

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника (РЛ)»

Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства (РЛ1)»

Домашнее задание №1

по дисциплине «Схемотехника»

Вариант № 9

Выполнил ст. группы РЛ6-51

Филимонов С. В.

Преподаватель Русов Ю.С.

Москва, 2022

Цель задания – разработать схему усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером.

Исходные данные ($N = 9$):

Источник сигнала $V_1 = 1$ [В].

Источник питания $E = V_2 = 100$ [В].

Сопротивление источника питания $R_c = 100 + 20 \cdot N = 280$ [Ом].

Амплитуда выходного напряжения $U_{ВЫХ} = 10 + 2 \cdot N = 28$ [В].

Сопротивление нагрузки $R_H = 300 + 30 \cdot N = 600 = 590$ [Ом].

Нижняя граница частоты $f_H = 0,5 + 0,2 \cdot N = 2,3$ [Гц].

Верхняя граница частоты $f_B \geq 200$ [кГц].

Содержание и структура отчёта:

1. Рассчитать элементы схемы.
2. Анализ по постоянному току (проверка рабочей точки).
3. Построить АЧХ и ФЧХ, определить граничные частоты по уровню 3 [дБ].
4. Построить осциллограмму входного и выходного сигналов на частоте 1 [кГц].
Определить коэффициент гармоник и коэффициент усиления.
5. Построить осциллограмму входного и выходного сигнала и измерить коэффициент гармоник для крайних частот при том же уровне входного сигнала.
6. Построить зависимость коэффициента гармоник от уровня выходного на частоте 1 [кГц].
7. Построить спектр выходного сигнала.

Расчетная часть

1) Выбор положения рабочей точки транзистора.

Напряжение в рабочей точке транзистора:

$$U_0 = U_{min} + U_{вых} + \Delta U_{кэ}, \text{ где}$$

$$U_{min} = 1 \text{ [В]} - \text{минимальное напряжение на транзисторе.}$$

$$U_{вых} = 28 \text{ [В]} - \text{напряжение на выходе каскада.}$$

$$\Delta U_{кэ} = 2 \text{ [В]} - \text{допустимая нестабильность напряжения в рабочей точке.}$$

$$\text{Тогда } U_0 = 1 + 28 + 2 = 31 \text{ [В]}.$$

Величина сопротивления резистора в цепи коллектора:

$$R_K = \frac{E - U_{э} - U_0 - U_{вых}}{I_{min} + \frac{U_{вых}}{R_H}}$$

В этом выражении $I_{min} = 1 \text{ [мА]}$.

$U_{э} = (0,1 - 0,2) E = 20 \text{ [В]}$ – падение напряжения на эмиттерном сопротивлении.

$$R_K = \frac{100 - 20 - 31 - 28}{0,001 + \frac{28}{590}} = 433,368 \text{ [Ом]}$$

Ток в рабочей точке:

$$I_0 = I_{min} + \frac{U_{вых}}{R_K} + \frac{U_{вых}}{R_H} = 0,001 + \frac{28}{433,368} + \frac{28}{590} = 113,07 \text{ [мА]}$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторном переходе:

$$P_0 = I_0 U_0 = 0,113 * 31 = 3,506 \text{ [Вт]}$$

2) Исходя из требуемых значений, учитывая соотношения,

$$I_{K \text{ доп}} > 0,113 \text{ [А]}$$

$$U_{э \text{ доп}} > 31 \text{ [В]}$$

$$P_{K \text{ доп}} > 3,51 \text{ [Вт]}$$

выбираем биполярный кремниевый транзистор BD135.

Характеристики транзистора:

Структура	n-p-n
Макс. напр. к-б при заданном обратном токе к и разомкнутой цепи э.(Uкбо макс),В	45
Макс. напр. к-э при заданном токе к и разомкнутой цепи б.(Uкэо макс),В	45
Максимально допустимый ток к (Iк макс.А)	1.5
Статический коэффициент передачи тока h21э мин	63...250
Граничная частота коэффициента передачи тока fгр.МГц	190
Максимальная рассеиваемая мощность ,Вт	8
Корпус	to-126
Вес, г	1.5

Рисунок 1 – Характеристики транзистора BD135.

3) Расчет элементов цепи смещения по постоянному току.

