных характеристик транзистора КТ342б и ограничим рабочую область допустимыми значениями тока и напряжения, в также гиперболой  $I_{\kappa} = P_{\text{доп}} / U_{\kappa\text{э}}$ . Результат построения представлен на рис. 7.

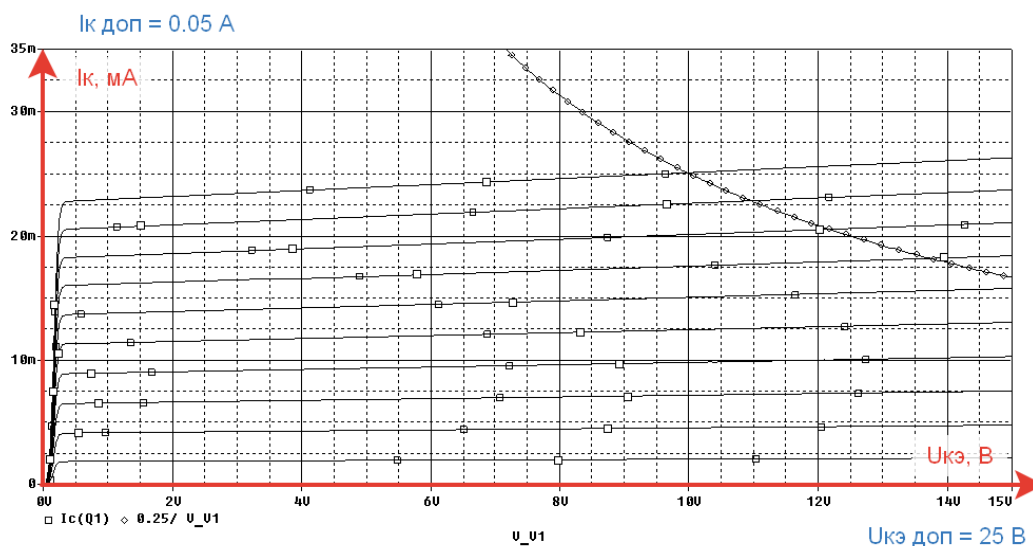


Рис.7. Семейство выходных характеристик транзистора КТ342б

## 2.5 Расчет рабочей точки

Напряжение рабочей точки можем выбрать по неравенству:  $U_{\kappa\text{эА}} \geq \Delta U_T + \Delta U_{\text{нел}} + U_{\text{вых}}$ .

Напряжение  $U_{\text{вых}} = 2 \text{ (В)}$  задано в техническом задании. Выберем запас напряжений, связанный с нелинейностью выходных вольтамперных характеристик транзистора из диапазона  $U_{\text{нел}} = 1..2 \text{ (В)}$ . Возьмем  $\Delta U_{\text{нел}} = 1 \text{ (В)}$ . Также выберем запас напряжения, связанный с уходом рабочей точки из-за изменения температуры и разброса параметров транзистора из диапазона  $U_T = 1..2 \text{ (В)}$ . Возьмем  $\Delta U_T = 1 \text{ (В)}$ .

Напряжение рабочей точки:

$$U_{\kappa\text{эА}} \geq 1 + 1 + 2 = 4 \text{ (В)}$$

Напряжение питания можем определить по неравенству:

$$E_n \geq \Delta U_{\text{нел}} + 2 * \Delta U_T + 2 * U_{\text{вых}} + k * U_{\text{вых}}$$

При этом должно выполняться неравенство:  $E_n < U_{\kappa\text{э доп}}$

Возьмем  $k=3$ :  $E_n \geq 1 + 2 * 1 + 2 * 2 + 3 * 2 = 13 \text{ (В)}$

$E_n$  выбирается из номинального ряда напряжений источников:

$$E_n = (6, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 27, 36, 40) \text{ В}$$

Так как должно выполняться неравенство  $E_n \geq 13 \text{ (В)}$ , можно выбрать значение с запасом. Возьмем  $E_n = 20 \text{ (В)}$ .

Сравним полученные значения напряжения с максимально допустимым значением:

$$\left. \begin{array}{l} E_n = 20 (В) \\ U_{кэ доп} = 25(В) \end{array} \right\} \Rightarrow E_n < U_{кэ доп} - \text{неравенство выполняется}$$

Рекомендуется брать  $U_{кэА} \approx (0.4..0.6)E_{пит}$ .

При  $E_n = 20 (В)$  данный диапазон имеет вид  $U_{кэА} \approx (8..12) (В)$ .

Возьмем  $U_{кэА} = 8 (В)$

Значения тока должны удовлетворять неравенству:  $I_k \geq \frac{U_{вых} + \Delta U_T}{R_-}$ .

Выражение в правой части неравенства можем привести к виду:

$$\frac{U_{вых} + \Delta U_T}{R_-} = (2..5) \frac{U_{вых}}{R_n} = 5 * \frac{2}{0.6 * 10^3} = 0,016(A).$$

Таким образом, значение тока удовлетворяет неравенству  $I_k \geq 0,016(A)$

Тепловой ток рекомендуется взять из диапазона  $(1..2) мА$ . Возьмем  $I_{к0} = 2(мА)$ .

Рассчитаем ток рабочей точки:

$$I_{кА} = I_{к-} + I_{к0} = 0.016 + 0.002 = 0.018 (A)$$

Была определена рабочая точка, удовлетворяющая ограничениям максимально допустимых значений мощности, напряжения и тока. Результаты расчета представлены в табл 4.

Табл. 4. Координаты рабочей точки и  $E_n$

Параметр	$U_{кэА}$ , В	$I_{кА}$ , мА	$E_n$ , В
Значение	8	18	20

Рассчитаем сопротивление для построения нагрузочной прямой:

$$R_- = \frac{E_{пит} - U_{кэА}}{I_{кэ}} = \frac{20 - 8}{18 * 10^{-3}} = 666(Ом)$$

На графике с выходными характеристиками построим нагрузочную прямую и отметим рабочую точку. Результаты построения приведены на рис. 8.

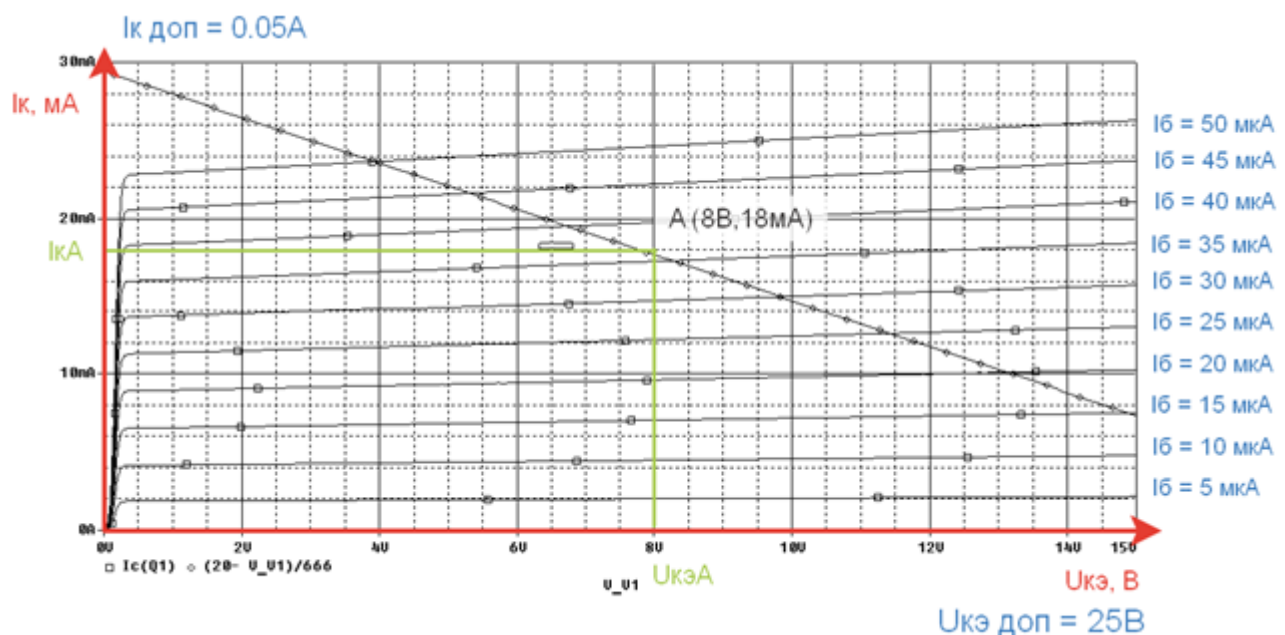


Рис.8. Семейство выходных характеристик транзистора КТ342Б с рабочей точкой А, нагрузочной прямой и допустимыми значениями тока и напряжения



## 2.6 Определение малосигнальных параметров транзистора

Для дальнейшего расчета параметров требуется определить коэффициент  $\beta$ . Его можно взять равным коэффициенту усиления  $h_{21э}$ . Для этого по характеристикам в рабочей точке требуется определить малосигнальные параметры транзистора: коэффициент усиления  $h_{21э}$  и входное сопротивление транзистора  $h_{11э}$ .

На построенных ранее выходных характеристиках отмечаем две точки, ближайшие к найденной рабочей точке. Результат приведем на рис. 9.

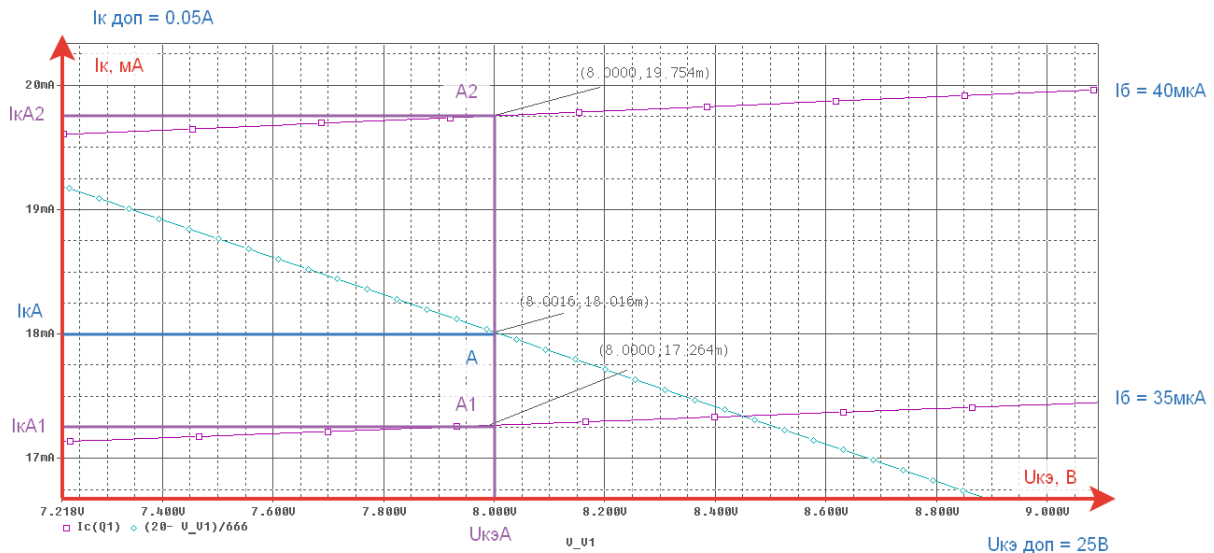


Рис. 9. Семейство выходных характеристик транзистора КТ342б с рабочей точкой А и дополнительными точками А1 и А2 для определения коэффициента  $h_{21э}$

Расчет коэффициента усиления  $h_{21э}$  производится по формуле  $h_{21э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}$ .

Найдем  $\Delta I_b$  и  $\Delta I_k$ :

$$\Delta I_b = I_{bA2} - I_{bA1} = 40 \cdot 10^{-6} - 35 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-6} (A)$$

$$\Delta I_k = I_{кА2} - I_{кА1} = 19,754 \cdot 10^{-3} - 17,264 \cdot 10^{-3} = 2,49 \cdot 10^{-3} (A)$$

Таким образом, коэффициент усиления  $h_{21э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{2,49 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-6}} = 498$

Найденный коэффициент принадлежит отрезку допустимых значений:

$$h_{21э} = 498 \in (\beta_{min} \cdot \beta_{max}) = (200 \dots 500)$$

Произведем расчет тока базы:

$$I_{бА} = \frac{I_{кА}}{h_{21э}} = \frac{0,018}{498} = 36,14 \mu A$$

Полученное значение принадлежит отрезку, отраженному на рис. 9:

$$I_{бА} \in (35 \dots 40) \mu A$$

Построим входную характеристику, отметим рабочую точку А и дополнительную точку А1 для определения входного сопротивления (рис. 10).

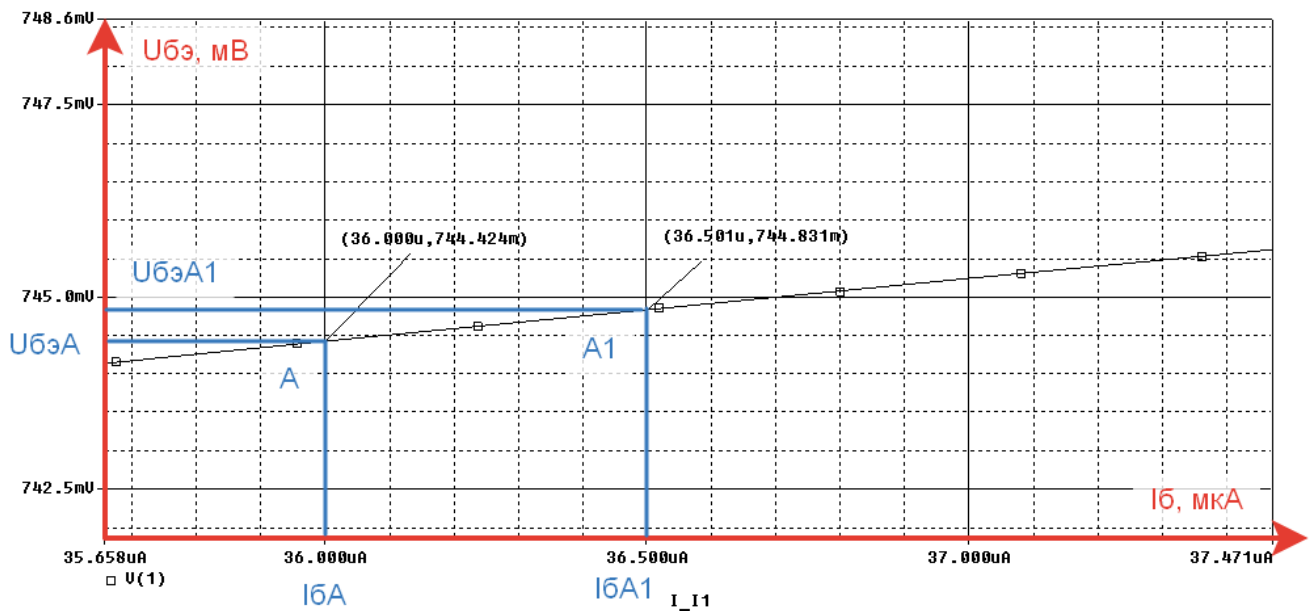


Рис.10. Входная характеристика транзистора КТ3426

Расчет входного сопротивления  $h_{11э}$  производится по формуле  $h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}}$ .

Найдем  $\Delta I_{б}$  и  $\Delta U_{бэ}$ :

$$\Delta I_{б} = I_{бA1} - I_{бA} = 36.501 \cdot 10^{-6} - 36 \cdot 10^{-6} = 0,501 \cdot 10^{-6} (A)$$

$$\Delta U_{бэ} = U_{бэA1} - U_{бэA} = 744,831 \cdot 10^{-3} - 744,424 \cdot 10^{-3} = 0,407 \cdot 10^{-3} (B)$$

Таким образом входное сопротивление  $h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} = \frac{0,407 \cdot 10^{-3}}{0,501 \cdot 10^{-6}} = 812 (Om)$

В данном пункте были рассчитаны значения параметров  $h_{11э}$  и  $h_{21э}$ . Результаты расчет приведены в табл. 5.

Табл. 5. Значения параметров  $h_{21э}$  и  $h_{11э}$

Параметр	$h_{21э}$	$h_{11э}$
Единицы измерения	-	Ом
Значение	498	812

## 2.7 Расчет сопротивлений резисторов

Требуется рассчитать сопротивления резисторов выходной цепи каскада. По заданному типу транзистора и его предельным параметрам, определенным по справочным данным, нужно обосновать возможность применения транзистора в заданной схеме усилительного каскада.

Ранее было рассчитано сопротивление  $R_{\Sigma} = 666 (Om)$  для построения нагрузочной прямой по постоянному току. Для схемы с общим коллектором (ОК) сопротивление эмиттера  $R_{э} = R_{\Sigma}$ .

Согласно номинальному ряду:  $R_{э} = 680 (Om)$ .

Расчет сопротивления по переменному току  $R_{\Sigma}$ :

$$R_{\sim} = \frac{R_3 * R_H}{R_3 + R_H} = \frac{680 * 600}{680 + 600} = 319(\text{Ом})$$

Расчет  $U_n$ :  $U_n = I_{\kappa A} * R_{\sim} = 18 * 10^{-3} * 319 = 5,742(\text{В})$

Требуется проверить попадание рабочей точки в нелинейный режим (режим отсечки). Это можно сделать, проверив выполнение неравенства  $U_n > U_{\text{вых}} + \Delta U_T$ . Запас  $\Delta U_T$  берем, чтобы учесть уход рабочей точки из-за изменения температуры и разброса параметров транзистора. Таким образом:

$$\left. \begin{array}{l} U_n = 5,742(\text{В}) \\ U_{\text{вых}} + \Delta U_T = 2 + 1 = 3(\text{В}) \end{array} \right\} \Rightarrow U_n > U_{\text{вых}} + \Delta U_T$$

Неравенство выполняется. Следовательно, удалось обеспечить работу усилительного каскада в линейном режиме.

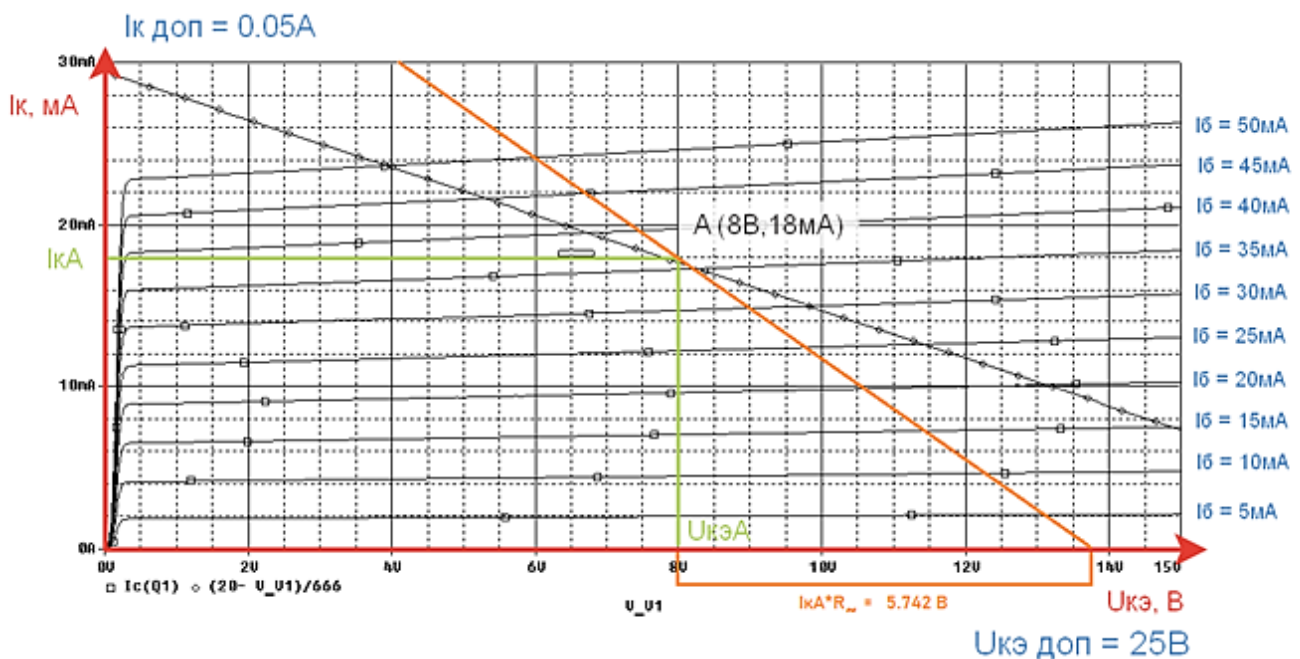


Рис.11. Семейство выходных характеристик транзистора KT3426 с нагрузочными прямыми по постоянному и переменному токам

Проведем проверку допусков транзистора для дальнейшего определения сопротивлений.

Для п-р-п транзистора  $E_n = 20(\text{В}) > 0$

$$E_n = 20(\text{В}) < U_{\text{кэ доп}} = 25(\text{В})$$

Расчет максимального тока:

$$I_{\text{к макс}} = I_{\kappa A} + \frac{U_{\text{кэА}}}{R_{\sim}} = 18 * 10^{-3} + \frac{4}{319} = 0.0305(\text{А})$$

Проверка значений тока:

$$I_{\text{к макс}} = 0,0305(\text{А}) < I_{\text{к доп}} = 0.05(\text{А})$$

Расчет мощности в рабочей точке:

$$P_A = I_{\kappa A} * U_{\text{кэА}} = 18 * 10^{-3} * 8 = 0,144(\text{Вт})$$

Проверка значений мощности:

$$P_A = 0,144(\text{Вт}) < P_{\text{доп}} = 0,25(\text{Вт})$$

Найденные значения удовлетворяют ограничениям максимально допустимых значений мощности, напряжения и тока.

Далее требуется рассчитать сопротивления резисторов входной цепи схемы с учетом разброса коэффициента усиления транзистора и колебаний внешней температуры.

$$\Delta I_{\kappa \partial \partial \partial} = \frac{\Delta U_T}{R_-} = \frac{1}{680} = 1,47 * 10^{-3} (A)$$

$$\Delta I_{\kappa \partial \partial \partial} = 1,47 * 10^{-3} (A) < 0,1 * I_{\kappa A} = 1,8 * 10^{-3} (A)$$

$$\text{Возьмем параметр } \beta = h_{21\beta} = 498$$

Посчитаем уход рабочей точки из-за технологического разброса параметра  $\beta$ :

$$\Delta \beta = \max \begin{cases} \beta - \beta_{\min} \\ \beta_{\max} - \beta \end{cases} \Rightarrow \Delta \beta = 498 - 200 = 298$$

Максимальные колебания температуры:

$$\Delta T = \max \begin{cases} T - T_{\min} \\ T_{\max} - T \end{cases} \Rightarrow \Delta T = 20 - (-40) = 60^{\circ} C$$

Рекомендуется взять  $\xi$  из диапазона  $\xi = (1,5..2) \frac{mB}{^{\circ}C}$ . Возьмем  $\xi = 2 \frac{mB}{^{\circ}C}$ .