Величина сопротивления в цепи эмиттера:

$$R_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{I_0} = \frac{20}{0,113} = 176,885 \text{ [Ом]}$$

Ток коллектора $I_{\kappa} = I_{\text{Б}} h_{21\varepsilon}$. Можно сказать, что приближено $I_0 = I_{\kappa}$, $h_{21\varepsilon} = \beta$

Тогда

$$I_{\varepsilon} = \frac{I_0}{\beta} = \frac{0,113}{100} = 1,13 \text{ [мА]}$$

Верхний резистор базового делителя:

$$R_1 = \frac{ER_{\varepsilon}}{U_{\varepsilon} + U_{\text{бэ}} + R_{\varepsilon}I_{\varepsilon}} = \frac{100 * 1500}{20 + 0,7 + 1500 \cdot 0,0011} = 6,698 \text{ [кОм]}$$

Тут принято $U_{\text{бэ}} = 0,7 \text{ [В]}$, $R_{\text{Б}} = 1500 \text{ [Ом]}$

Нижний резистор базового делителя:

$$R_2 = \frac{R_1 R_{\text{Б}}}{R_1 - R_{\text{Б}}} = \frac{6,698 \cdot 1,5}{6,698 - 1,5} = 1,933 \text{ [кОм]}$$

Выберем резисторы из стандартного ряда и получаем:

$$R_{\varepsilon} = 177 \text{ [Ом]}, R_{\kappa} = 433 \text{ [Ом]}, R_1 = 6,7 \text{ [кОм]}, R_2 = 1,9 \text{ [кОм]}$$

4) Расчёт величин ёмкостей конденсаторов

Займёмся допустимой величиной фазовых сдвигов на нижней рабочей частоте (например, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\varphi_2 = 10^\circ$, $\varphi_3 = 25^\circ$) для каждого из конденсаторов из условия

$$\varphi_H = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = \arctg \sqrt{M_H^2 - 1} = 45^\circ (M_H = \sqrt{2})$$

$$h_{11э} = r_э + r_э(1 + \beta) = 50 + \frac{26}{1,13}(1 + 100) = 73,2 \text{ [Ом]}$$

$$R_{BX} = \frac{R_B \cdot h_{11э}}{(R_B + h_{11э})} = \frac{1500 \cdot 73,2}{(1500 + 73,2)} = 69,81 \text{ [Ом]}$$

Для нахождения ёмкостей C_1 , C_2 и C_3 воспользуемся соотношениями:

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi f_H (R_c + R_{BX}) \varphi_1} = \frac{57 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot (0,28 + 0,069) \cdot 10} = 1,12 \text{ [мФ]}$$

$$C_2 \geq \frac{1}{2\pi f_H (R_H + R_K) \varphi_2} = \frac{57 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot (0,59 + 0,433) \cdot 10} = 385 \text{ [мкФ]}$$

$$C_3 \geq \frac{1 + \beta}{2\pi f_H (R_c || R_B + h_{11э}) \varphi_3} = \frac{(1 + 100) \cdot 5757 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,3 \cdot \left(\frac{0,28 \cdot 1,5}{0,28 + 1,5} + 0,057 \right) \cdot 25} =$$

$$= 51,5 \text{ [мФ]}$$

Выберем конденсаторы из стандартного ряда и получаем:

$$C_1 = 1 \text{ [мФ]}, C_2 = 385 \text{ [мкФ]}, C_3 = 51 \text{ [мФ]}$$

Практическая часть

1) Соберём схему с рассчитанными элементами в программе Multisim.

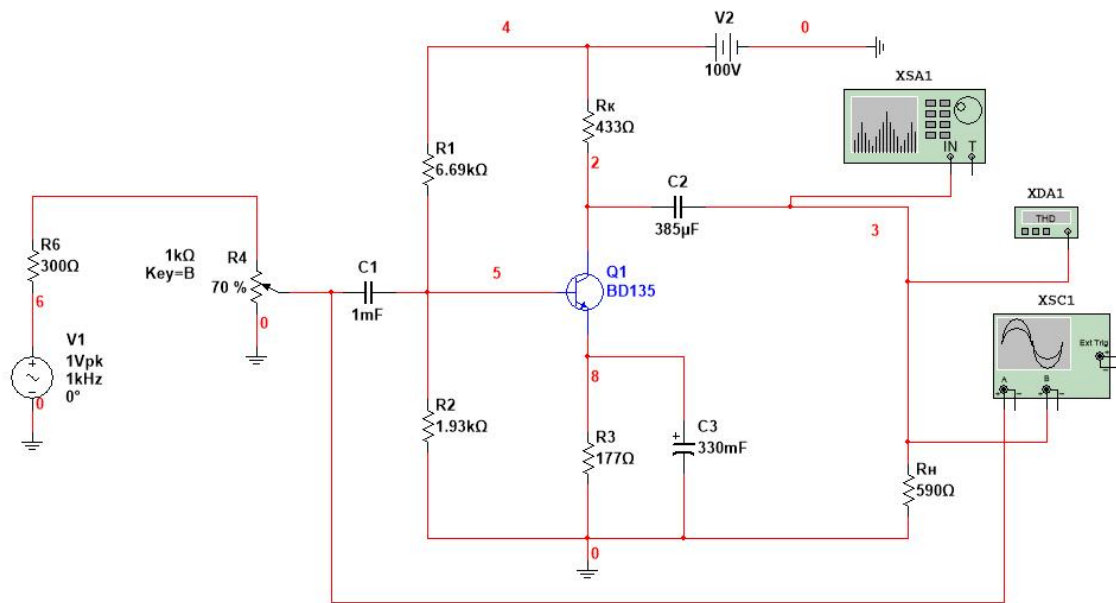


Рисунок 2 – Схема усилительного каскада с общим эмиттером.