Рассчитаем  $R_6$  по формуле, взятой из литературы №1:

$$R_6 \leq \frac{\beta(\Delta I_{\kappa \partial \partial \partial} R_9 - |\xi \Delta T|)}{\Delta \beta I_{6A} - \Delta I_{\kappa \partial \partial \partial}} - R_9 = \frac{498(1,47 * 10^{-3} * 680 - |2 * 10^{-3} * 60|)}{298 * 36 * 10^{-6} - 1,47 * 10^{-3}} - 680 = 46,6 * 10^3 (Om)$$

Определим примерный коэффициент усиления. Для каскада с общим коллектором он рассчитывается по формуле  $K_{e0} = K_{u\kappa\kappa} * \xi_{\partial\kappa} * \xi_{\partial\partial\kappa}$ . В данном случае коэффициент зависит только от  $\xi_{\partial\kappa}$ .  $R_{\partial\partial\kappa}$  достаточно мало, поэтому  $\xi_{\partial\partial\kappa} \approx 1$ . При этом  $K_{u\kappa\kappa} \approx 1$ .

Чтобы рассчитать  $\xi_{\partial\kappa} = \frac{R_{\partial\kappa}}{R_{\partial\kappa} + R_{\Gamma}}$ , необходимо определить  $R_{\partial\kappa}$ :

$$R_{\partial\kappa} = \frac{R_6(h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-)}{R_6 + (h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-)} = \frac{46600(812 + (1 + 498) * 319)}{46600 + (812 + (1 + 498) * 319)} = 36088 (Om)$$

Рассчитаем предварительное  $\xi_{\partial\kappa}$ :

$$\xi_{\partial\kappa} = \frac{R_{\partial\kappa}}{R_{\partial\kappa} + R_{\Gamma}} = \frac{36088}{36088 + 1100} = 0,97 - \text{слишком большой коэффициент}$$

Подберем  $R_{\partial\kappa}$  так, чтобы  $\xi_{\partial\kappa} \approx 0,74 > 0,7$

$$\xi_{\partial\kappa} = \frac{R_{\partial\kappa}}{R_{\partial\kappa} + R_{\Gamma}} \Rightarrow R_{\partial\kappa} = \frac{R_{\Gamma} \xi_{\partial\kappa}}{1 - \xi_{\partial\kappa}} = \frac{1100 * 0,74}{1 - 0,74} = 3140 (Om)$$

Подберем значение  $R_6$  так, чтобы  $R_{\partial\kappa} = 3140 (Om)$ :

$$R_{\partial\kappa} = \frac{R_6(h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-)}{R_6 + (h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-)} \Rightarrow R_6 = \frac{R_{\partial\kappa}(h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-)}{(h_{11\beta} + (1 + h_{21\beta})R_-) - R_{\partial\kappa}} = \frac{3140 * (812 + (1 + 498) * 319)}{(812 + (1 + 498) * 319) - 3140} = 3200 (Om)$$

$R_6 > 0 \Rightarrow$  Мы обеспечили стабильность схемы

$$R_{cm} = R_6 + (1 + \beta)R_9 = 3200 + (1 + 498) * 680 = 342 * 10^3 (Om)$$

$$R_1 = \frac{E_{num} R_6}{0,7 + I_{6A} R_{cm}} = \frac{20 * 3200}{0,7 + 36,022 * 10^{-6} * 342 * 10^3} = 4915 (Om)$$

Округленное по номинальному ряду  $R_1 = 5100 (Om)$

$$R_2 = \frac{R_1 R_6}{(R_1 - R_6)} = \frac{5100 * 3200}{5100 - 3200} = 7970 (Om)$$

Округленное по номинальному ряду  $R_2 = 9100 (Om)$

В данном пункте были определены значения сопротивлений в схеме усилительного каскада с ОК для транзистора КТ342Б так, чтобы коэффициент усиления был примерно равен  $K_{e0}=0,7$ . Результаты синтеза схемы представлены в табл. 6.

Табл. 6. Значения сопротивлений

Параметр	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом
Точное значение	4,777	8,912	666	680	319
Значение из ряда E24	5,1	9,1	680	****	****

Значения округляются в большую сторону, чтобы избежать проблем с обеспечением коэффициента усиления каскада.

### Результат синтеза схемы:

На рис. 10 представлена синтезированная схема усилительного каскада с общим коллектором.

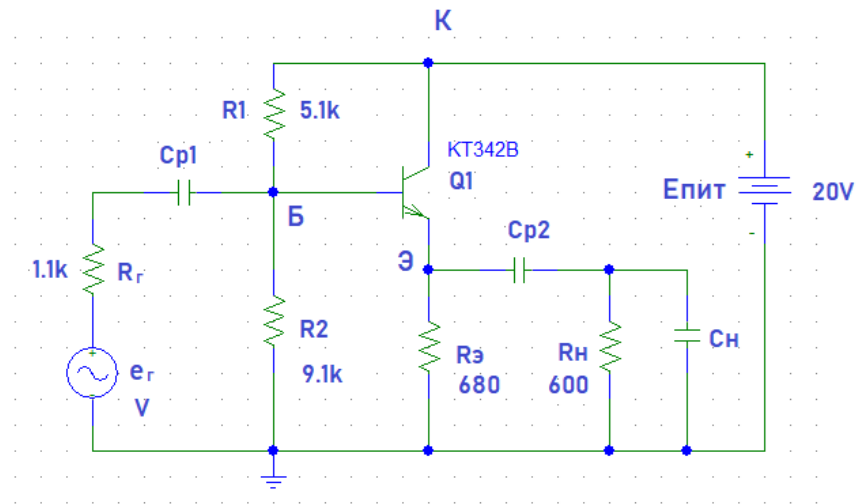


Рис.12. Синтезированная схема усилительного каскада с общим коллектором(ОК)

## 2.8 Расчет режима каскада для выбранных сопротивлений

Для выбранных сопротивлений резисторов схемы нужно аналитически рассчитать рабочий режим каскада и проверить, совпадает ли он с выбранным в [п. 2.5](#).

На рис. 13 представлена эквивалентная схема усилителя с общим коллектором для расчета рабочего режима.

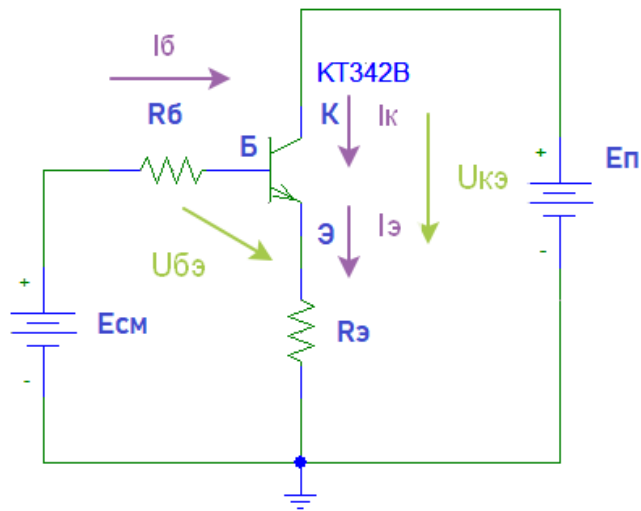


Рис.13. Эквивалентная схема усилителя с общим коллектором для расчета рабочего режима

Для расчета рабочего режима каскада используем систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{бэ} = 0,7(B) \\ E_n = I_э R_э + U_{кэ} \\ E_{см} = I_э R_э + I_б R_б + U_{бэ} \\ I_э = I_к + I_б \\ I_к = \beta I_б \\ E_{см} = \frac{E_n R_2}{R_1 + R_2} \end{array} \right.$$

Расчет Rб:

$$R_б = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5100 * 9100}{5100 + 9100} = 3270(Ом)$$

Расчет рабочего режима каскада:

$$E_{см} = \frac{E_n R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 * 9100}{5100 + 9100} = 12.82(B)$$

$$I_{бА} = \frac{E_{см} - U_{бэ}}{R_б + (1 + \beta) R_э} = \frac{12.82 - 0,7}{3270 + (1 + 498) * 680} = 35,38 * 10^{-6}(A)$$

$$I_{кА} = \beta I_{бА} = 498 * 35,38 * 10^{-6} = 17,62 * 10^{-3}(A)$$

$$I_э = (\beta + 1) I_{бА} = 499 * 35,68 * 10^{-6} = 17,65 * 10^{-3}(A)$$

$$U_{кэА} = E_n - I_э R_э = 20 - 17,65 * 10^{-3} * 680 = 7,998(B)$$

Результаты расчета представим в табл. 7.

Табл. 7. Координаты рабочей точки

Параметр	$U_{бэА}$	$I_{бА}$	$U_{кэА}$	$I_{кА}$
Единицы измерения	мВ	мкА	В	мА
<a href="#">П. 2.5</a>	745	36	8	18

<a href="#">П. 2.8</a>	700	35,38	7,998	17,62
------------------------	-----	-------	-------	-------

## 2.9 Проверка правильности расчетов рабочего режима с помощью OrCad.

Проверим правильность расчетов рабочего режима с помощью OrCad.  
Результаты представлены на рис. 14.

$$I_{\bar{o}A} = 35,55 \cdot 10^{-6} (A)$$

$$I_{\kappa A} = 17,55 \cdot 10^{-3} (A)$$

$$U_{\kappa \bar{A}} = U_{\kappa} - U_{\bar{A}} = 20 - 11,96 = 8,04 (B)$$

$$U_{\bar{o} \bar{A}} = U_{\bar{o}} - U_{\bar{A}} = 12,7 - 11,96 = 740 \cdot 10^{-3} (B)$$

Значения параметров схожи с посчитанными в [пункте 2.8](#).

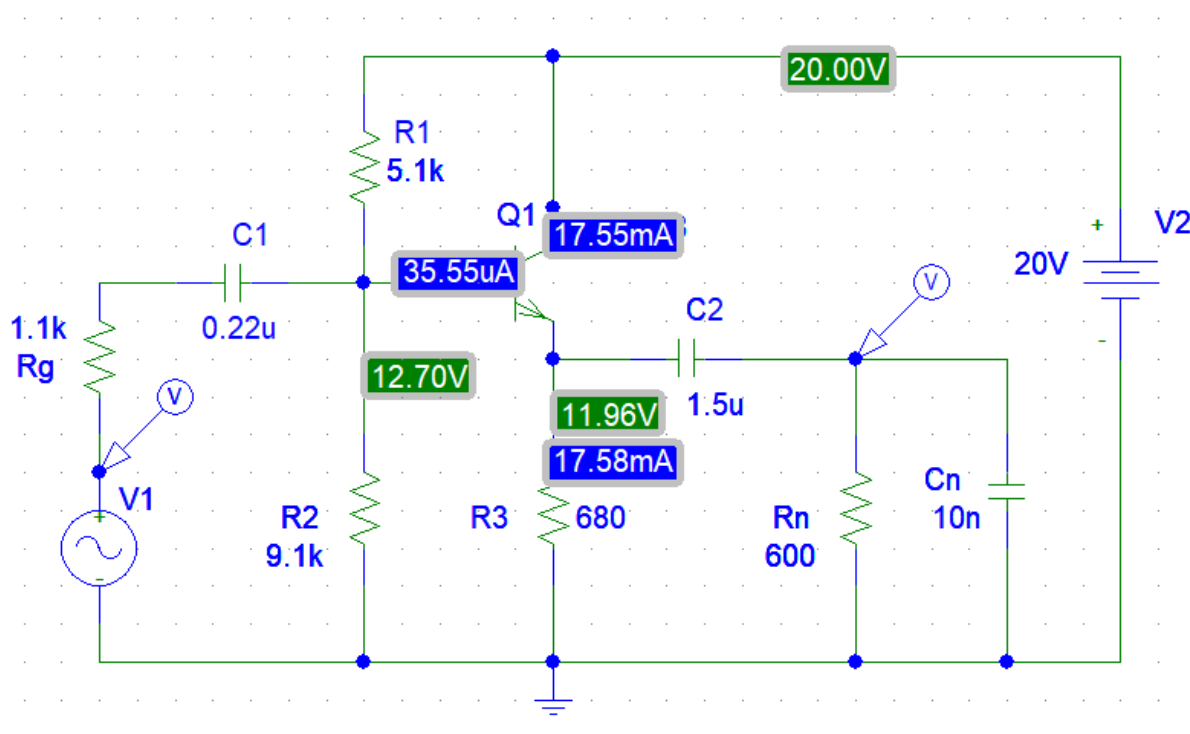


Рис.14. Схема усилителя для расчета рабочего режима

## 2.10 Расчет возможного ухода рабочего тока

Далее требуется рассчитать возможный уход рабочего тока из-за колебаний температуры и из-за разброса коэффициента усиления. Проверить, лежит ли это изменение в диапазоне, заданном в [п. 2.5](#).