2) Проведём анализ по постоянному току и проверим рабочую точку с полученными значениями.

Д31_Филимонов_С_РЛ6-51 DC Operating Point Analysis

	Variable	Operating point value
1	V(2)	50.61745
2	V(5)	21.08762
3	V(8)	20.34028
4	I(R3)	114.91681 m
5	I(RK)	114.04746 m

Рисунок 3 – Анализ каскада по постоянному току.

$V(2) - V(8) = 50,61 - 20,34 = 30,27 \text{ [В]}$. U_0 в расчетах было взято 31 [В], значит мы приблизительно верно провели расчеты рабочей точки.

Ток $I(R_3)$ приблизительно соответствует току коллектора (или $I_0 = 113 \text{ [мА]}$). Следовательно, напряжение $U_э = I(R_3) * R_3 = 0,113 * 177 = 20,01 \text{ [В]}$ примерно равно $U_э = 20 \text{ [В]}$, значит мы приблизительно верно провели расчеты рабочей точки.

3) Построим амплитудно-частотную характеристику на области частот.

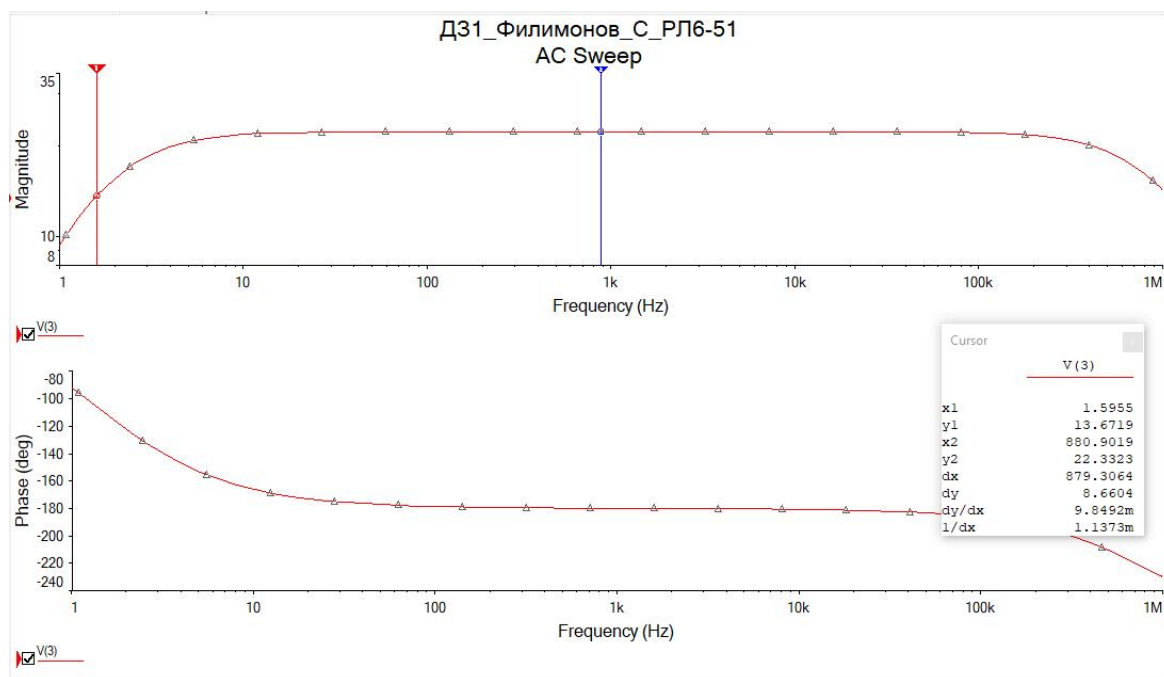


Рисунок 5 – АЧХ и ФЧХ.

Видим, что условие предела максимальных потерь в 3 [дБ] не выполняется (потери составляют 8,66 [дБ]). Поэтому следует добиться потерь в 3 [дБ], увеличивая ёмкость конденсатора $C_{\text{с}}$. При $C_{\text{с}} = 330[\text{мФ}]$ потери будут составлять 2,93 [дБ].