Максимальные колебания температуры:

$$\Delta T = \max \begin{cases} T - T_{\min} \\ T_{\max} - T \end{cases} \Rightarrow \Delta T = 20 - (-40) = 60^{\circ}C$$

Рекомендуется брать  $\xi$  из диапазона  $\xi = (1,5..2) \frac{mB}{^{\circ}C}$ . Возьмем  $\xi = 2 \frac{mB}{^{\circ}C}$ .

Посчитаем уход рабочей точки из-за влияния температуры:

$$\Delta I_{\kappa 1} = \frac{|\xi \Delta T| \beta}{R_{\bar{o}} + R_3(1 + \beta)} = \frac{|2 * 10^{-3} * 60| 498}{3270 + 680(1 + 498)} = 0,1745 * 10^{-3} (A)$$

Посчитаем уход рабочей точки из-за технологического разброса параметра  $\beta$ :

$$\Delta \beta = \max \left\{ \begin{array}{l} \beta - \beta_{\min} \\ \beta_{\max} - \beta \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta \beta = 498 - 200 = 298$$

$$\gamma_{\bar{o}} = \frac{R_3}{R_3 + R_{\bar{o}}} = \frac{680}{680 + 3270} = 0,1722$$

$$\Delta I_{\kappa 2} = \frac{\Delta \beta / \beta}{1 + \beta * \gamma_{\bar{o}}} * I_{\kappa A} = \frac{298 / 498}{1 + 498 * 0,1722} * 17,62 * 10^{-3} = 121,5 * 10^{-6} (A)$$

Посчитаем возможный уход рабочей точки:

$$\Delta I_{\kappa} = \Delta I_{\kappa 1} + \Delta I_{\kappa 2} = 0,1745 * 10^{-3} + 121,5 * 10^{-6} = 0,296 * 10^{-3} (A)$$

Расчет  $\Delta U_T$

$$\Delta U_T = \Delta I_{\kappa} R_{\bar{c}} = 0,296 * 10^{-3} * 680 = 0,2013 (B)$$

Табл. 8. Значение  $\Delta U_T$

	п. 3	п. 8
Единицы измерения	В	В
$\Delta U_T$	1	0,2013

Полученное в данном пункте значение  $\Delta U_T = 0,2013 (B)$  меньше выбранной в пункте 2.5 величины  $\Delta U_T = 1 (B)$ .

## 2.11 Графический расчет рабочего режима для выбранных сопротивлений

Для выбранных сопротивлений резисторов схемы определить рабочий режим графически, используя ВАХ транзистора. Определить максимальную амплитуду неискаженного выходного сигнала. Сравнить с заданием.

Построим входную характеристику и нанесем на график нагрузочную прямую.

Уравнение нагрузочной прямой:

$$U_{\bar{o}3}(I_{\bar{o}}) = E_{cm} - I_{\bar{o}} R_{\bar{o}} - I_3 R_3$$

$$U_{\bar{o}3}(I_{\bar{o}}) = 12,82 - I_{\bar{o}} * 3270 - I_3 * 680$$

Вид уравнения нагрузочной прямой в среде OrCad:

$$12,82 - IB(Q1) * 3270 - (IB(Q1) + IC(Q1)) * 680$$

Входная характеристика представлена на рис.15.



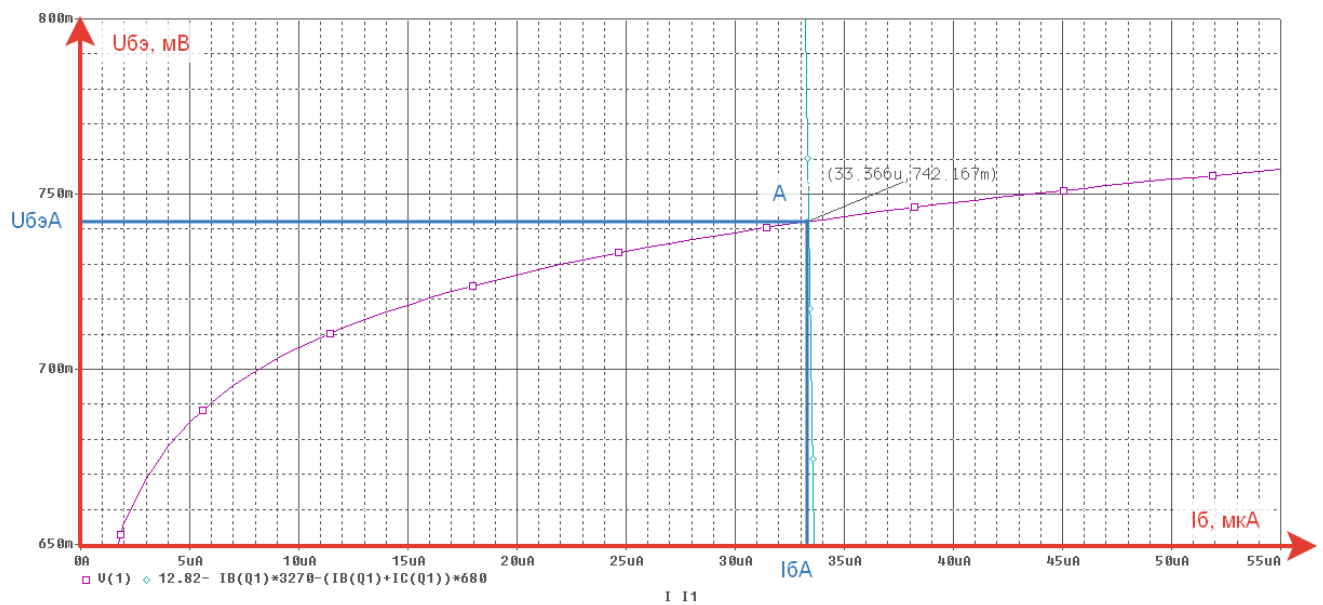


Рис.15. Входная характеристика транзистора KT3426 с нанесенной рабочей точкой A

Построим выходную характеристику и нанесем на график нагрузочную прямую.

Уравнение нагрузочной прямой:

$$U_{кэ}(I_{к}) = E_n - I_{к} R_{\Sigma}$$

$$U_{кэ}(I_{к}) = 20 - I_{к} * 680$$

Вид уравнения нагрузочной прямой в среде OrCad:

$$(20 - V_{U1}) / 680$$

Выходная характеристика представлена на рис.16.

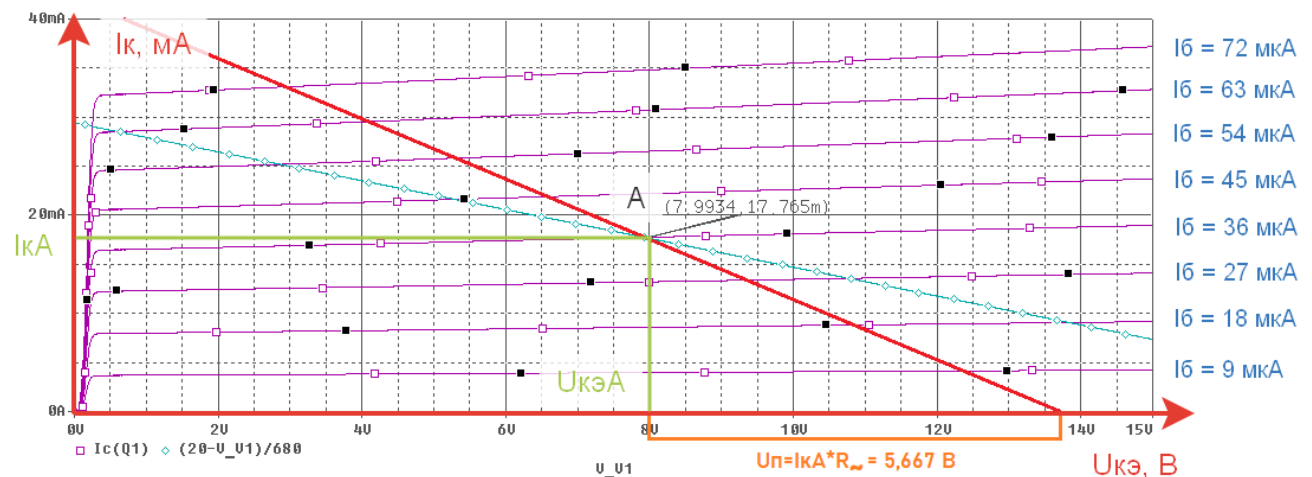


Рис.16. Семейство выходных характеристик транзистора KT3426 с нанесенной рабочей точкой A и нагрузочными прямыми по переменному и постоянному току

Определение максимальной амплитуды неискаженного выходного сигнала:

$$U_n = I_{кA} * R_{\Sigma} = 17.766 * 10^{-3} * 319 = 5.667(B)$$

$$\Delta U_T = 0.2013(B)$$

$$U_{н макс} = U_n - \Delta U_T = 5.667 - 0.2013 = 5.4657(B)$$

Сравнение с данными ТЗ:

$$\left. \begin{array}{l} U_{н макс} = 5.4657(B) \\ U_{н ТЗ} = 2(B) \end{array} \right\} U_{н ТЗ} < U_{н макс} - \text{условие выполняется}$$

Результаты графического расчета рабочего режима представлены в табл. 9

Табл. 9. Координаты рабочей точки

Параметр	$U_{бэА}$	$I_{бА}$	$U_{кэА}$	$I_{кА}$
Единицы измерения	мВ	мкА	В	мА
<a href="#">П. 2.5</a>	745	36	8	18
<a href="#">П. 2.8</a>	700	35,38	7,998	17,65
<a href="#">П. 2.11</a>	742,167	33,366	7,9934	17,765

## 2.12 Расчет входного и выходного сопротивлений усилителя

Проведем расчет входного и выходного сопротивлений усилителя.