АЧХ имеет вид:

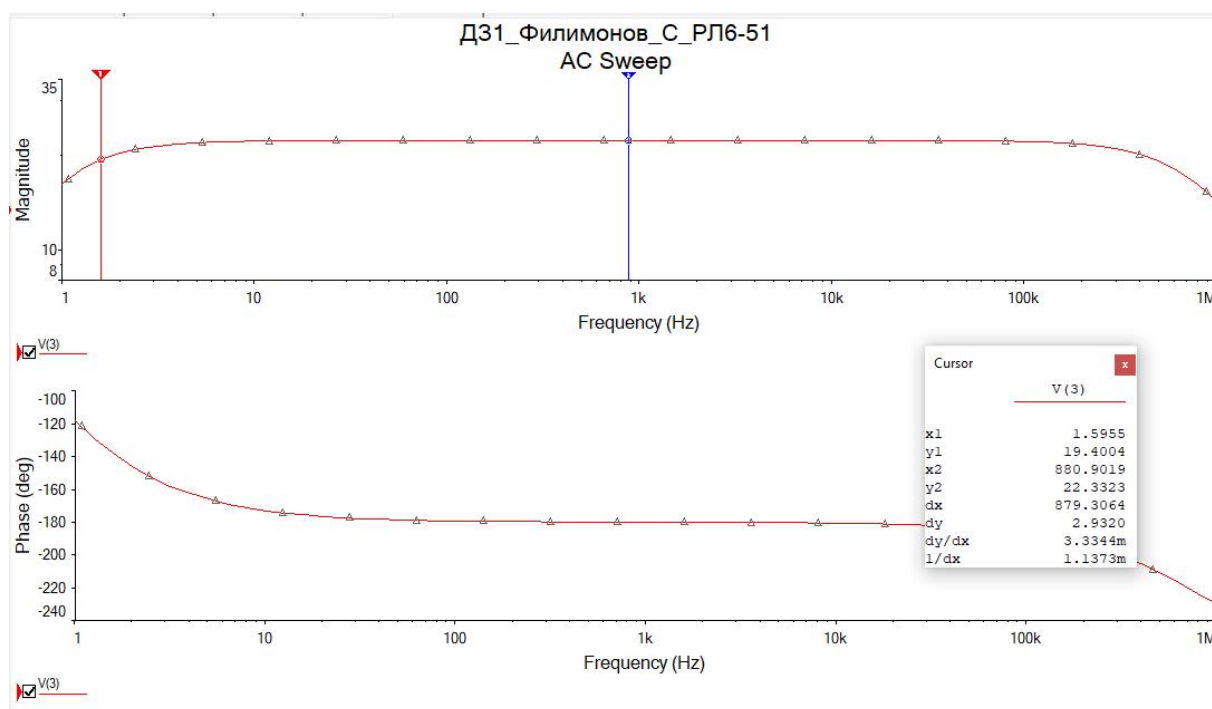


Рисунок 6 – Откорректированная АЧХ.

Частота в области верхних частот, в которой достигается уровень потерь 3 [дБ] равна

$$f_B = 639 \text{ [кГц]}$$

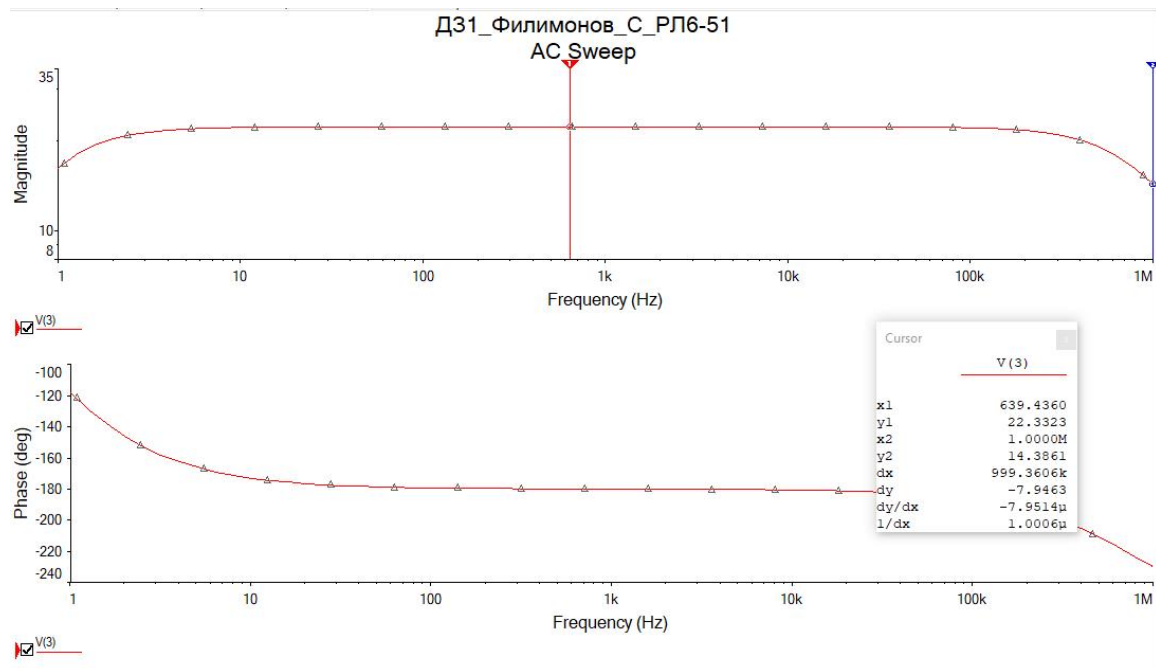


Рисунок 7 – АЧХ в области верхних частот.

4) По переменному току изобразим осциллограмму на средней частоте 1 [кГц].



Рисунок 8 – Осциллограмма входного и выходного сигнала.

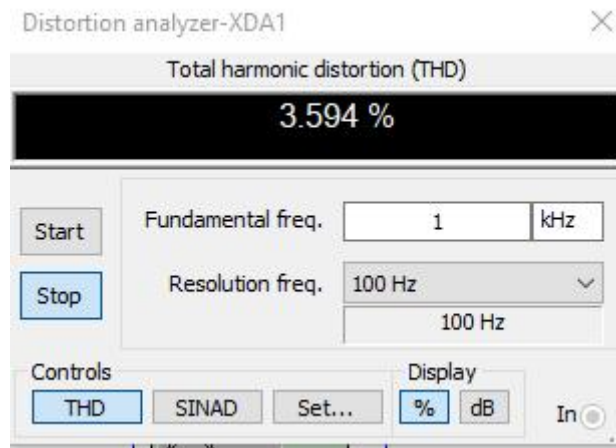


Рисунок 9 – Коэффициент гармоник.

Присутствуют допустимые искажения $3,594 \% < 10\%$. Channel_B показывает выходной сигнал, амплитуда которого $26,026 \text{ [В]}$. По условию $U_{\text{ВЫХ}} = 28 \text{ [В]}$. Полученный выходной сигнал отдалено соответствует заданному.

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{A_{\text{maxВЫХ}}}{A_{\text{maxВХ}}} = \frac{26,026}{0,049} = 531,1$$

5) Осциллограммы выходного и выходного сигнала для крайних частот

Для частоты $2,3 \text{ [Гц]}$:

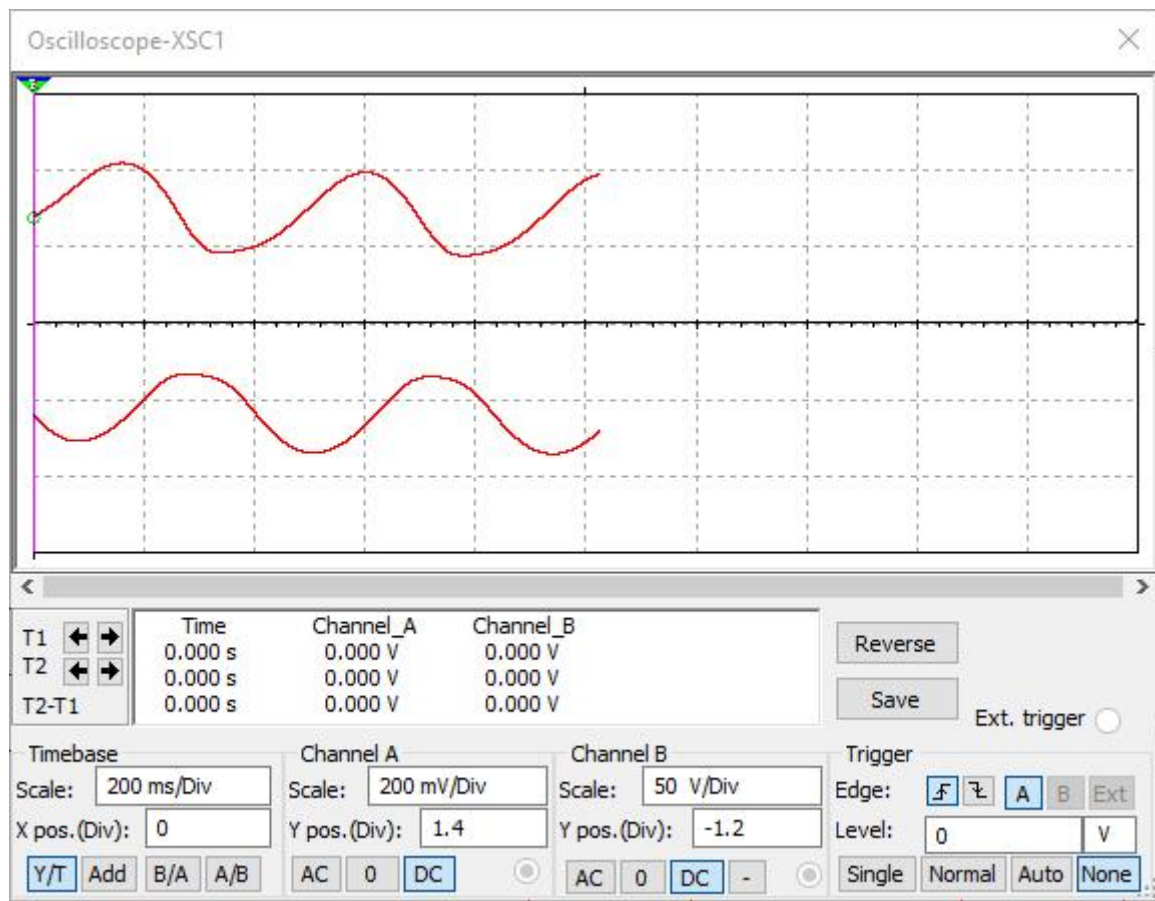


Рисунок 10 – Осциллограмма входного и выходного сигнала.

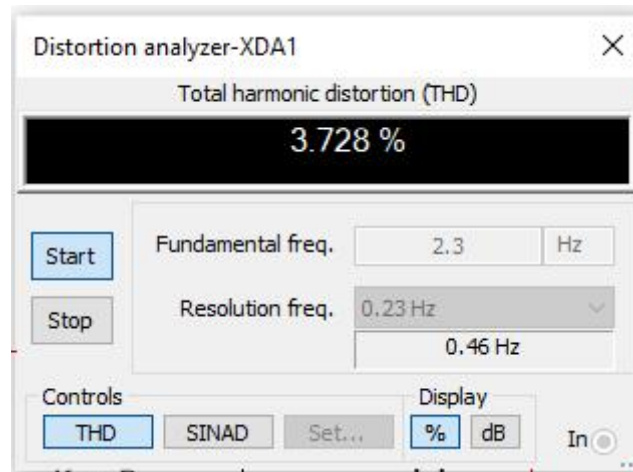


Рисунок 11 – Коэффициент гармоник.

Для частоты 639 [кГц]:

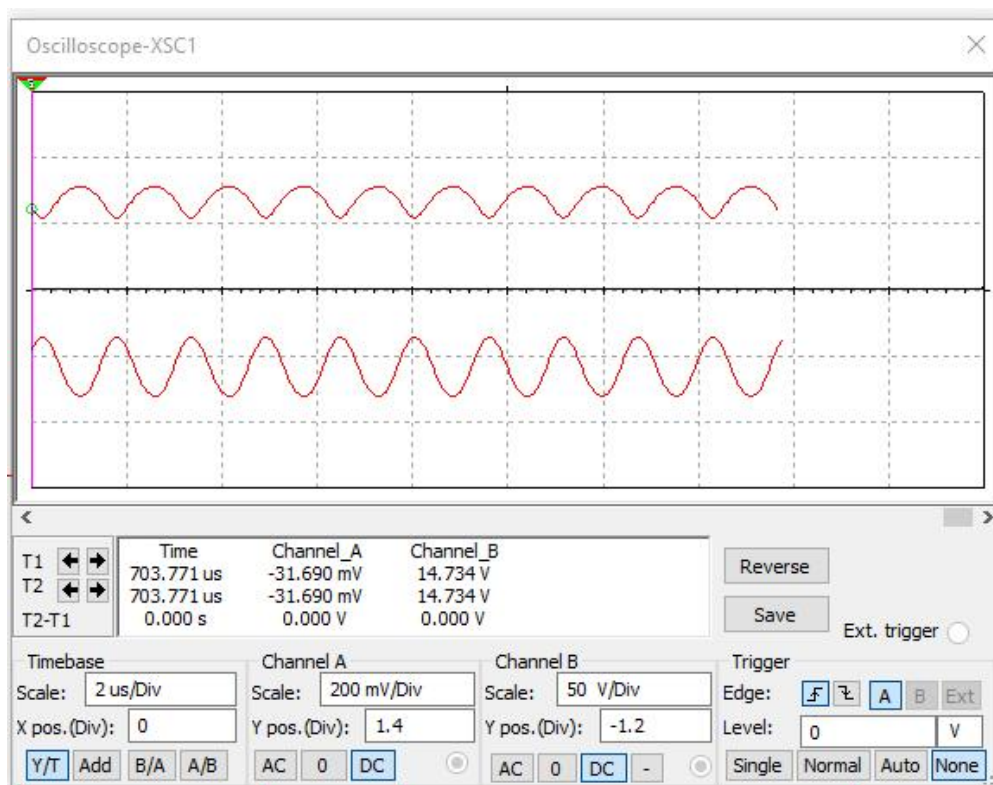


Рисунок 12 – Осциллограмма входного и выходного сигнала.