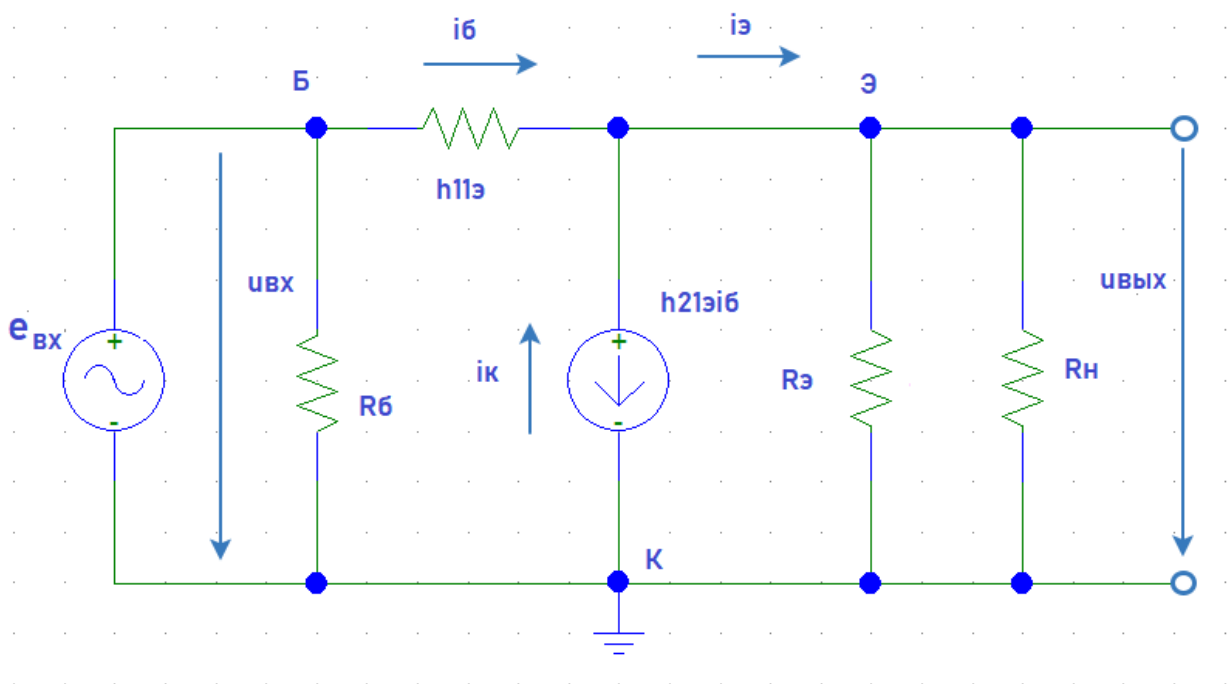


Рис.17. Схема замещения каскада по переменному току

Расчет  $R_{вх}$ :

$$r_{\bar{o}} = \frac{u_{\bar{o}x}}{i_{\bar{o}}} = h_{11\bar{o}} + (1 + h_{21\bar{o}})R_{\bar{e}} = 812 + (1 + 498) \cdot 319 = 160 \cdot 10^3 (\text{Ом})$$

$$R_{\bar{o}x} = R_{\bar{o}} \parallel r_{\bar{o}} = \frac{R_{\bar{o}} \cdot r_{\bar{o}}}{R_{\bar{o}} + r_{\bar{o}}} = \frac{3270 \cdot 160 \cdot 10^3}{3270 + 160 \cdot 10^3} = 3205 (\text{Ом})$$

Расчет  $R_{вых}$ :

$$r_{\bar{e}} = \frac{u_{\bar{o}b\bar{x}}}{i_{\bar{e}}} = \frac{h_{11\bar{e}} + R_{\bar{e}} \parallel R_{\bar{o}}}{1 + h_{21\bar{e}}} = \frac{812 + \frac{1100 \cdot 3270}{1100 + 3270}}{1 + 498} = 3,277 (\text{Ом})$$

$$R_{\bar{o}b\bar{x}} = R_{\bar{e}} \parallel r_{\bar{e}} = \frac{R_{\bar{e}} \cdot r_{\bar{e}}}{R_{\bar{e}} + r_{\bar{e}}} = \frac{680 \cdot 3,277}{680 + 3,277} = 3,261 (\text{Ом})$$

## 2.13 Расчет коэффициента усиления напряжения

Рассчитать коэффициент усиления напряжения с учетом внутреннего сопротивления источника сигнала  $K_{e0} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{e_r}$ .

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_r} = \frac{3205}{3205 + 1100} = 0,7444$$

$$\xi_{\text{вых}} = \frac{R_n}{R_n + R_{\text{вых}}} = \frac{600}{600 + 3,261} = 0,9946$$

$$K_{\text{иХХ}} = \frac{(\beta + 1)R_s}{R_c + (\beta + 1)R_s} = \frac{499 * 680}{3270 + 499 * 680} = 0,9905$$

Расчет коэффициента усиления и сравнение с данными ТЗ:

$$K_{e0} = K_{\text{иХХ}} * \xi_{\text{вх}} * \xi_{\text{вых}} = 0,9905 * 0,7444 * 0,9946 = 0,7333 \left. \vphantom{K_{e0}} \right\} \Rightarrow K_{e0} \geq K_{e0 \text{ ТЗ}} - \text{выполняется}$$

$$K_{e0 \text{ ТЗ}} = 0,7$$

Результаты расчета входного, выходного сопротивлений и коэффициента усиления напряжения приведены в табл. 10.

Табл. 10. Значения  $R_{\text{вх}}$ ,  $R_{\text{вых}}$  и  $K_{e0}$

	$R_{\text{вх}}$	$R_{\text{вых}}$	$K_{e0}$
Единицы измерения	Ом	Ом	-
Значение	3205	3,261	0,7333

## 2.14 Расчет емкостей конденсаторов

По заданной нижней границе полосы пропускания рассчитать емкости конденсаторов.

Постоянную времени усилителя для диапазона низких частот  $\tau_n$  можно определить по формуле:

$$\tau_n = \left( \frac{1}{\tau_{n1}} + \frac{1}{\tau_{n2}} \right)^{-1}$$

Учитывая, что

$$\tau_n = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{2\pi f_n} = \frac{1}{2\pi * 400} = 0,3979 * 10^{-3}, \text{ где } f_n - \text{частота, заданная в ТЗ,}$$

для каскада ОК можно принять

$$\tau_{n1} = \tau_{n2} = 2\tau_n = 2 * 0,3979 * 10^{-3} = 0,7958 * 10^{-3}$$

$$\tau_{n1} = C_{p1}(R_c + R_{\text{вх}}) \Rightarrow C_{p1} = \frac{\tau_{n1}}{R_c + R_{\text{вх}}} = \frac{0,7958 * 10^{-3}}{1100 + 3205} = 0,1848 * 10^{-6} (\Phi)$$

$$\tau_{n2} = C_{p2}(R_n + R_{\text{вых}}) \Rightarrow C_{p2} = \frac{\tau_{n2}}{R_n + R_{\text{вых}}} = \frac{0,7958 * 10^{-3}}{600 + 3,261} = 1,319 * 10^{-6} (\Phi)$$

Округленные значения конденсаторов по номинальному ряду:

$$C_{p1} = 0,22 * 10^{-6} (\Phi), C_{p2} = 1,5 * 10^{-6} (\Phi)$$

Табл. 11. Значения конденсаторов  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$ 

Параметр	$C_{p1}$	$C_{p2}$
Единицы измерения	мкФ	мкФ
Значение	0,22	1,5

### 2.15 Определение верхней граничной полосы пропускания

Требуется определить верхнюю границу полосы пропускания, используя справочные данные на транзистор и данные на емкость нагрузки.

Постоянную времени усилителя для диапазона высоких частот  $\tau_{\theta}$  можно

определить по формуле:  $\tau_{\theta} = \sqrt{\tau_{\theta x}^2 + \tau_{\theta bx}^2 + \tau_T^2}$

Расчет  $\tau_{\theta x}$ :

$$C_{\theta x} = C_{\theta n} + C_{\theta n} |K_u| = 8 * 10^{-12} + 8 * 10^{-12} * 0.7333 = 13.86 * 10^{-12} (\Phi)$$

$$\tau_{\theta x} = C_{\theta x} \frac{R_{\theta x} * R_{\Gamma}}{R_{\theta x} + R_{\Gamma}} = 13.86 * 10^{-12} * \frac{3205 * 1100}{3205 + 1100} = 11.35 * 10^{-9}$$

Расчет  $\tau_{\theta bx}$ :

$$C_{\theta \text{ экв}} = C_{\theta} + C_{\theta n} \beta = 10 * 10^{-9} + 8 * 10^{-12} * 498 = 13.95 * 10^{-9} (\Phi)$$

$$\tau_{\theta bx} = C_{\theta \text{ экв}} \frac{R_{\theta bx} * R_{\theta}}{R_{\theta bx} + R_{\theta}} = 13.95 * 10^{-9} * \frac{3,261 * 600}{3,261 + 600} = 45.25 * 10^{-9}$$

Расчет  $\tau_T$ :

$$\gamma_{\theta} = \frac{R_{\theta}}{R_{\theta} + R_{\theta}} = \frac{680}{680 + 3205} = 0.175$$

$$\tau_T = \frac{\beta}{2\pi f_T (1 + \gamma_{\theta} \beta)} = \frac{498}{2\pi * 300 * 10^6 (1 + 0.175 * 498)} = 2.997 * 10^{-9}$$

Расчет  $\tau_{\theta}$ :

$$\tau_{\theta} = \sqrt{\tau_{\theta x}^2 + \tau_{\theta bx}^2 + \tau_T^2} = \sqrt{(11.35 * 10^{-9})^2 + (45.25 * 10^{-9})^2 + (2.997 * 10^{-9})^2} = 46.75 * 10^{-9}$$

Расчет  $f_{\theta}$  и сравнение с данными ТЗ:

$$f_{\theta} = \frac{1}{2\pi \tau_{\theta}} = \frac{1}{2\pi * 46.75 * 10^{-9}} = 3.404 * 10^6 (\Gamma\text{ц}) \left\{ \begin{array}{l} \Rightarrow f_{\theta \text{ ТЗ}} < f_{\theta} \\ f_{\theta \text{ ТЗ}} = 40 * 10^3 \Gamma\text{ц} \end{array} \right.$$

### 3. Перечень элементов (спецификация)

Табл. 12. Спецификация элементов

№	Поз.	Название	Кол-во	Примечание
	Резисторы			
1	R1	CF-100 (C1-4)-1 ВТ-5,1 кОм±5%	1	5,1 кОм
2	R2	CF-100 (C1-4)-1 ВТ- 9,1 кОм±5%	1	9,1 кОм
3	R3	CF-100 (C1-4)-1 ВТ-680 Ом±5%	1	680 Ом
4	Rn	MRS25-0.6 ВТ-600 Ом±1%	1	600 Ом
5	Rg	CF-100 (C1-4)-1 ВТ-1,1 кОм±5%	1	1,1 кОм
	Конденсаторы			
1	C1	K73-17, 0.22 мкФ, 63 В, ±10%	1	0,22 мкФ
2	C2	K73-17, 1.5 мкФ, 250 В, ±10%	1	1,5 мкФ
3	CH	X7R-0603, 10 нФ, 50 В, ±10%	1	10 нФ
	Транзисторы			
1	Q1	КТ342б	1	N-P-N

#### 4. Моделирование работы усилительного каскада на ЭВМ

Проверить с помощью программы схемотехнического моделирования *OrCad 9.1* работоспособность схемы. С ее помощью рассчитать:

- режим схемы,
- амплитудно-частотную характеристику,
- входное сопротивление усилителя,
- выходное сопротивление усилителя,
- амплитудную характеристику,
- для максимального неискаженного выходного сигнала определить коэффициент нелинейных искажений.

##### 4.1 Расчет рабочего режима

Схема для моделирования каскада с общим коллектором представлена на рис.18.

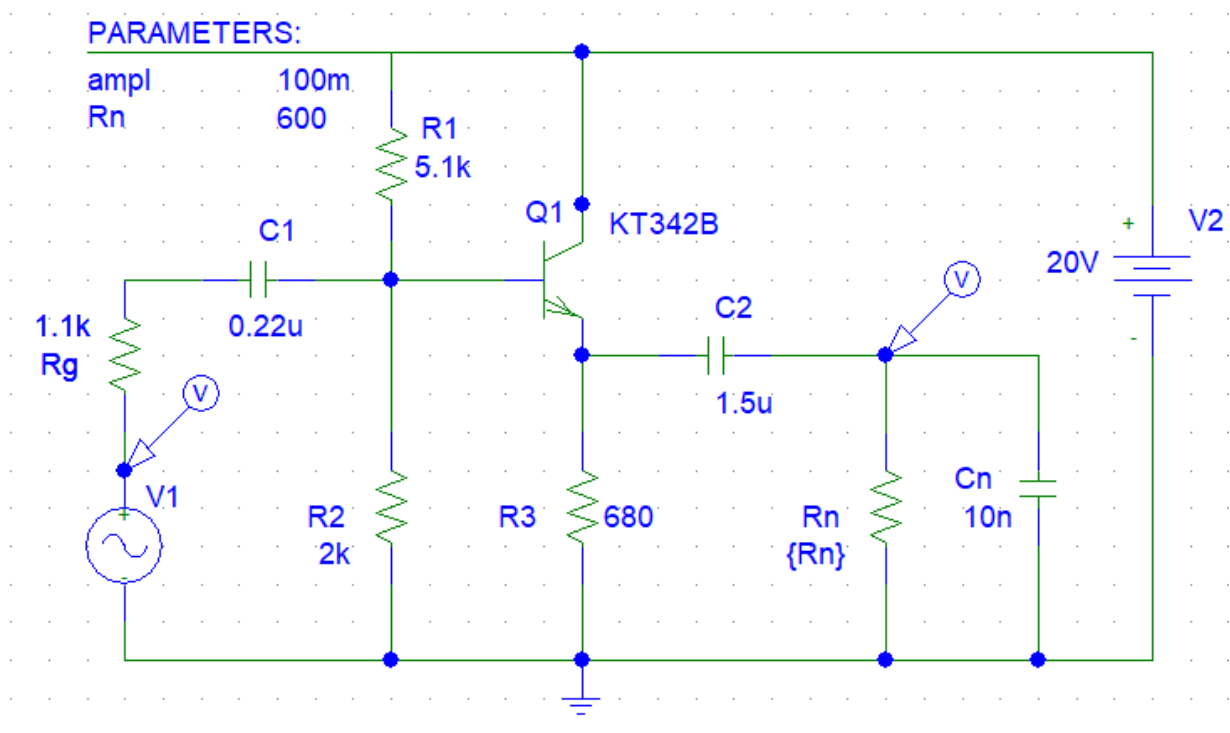


Рис.18. Схема для моделирования каскада с общим коллектором

Рассчитаем потенциалы и токи в OrCad 9.1.

$$I_{бА} = 35,55 \cdot 10^{-6} (A)$$

$$I_{кА} = 17,55 \cdot 10^{-3} (A)$$

$$U_{кэА} = U_{к} - U_{э} = 20 - 11,96 = 8,04 (B)$$

$$U_{бэА} = U_{б} - U_{э} = 12,82 - 11,96 = 860 \cdot 10^{-3} (B)$$

Результаты расчета представлены на рис. 19.

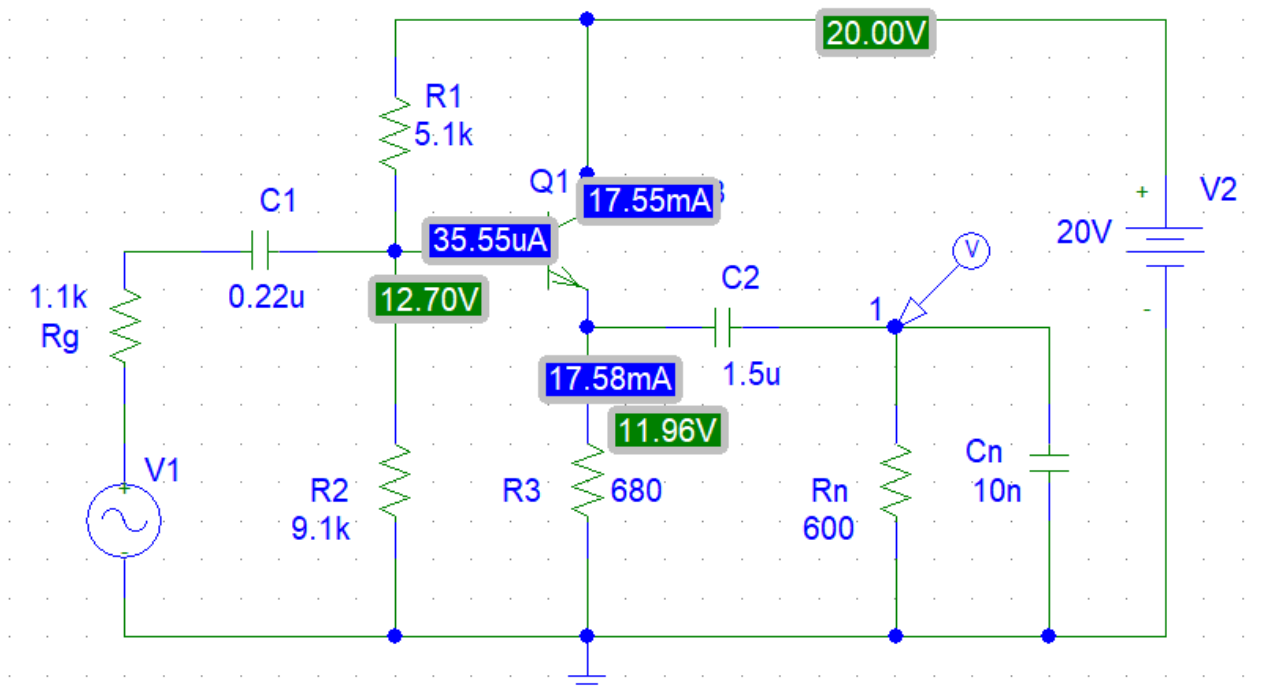


Рис.19. Рассчитанные потенциалы и токи

## 4.2 Амплитудно-частотная характеристика

Амплитудно-частотная характеристика каскада представлена на рис. 20. По снятой характеристике на уровне  $-3$  дБ от  $LK_{e0}$  при средней частоте  $f_{cp} = 29,975 \text{ кГц}$  определяются граничные частоты:  $f_n = 267,465 \text{ Гц}$  и  $f_v = 4,1522 \text{ МГц}$ .

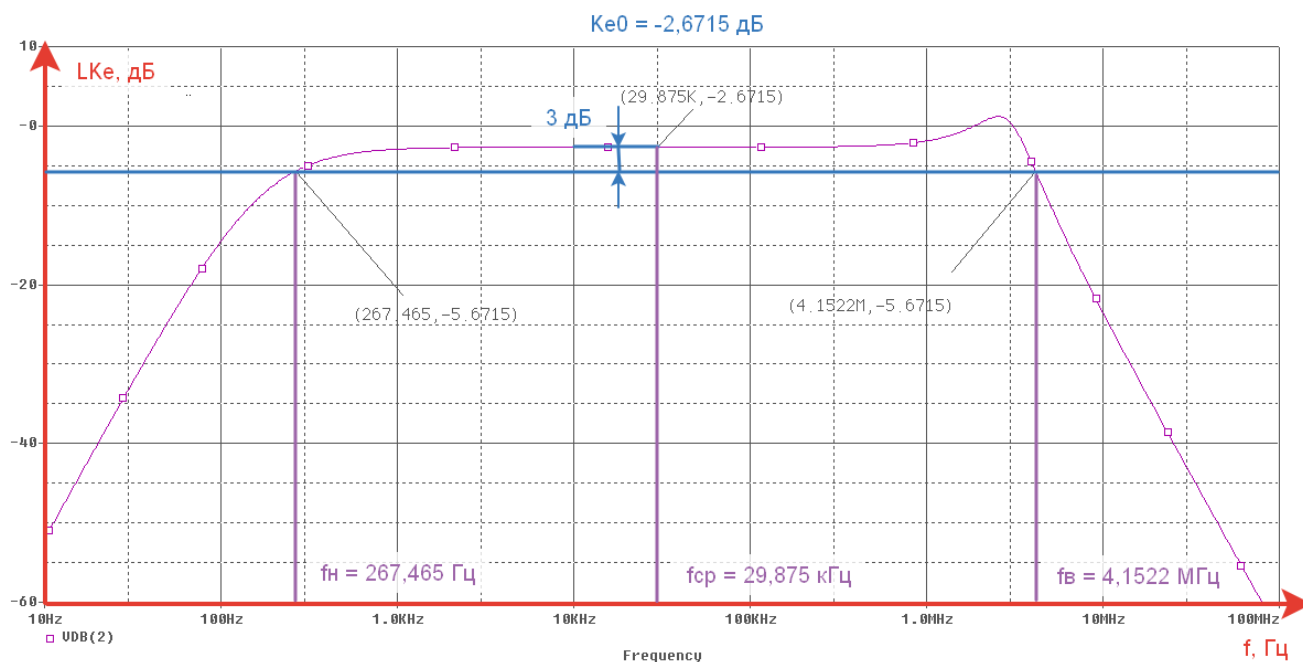


Рис.20 АЧХ каскада в логарифмическом масштабе

Расчет коэффициента усиления:

$$LK_{e0} = 20 \lg K_e \Rightarrow K_e = 10^{LK_{e0}/20} = 10^{-2.6715/20} = 0.7352$$

Результаты расчета граничных частот и коэффициента усиления представлены в табл. 13.

Табл. 13. Значения коэффициента усиления и граничных частот

Параметр	$ LK_{e0} , \text{дБ}$	$K_{e0}$	$f_n, \text{Гц}$	$f_v, \text{кГц}$
Техническое задание	3,098	0,7	400	40
Эксперимент	2.6725	0,7352	267.465	4152.2

### 4.3 Определение входного сопротивления каскада

По графику зависимости входного сопротивления от частоты (рис.21) видно, что в области средних частот входное сопротивление  $R_{вх} = 4,3012(\text{Ом})$

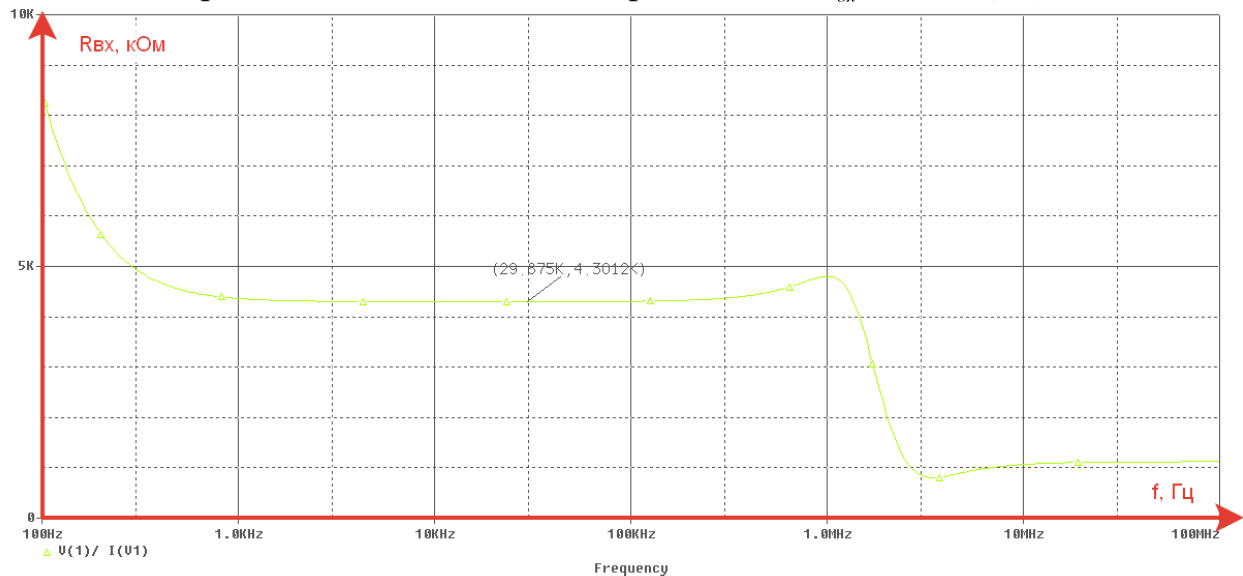


Рис.21. График зависимости входного сопротивления от частоты

### 4.4 Расчет нагрузочной характеристики усилителя

На рис. 22 представлено семейство АЧХ и нагрузочная характеристика усилителя, а на рис. 23 – нагрузочная характеристика с обозначенными точками 1 и 2 при  $K_u$  хх и  $K_u$  хх/2 соответственно.

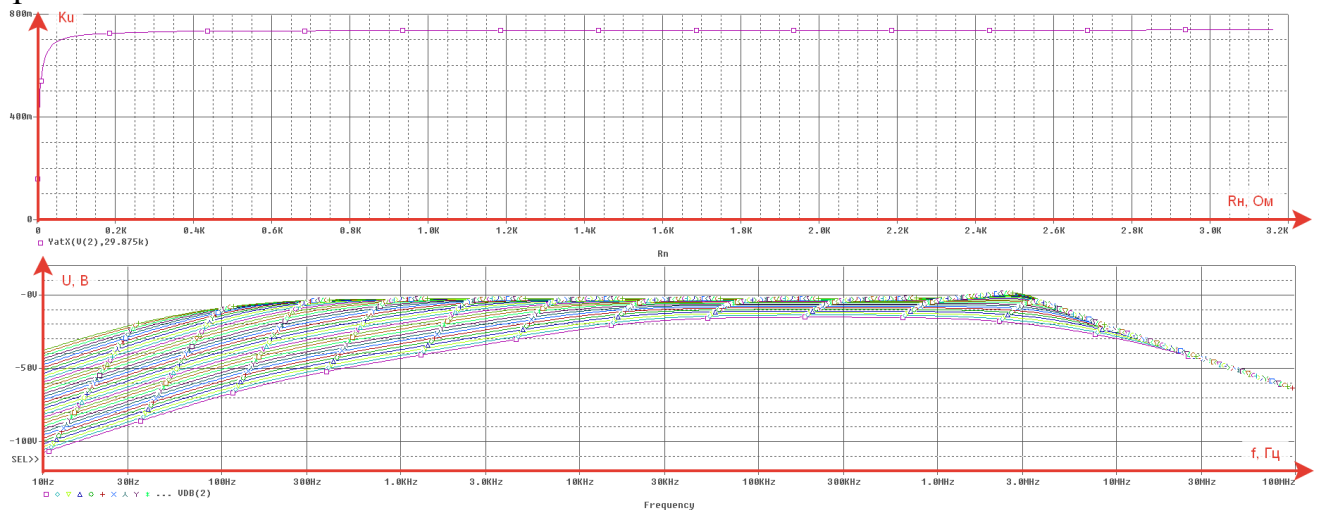


Рис.22. Семейство АЧХ и нагрузочная характеристика усилителя



По полученным на графике точкам (рис. 23) проведем расчет  $R_{вых}$ :

$$R_{вых} = \frac{R_{H1}R_{H2}(K_{u2} - K_{u1})}{K_{u2}R_{H2} - K_{u1}R_{H1}} = \frac{60,193 * 3,6964 * (700 * 10^{-3} - 350 * 10^{-3})}{700 * 10^{-3} * 60,193 - 350 * 10^{-3} * 3,6964} = 1,907(Ом)$$

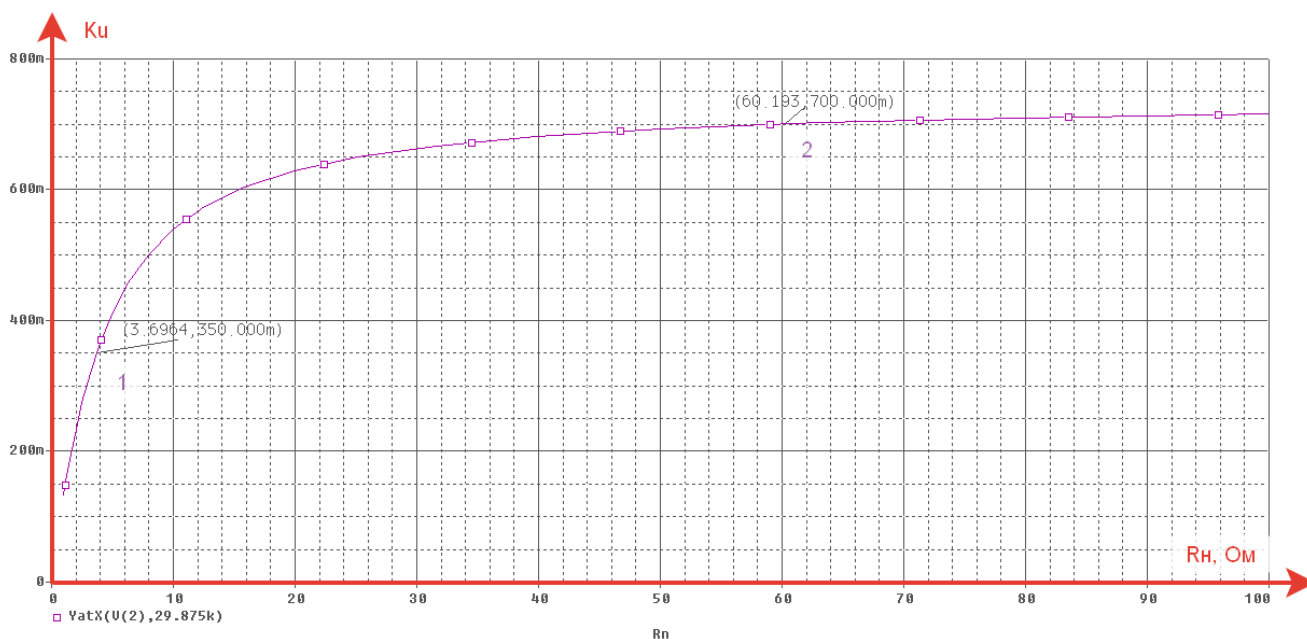


Рис.23. Нагрузочная характеристика усилителя

Результаты расчета представим в табл. 14.

Табл. 14. Значения входного и выходного сопротивлений

Параметр	Rвх	Rвых
Единицы измерения	Ом	Ом
Расчет в п. 2.13	3205	3,261
Расчет в пп. 4.2.3-4.2.4	4301	1,907

#### 4.5 Расчет амплитудной характеристики усилителя

На рис. 24 представлено семейство выходных напряжений, а также амплитудная характеристика.

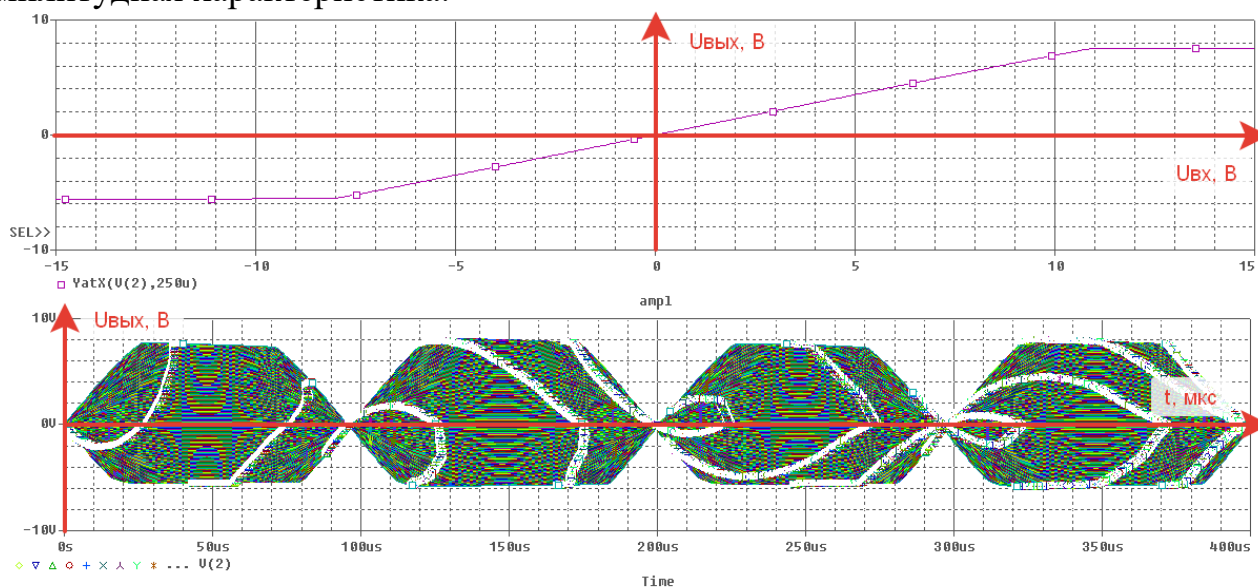


Рис.24. Амплитудная характеристика и осциллограммы выходных напряжений

На рис. 25 отмечены крайние точки линейного участка графика для определения коэффициента усиления и динамического диапазона.

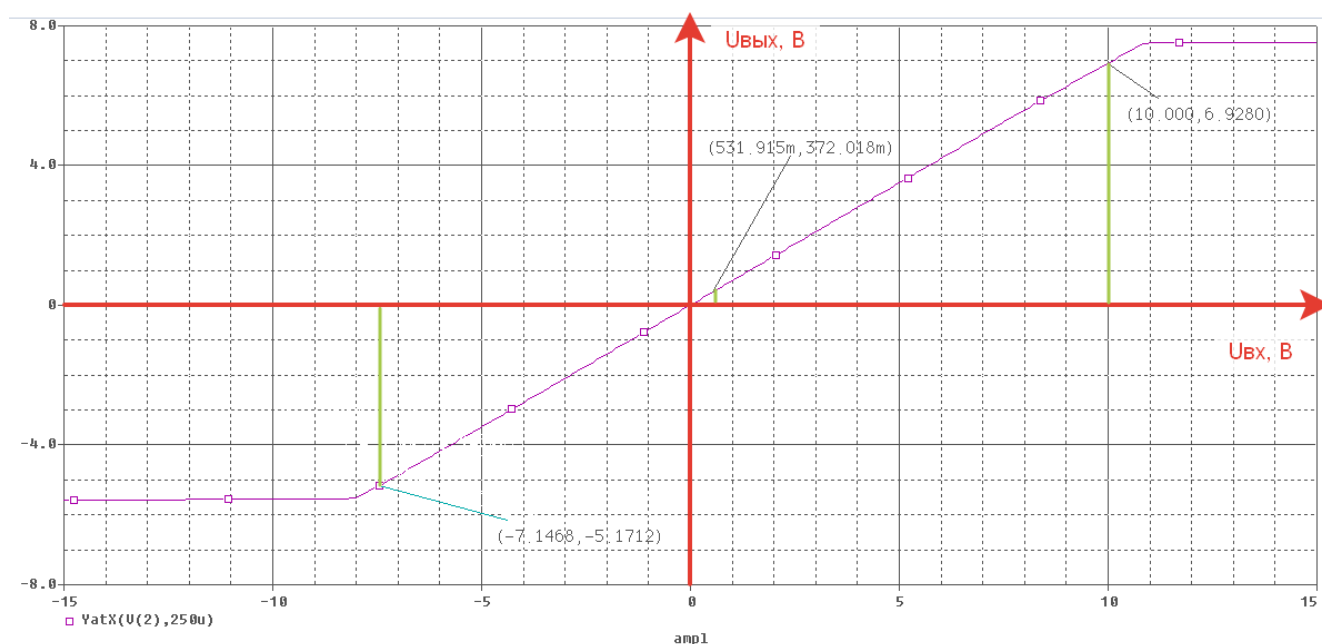


Рис.25. Амплитудная характеристика в увеличенном масштабе

Коэффициент усиления:  $K_{e0} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \left| \frac{0,372018 + 5,1712}{0,531915 + 7,1468} \right| = 0,7218$

Динамический диапазон входного сигнала  $\Delta U_{вх макс} = 7,1468(В)$

Результаты расчета коэффициента усиления и динамического диапазона напряжения представлены в табл. 15.

Табл. 15. Значения коэффициента усиления и динамического диапазона напряжения

Параметр	$K_{e0T3}$	$K_{e0}$	$\Delta U_{вх макс}, В$
Значение	0,7	0,7218	7,1468

#### 4.6 Осциллограмма выходного напряжения и спектр Фурье

Амплитуда генератора  $E_g = \frac{U_{н макс}}{K_{e0}} = \frac{5,4657}{0,7218} = 7,5723(В)$

Результаты Фурье-анализа представлены на рис. 26.

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	2.988E+04	1.640E+00	1.000E+00	1.752E+02	0.000E+00
2	5.975E+04	8.003E-01	4.879E-01	1.777E+02	-1.728E+02
3	8.963E+04	5.311E-01	3.238E-01	1.785E+02	-3.471E+02
4	1.195E+05	3.977E-01	2.425E-01	1.790E+02	-5.219E+02
5	1.494E+05	3.179E-01	1.938E-01	1.793E+02	-6.968E+02

Рис.26. Результаты Фурье-анализа

Формула для расчета коэффициента нелинейных искажений (КНИ):

$$K_H = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2}}{U_1}$$

Подставим в неё значения, полученные в результате Фурье-анализа:

$$K_H = \frac{\sqrt{0.8003^2 + 0.5311^2 + 0.3977^2 + 0.3179^2}}{1.64} = 0.66 \Rightarrow \text{Полученное КНИ} = 66\%$$

#### 4.7 Фурье-анализ с данными ТЗ

Далее проводим расчет, используя данные технического задания.

$$\text{Амплитуда генератора } E_{\mathcal{C}} = \frac{U_{нТЗ}}{K_{e0}} = \frac{2}{0,7} = 2,875(B)$$

Полученная осциллограмма выходного напряжения представлена на рис. 27.

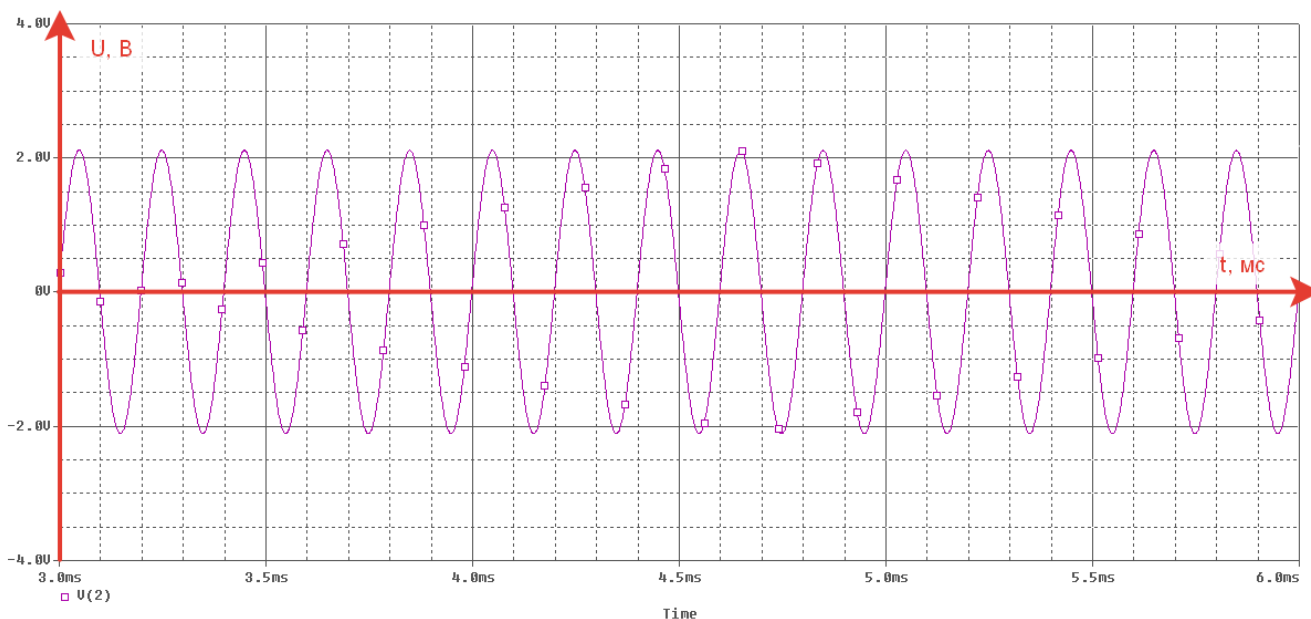


Рис.27. Осциллограмма выходного напряжения

Результатом преобразования синусоиды в спектр (преобразование Фурье) является одна гармоника, отраженная на рис. 28.

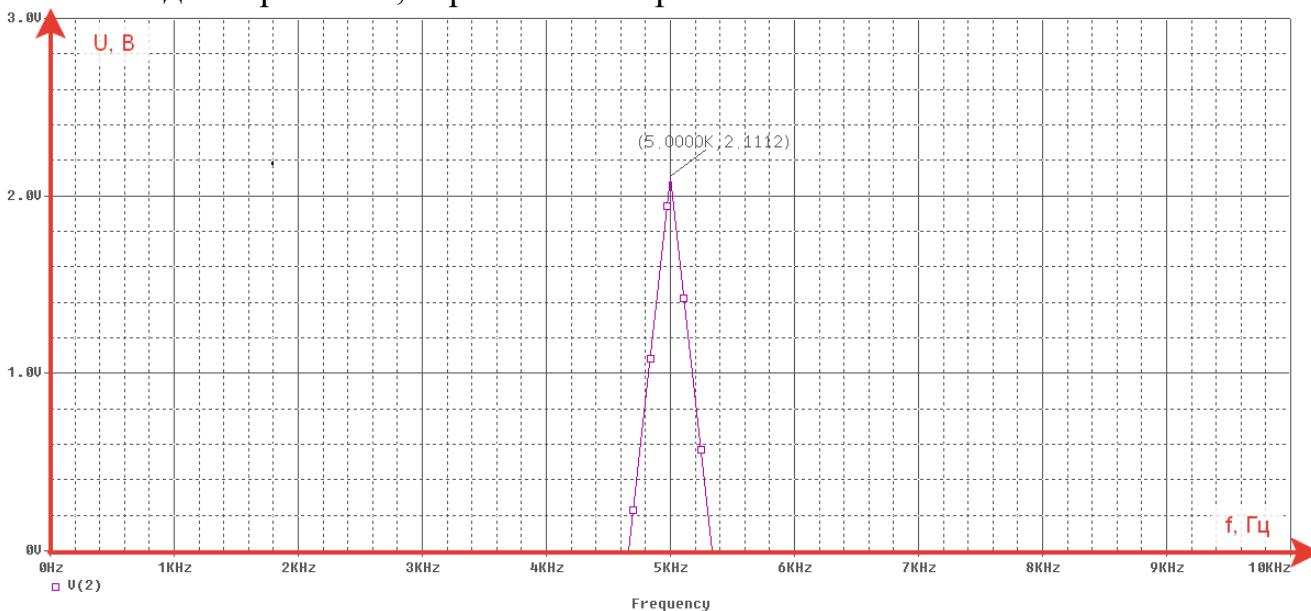


Рис.28. Полученный спектр

## 5. Заключение

В процессе выполнения курсовой работы была определена рабочая точка усилительного каскада с общим коллектором и на основе ее значений была синтезирована схема. Далее была проведена обратная задача – из рассчитанных ранее сопротивлений были получены значения рабочей точки. При всех вычислениях удалось добиться сохранения значения коэффициента усиления в соответствии с данными технического задания. Остальные значения (граничные частоты, выходное напряжение, ток нагрузки и допустимая мощность) также не были превышены.

Результаты расчетов удобно представить в виде итоговых сравнительных таблиц.

Табл. 16. Расчет режима схемы по постоянному току

	Расчет	Моделирование на ЭВМ
$I_K$ , мА	17,65	17,55
$U_{KЭ}$ , В	7,99	8,04
$I_6$ , мкА	35,38	35,55

Табл. 17. Основные параметры каскада

	Техническое задание	Расчет	Моделирование на ЭВМ
$K_u$	0,7	0,7333	0,72
$R_{вх}$ , кОм		3,205	4,301
$R_{вых}$ , Ом		3,261	1,907
$f_v$ , Гц	40 000	3 430 000	4 152 200
$f_n$ , Гц	400		267,465
$U_{вых макс}$ , В	2		5,4657
КНИ, %			66

## **6. Список использованной литературы**

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем, издание 3-е. - М.: Энергия, 1973.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Сов. Радио, 1980.
3. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для ВУЗов. / 2-ое изд. -М.: Лаборатория Базовых Знаний. 2001. -488с.
4. Ткаченко Ф.А. Техническая электроника. – М.: Дизайн ПРО, 2002. – 368с. (УДК 621.38; Т484)
5. Электротехника и электроника. Учебник для вузов.- В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/ Г.П.Гаев, В.Г.Герасимов, О.М.Князьков и др.; Под ред. проф. В.Г.Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. (УДК 621.3; Э45)
6. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. –768с.: ил. (О-60 УДК 621.396.6)
7. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства: учебник для вузов. 2-е изд.-М.: Радио и связь. 1983.
8. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справочник. / под ред. Б.Л. Перельмана. -М.: Радио и связь. 1981.
9. Кобяк А.Т., Новикова Н.Р., Паротькин В.И., Титов А.А. Применение системы Design Lab 8.0 в курсах ТОЭ и электроники: Метод. пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2001. –128с. (УДК 621.3 П–764).
10. Кобяк А.Т., Батенина А.П., Лагутина С.В. Применение программы схемотехнического моделирования Design Lab 8.0 в курсе электроники: Метод. Пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2014. –36с. (УДК 621.3).
11. ГОСТ 2.743-88 «Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники». -Госстандарт СССР.
12. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. /Под ред. Романычевой З.Т. - М.: Радио и связь. -1989.

## 7. Приложение

### Номинальный ряд

Ряд	Номиналы											
Е6 20%	10				15				22			
	33				47				68			
Е12 10%	10		12		15		18		22		27	
	33		39		47		56		68		82	
Е24 5%	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91

Еп = (6, 7.5, 9, 10, 12, 15, 18, 20, 24, 27, 36, 40) В