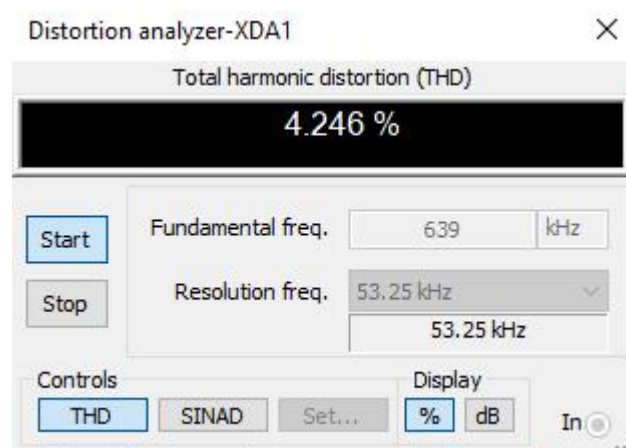


Рисунок 13 – Коэффициент гармоник.

б) Для частоты 1 [кГц] построим график зависимости коэффициента гармоник от уровня $U_{\text{ВЫХ}}$.

Увеличивая сопротивление потенциометра коэффициент гармоник уменьшается.

Измеренные данные:

$U_{\text{ВЫХ}}$ [В]	26,8	26,7	26,65	26,618	26,615	26,56	26,49	26,41	26,31	26,2	26,06
THD %	3,49	3,17	2,9	2,67	2,48	2,34	2,23	2,15	2,09	2,06	2,03

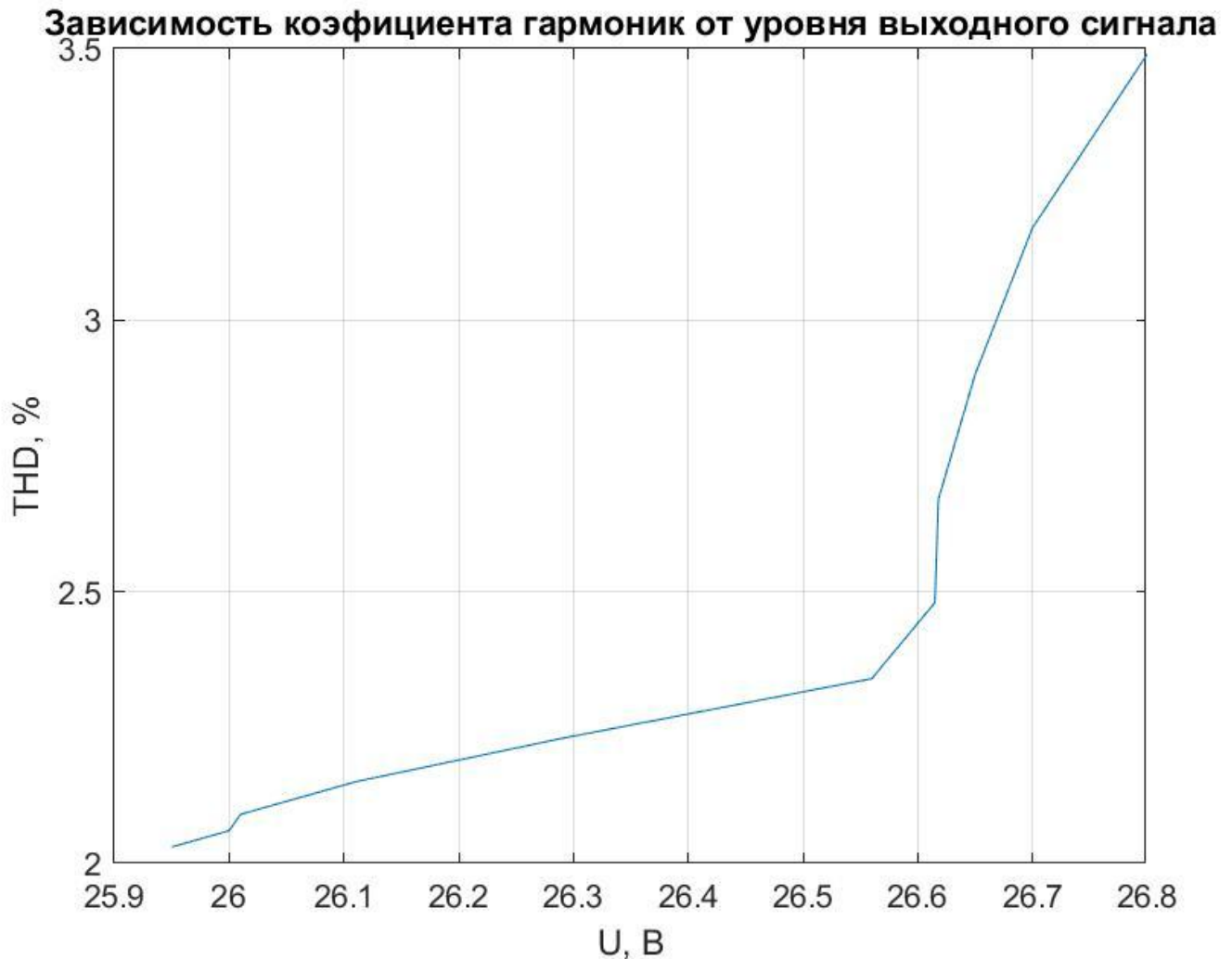


Рисунок 14 – График зависимости коэффициента гармоник от уровня $U_{\text{ВЫХ}}$.

Из данных полученной графической зависимости можно сделать вывод о том, что коэффициент гармоник увеличивается с увеличением уровня выходного сигнала.

7) Спектр выходного сигнала на частоте 1 [кГц].

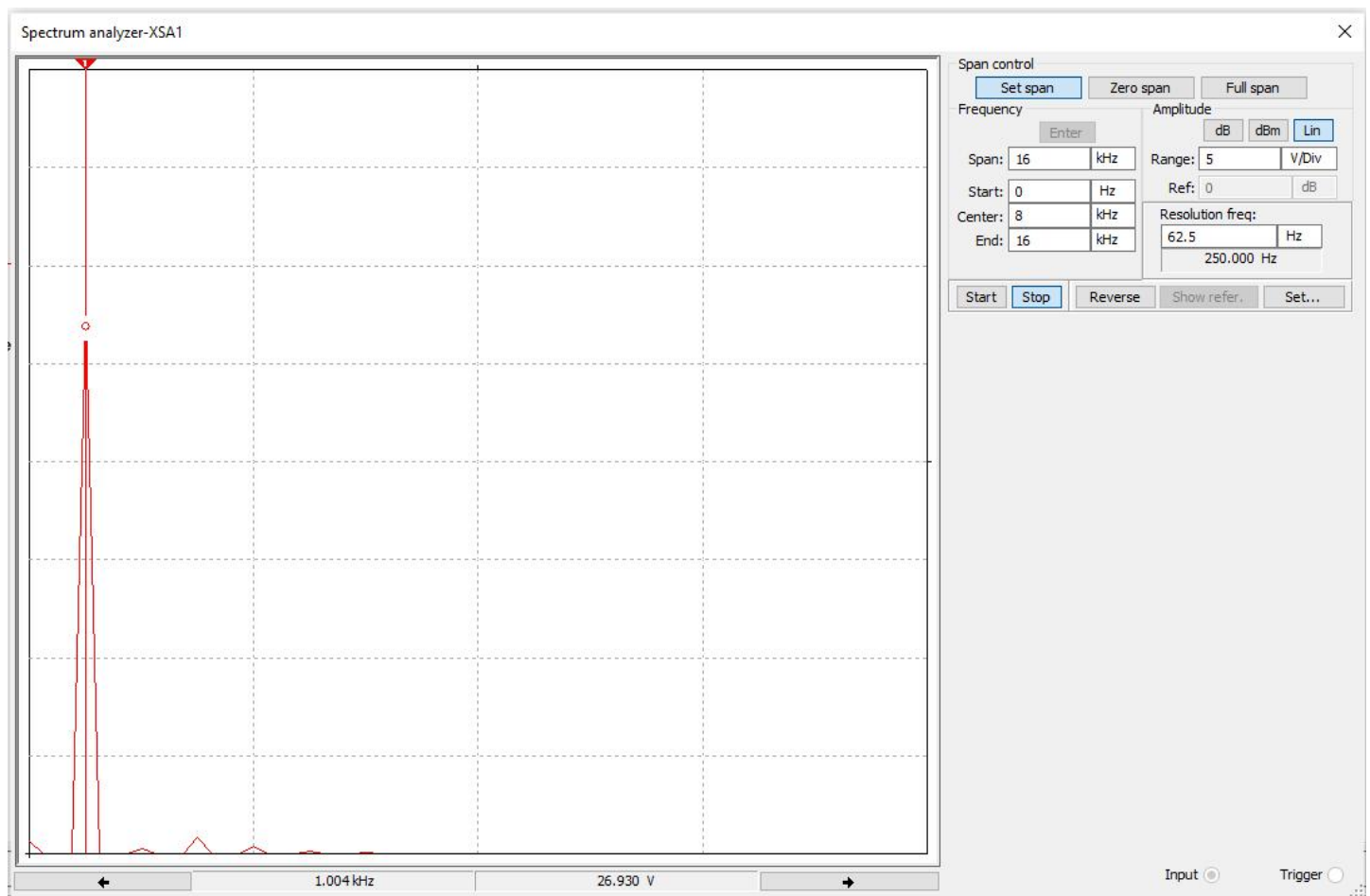


Рисунок 15 – Спектр выходного сигнала.

Помимо основной гармоники на частоте 1 [кГц] можем наблюдать и другие гармоники на больших частотах.

Вывод:

Мною был разработан схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером.