

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ЁМКОСТНОЙ СВЯЗЬЮ

Цель работы

Исследование усилительного RC-каскада на биполярном транзисторе с эмиттерной стабилизацией.

Теоретические сведения и расчетные формулы

Усилителем называют устройство, предназначенное для повышения мощности выходного сигнала за счет использования энергии источника питания. Последний задает рабочий режим транзистора усилителя (рабочая точка или РТ) и, следовательно, его эквивалентные усилительные параметры, прежде всего дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода:

$$r_{\varepsilon} = \frac{\varphi_T}{I_{\varepsilon}} = \frac{25}{I_{\varepsilon}}, \text{ Ом} \quad , \text{ где } I_{\varepsilon} - \text{ток эмиттера, мА.}$$

Структурная схема усилителя представлена на рисунке 27.

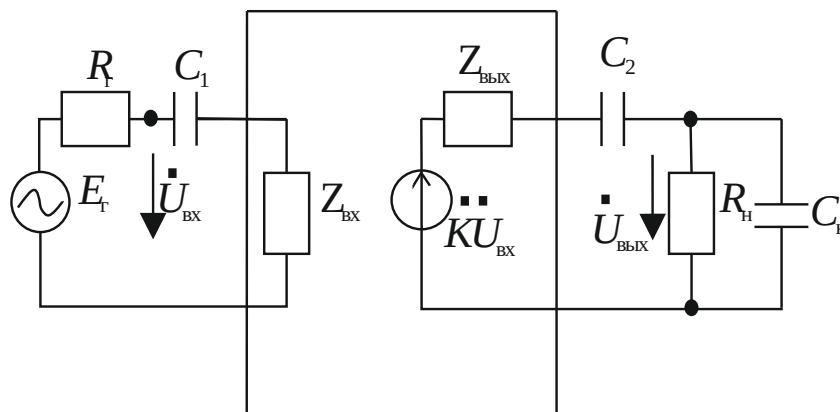


Рисунок 27: Упрощенная схема усилителя с емкостной
связью

В случае усилителя с емкостной связью передачу сигнала от генератора ко входу, а также с выхода на нагрузку осуществляют через конденсаторы связи C1 и C2, величину которых выбирают такой, чтобы их сопротивление для сигнала было мало.

Наиболее общей характеристикой усилителя является передаточная функция, которая при синусоидальном входном сигнале определяется соотношением:

$K(j\omega) = \dot{U}_{\text{вых}} / \dot{E}_\Gamma = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$, где \dot{E}_Γ , $\dot{U}_{\text{вых}}$ - комплексные амплитуды напряжений источника сигнала и выхода нагруженного усилителя; $K(\omega)$, $\varphi(\omega)$ - модуль и аргумент передаточной функции - амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики усилителя (АЧХ и ФЧХ).

Реальные усилители проектируются так, чтобы в некоторой области частот, называемой средними частотами, влиянием разделительных конденсаторов, зависимостью $Z_{\text{вх}}$, $Z_{\text{вых}}$, $Z_{\text{н}}$ от частоты и инерционностью активных элементов можно было пренебречь.

Области, лежащие ниже и выше средних частот, называют соответственно областями нижних и верхних частот.

Для коэффициента усиления по напряжению в области средних частот справедливо выражение (схема ОЭ - инвертор напряжения):

$$K_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{E_\Gamma} \approx - \frac{\beta(R_\Gamma \parallel R_{\text{н}})}{R_\Gamma + R_{\text{вх}}}.$$

Считая $Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}}$, $Z_{\text{вых}} = R_{\text{вых}}$, $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}}$ можно получить выражение для $K(j\omega)$ в области нижних частот:

$K(j\omega) = U_{\text{вых}} / E_\Gamma = K_0 / (1 + 1/j\omega\tau_{\text{н1}})(1 + 1/j\omega\tau_{\text{н2}})$, где $\tau_{\text{н1}} = (R_\Gamma + R_{\text{вх}})C_1$ и $\tau_{\text{н2}} = (R_{\text{н}} + R_{\text{вых}})C_2$ — постоянные времени входной и выходной цепи в области нижних частот.

В теории усилителей показано, что результирующая постоянная времени в области нижних частот определяется как:

$$\frac{1}{\tau_{\text{н}}} = \frac{1}{\tau_{\text{н1}}} + \frac{1}{\tau_{\text{н2}}}.$$

Коэффициент передачи в области нижних частот тогда имеет вид:

$$K_n(j\omega) = K_0 / (1 + j\omega\tau_n) \quad .$$

Из этого выражения можно получить для АЧХ:

$$K_n(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_n)^2}} \quad .$$

В области верхних частот в общем случае необходимо учитывать инерционность активного элемента, комплексный характер $Z_{вх}$, $Z_{вых}$, Z_n , однако во многих практических случаях достаточно учесть комплексный характер Z_n . При этом выражение для коэффициента усиления будет иметь вид:

$$K_{\varepsilon}(j\omega) = K_0 / (1 + j\omega\tau_{\varepsilon}) \quad , \text{ где } \tau_{\varepsilon} = (R_n \parallel R_{вых})C_n.$$

Отсюда для области верхних частот имеем:

$$K_{\varepsilon}(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{\varepsilon})^2}} \quad , \quad \varphi_{\varepsilon}(\omega) = -\arctg(\omega\tau_{\varepsilon}).$$

На рисунке 28 представлен возможный вид АЧХ, где ω_n и ω_v - нижняя и верхняя граничные частоты. Они определяются как частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается в заданное число раз по сравнению с усилением на средних частотах. Наиболее часто граничные частоты определяются как частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз:

$$K_n = K_{\varepsilon} = \frac{K_0}{\sqrt{2}} \approx 0.7 K_0.$$

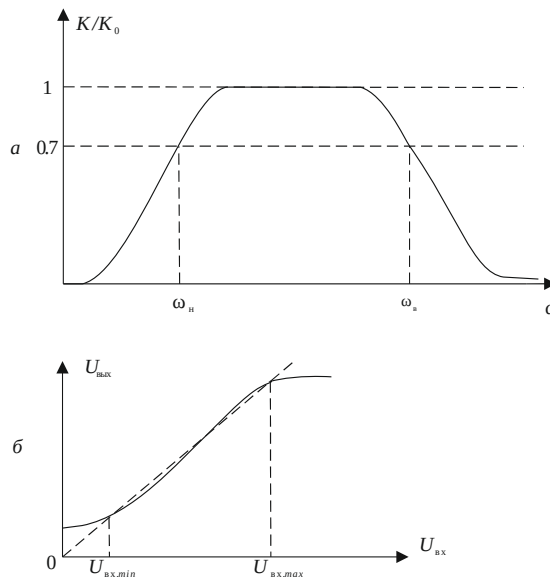


Рисунок 28: Амплитудно-частотная (а) и амплитудная (б) характеристики усилителя

Из выражений для ФЧХ и области верхних частот следует:

$$\omega_n = \frac{1}{\tau_n}, \omega_s = \frac{1}{\tau_s}$$

Одной из характеристик усилителей является амплитудная характеристика - зависимость выходного сигнала от входного:

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}) \quad .$$

Для идеального усилителя амплитудная характеристика должна быть линейной, но вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик активных элементов и наличия шумов возникают отклонения от линейного закона. На рисунке 28, б показан возможный вид амплитудной характеристики. Количественная оценка искажения сигнала, вызванная нелинейностью амплитудной характеристики, производится с помощью коэффициента нелинейных искажений или коэффициента гармоник:

$$K_G = (P_2 + P_3 + \dots + P_n) / P_1 = \sqrt{(U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2) / U_{1m}^2} = \sqrt{(I_{2m}^2 + I_{3m}^2 + \dots + I_{nm}^2) / I_{1m}^2} \quad , \text{ где } P_i, I_{im}, U_{im} \text{ - соответственно мощность, амплитуда токов и напряжений } i\text{-ой гармоника выходного сигнала.}$$

В каждом конкретном случае допустима определенная величина нелинейных искажений, оцениваемая $K_{\text{доп}}$. Этой величине соответствуют максимально и минимально допустимые величины входного сигнала: $E_{\Gamma\text{max}}$, $E_{\Gamma\text{min}}$. Отношение максимально допустимой величины входного сигнала к минимально допустимой определяет динамический диапазон усилителя: $D=20\lg(E_{\Gamma\text{max}}/E_{\Gamma\text{min}})$.

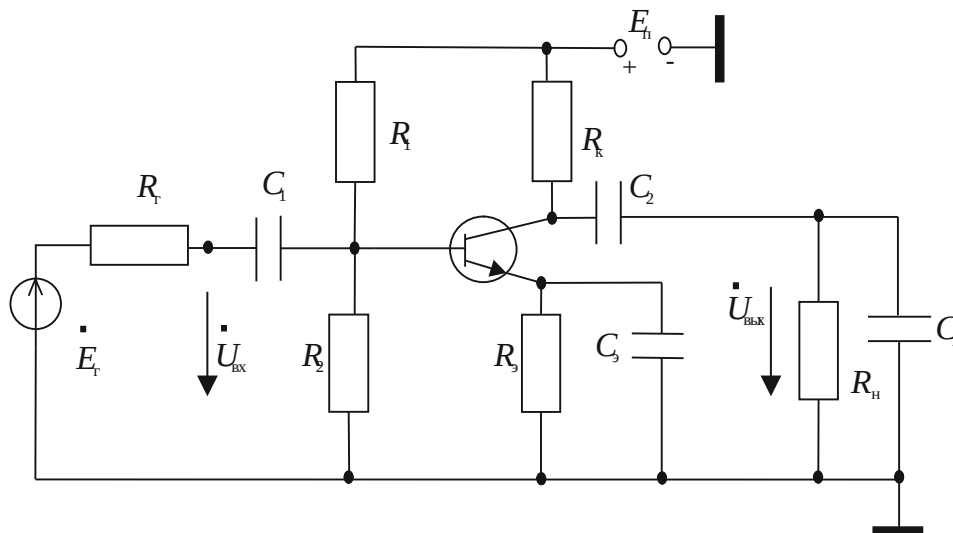


Рисунок 29: Принципиальная схема усилителя на биполярном транзисторе с ОЭ и эмиттерной стабилизацией

На рисунке 29 приведена принципиальная электрическая схема резистивно-емкостного усилительного каскада, исследуемого в данной лабораторной работе. Здесь резисторы R_1 , R_2 , R_3 образуют схему эмиттерной стабилизации рабочей точки, конденсатор C_3 уменьшает отрицательную обратную связь по току в рабочем диапазоне частот.

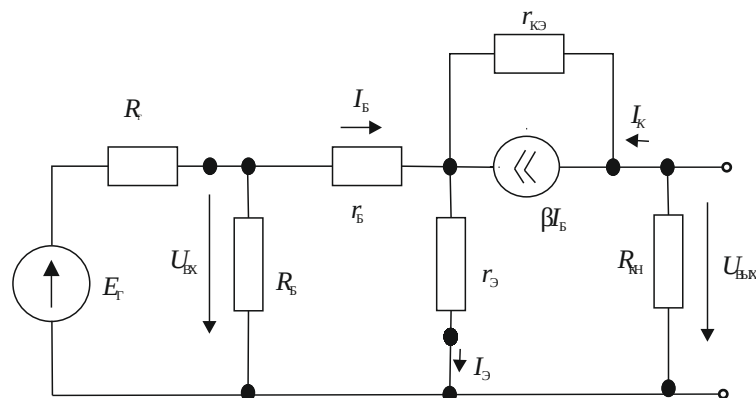


Рисунок 30: Эквивалентная схема усилителя в области средних частот

Соответствующая данной принципиальной схеме усилителя эквивалентная схема в области средних частот приведена на рисунке 30. На схеме транзистор представлен в виде Т-образной эквивалентной схемы. В этом случае входное сопротивление транзистора, определяется как $r_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{б}} = r_{\text{б}} + r_{\text{э}}(1+\beta) \approx \beta r_{\text{э}}$, где $\beta = I_{\text{к}}/I_{\text{б}}$ - коэффициент усиления базового тока в схеме ОЭ, поэтому для входного сопротивления каскада получим:

$$R_{\text{вх}} \approx R_{\text{Б}} \parallel \beta r_{\text{э}}, \text{ где } R_{\text{Б}} = R_1 \parallel R_2.$$

Для коэффициента усиления по напряжению в области средних частот (при $r_{\text{кэ}} \gg R_{\text{кн}}, R_{\text{кн}} = R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}$) имеем:

$$K_o = \frac{U_{\text{вых}}}{E_z} = \frac{-\beta I_{\text{б}} R_{\text{кн}}}{I_{\text{вх}}(R_z + R_{\text{вх}})} = \frac{-\beta R_{\text{кн}}}{(1+r_{\text{вх}}/R_{\text{Б}})(R_z + R_{\text{вх}})}.$$

Выходное сопротивление, как следует из рисунка 30, должно зависеть от величины $r_{\text{кэ}}$. Поэтому найдем значение $R_{\text{вых}}$ обычным путем, задавая некоторый ток $I_{\text{вых}}$ при отключенной нагрузке $R_{\text{н}}$ и $E_{\text{Г}} = 0$. Эквивалентная схема, соответствующая этому случаю, приведена на рисунке 31. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, обусловленное током $I_{\text{вых}}$, будет равно:

$$U_{\text{вых}} = (I_{\text{вых}} + \beta I_{\text{б}}) r_{\text{кэ}} + I_{\text{б}}(r_{\text{б}} + R_{\text{Б}} \parallel R_z).$$

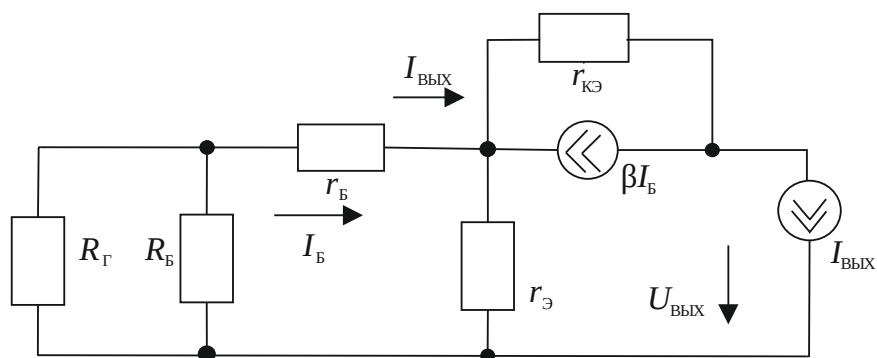


Рисунок 31: Эквивалентная схема усилителя для определения выходного сопротивления

В свою очередь ток базы $I_{\text{б}}$ будет определяться выражением

$$I_{\text{б}} = I_{\text{вых}}(r_{\text{э}} / (r_{\text{э}} + r_{\text{б}} + R_{\text{Б}} \parallel R_z)).$$

Подставляя выражение для тока базы в выражение для выходного напряжения:

$$r_{\text{блх}} = \frac{U_{\text{блх}}}{I_{\text{блх}}} = r_{\text{кз}}(1 + \beta \gamma_3) + r_3 \parallel (r_6 + R_B \parallel R_2) \approx r_{\text{кз}}(1 + \beta \gamma_3) \quad , \text{ где } \gamma_3 = r_3 / (r_3 + r_6 + R_B \parallel R_2).$$

Общее выходное сопротивление с учетом сопротивления в цепи коллектора R_K имеет вид:

$$R_{\text{блх}} = r_{\text{блх}} \parallel R_K$$

Учебные задания и методические указания к их выполнению

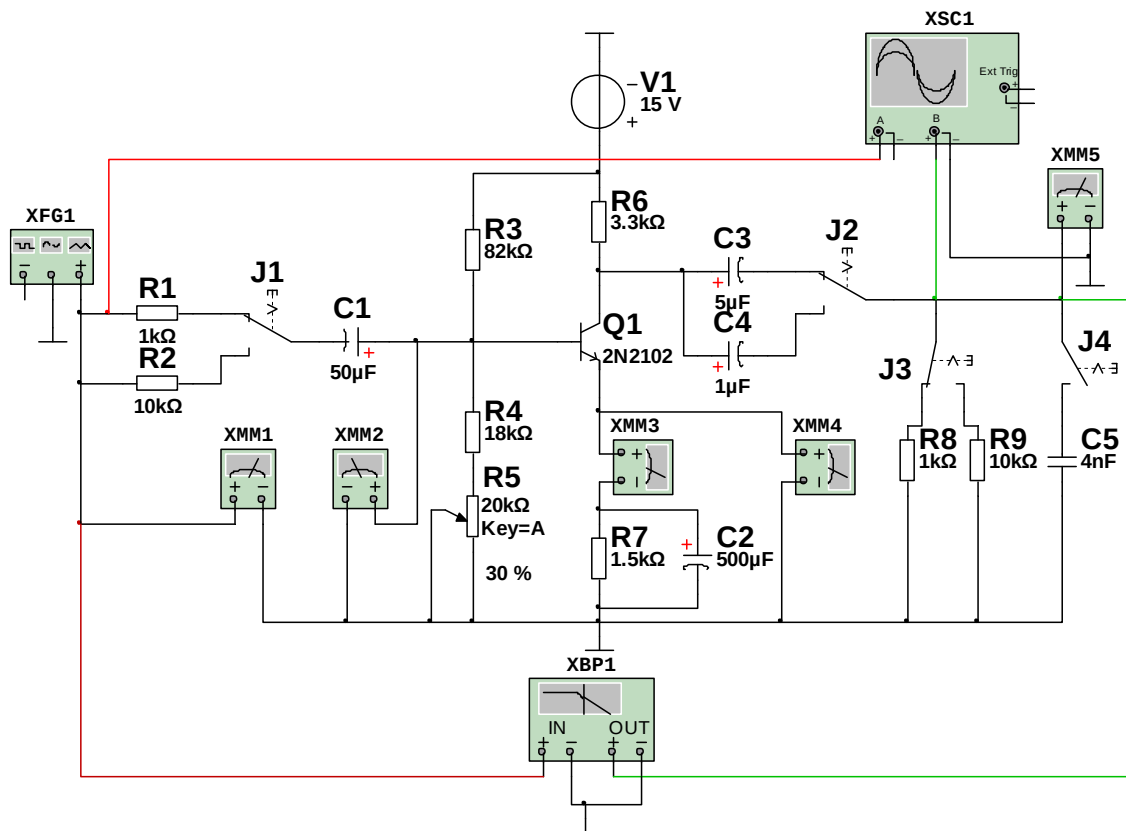


Рисунок 32

Назначение элементов схемы

- XFG-1 функциональный генератор;
- резисторы R_1 и R_2 задают выходное сопротивление генератора и дают возможность определить входное сопротивление усилителя ($r_{\text{вх}}$);

- ёмкости C_1, C_3 и C_4 – разделительные ёмкости, которые не пропускают постоянную составляющую от генератора на вход и нагрузку усилителя;
- резисторы R_3, R_4 и R_6 – задают начальный режим транзистора по постоянному току;
- резистор $R_5 = R_k$ – задает коэффициент усиления усилителя;
- резистор R_7 – осуществляет эмиттерную стабилизацию;
- ёмкость C_2 исключает ООС по переменному току;
- резисторы R_8, R_9 – активные сопротивления нагрузки каскада ($r_{вых}$);
- ёмкость C_5 – ёмкостная нагрузка усилителя;
- мультиметр ХММ1 – измеряет действующее значение генератора (e_T);
- мультиметр ХММ2 – изменяет постоянное (U_B) и переменное (U_{BX}) напряжение на базе транзистора;
- мультиметр ХММ3 – измеряет эмиттерный ток покоя ($I_E \sim I_K$);
- мультиметр ХММ4 – измеряет постоянное напряжение на эмиттере транзистора (U_E);
- мультиметр ХММ5 – измеряет выходное напряжения ($U_{вых}$);
- ключи $J_1 - J_4$ позволяют изменять номиналы элементов схемы;
- ХSC1 – двухканальный осциллограф;
- ХBP1 – плоттер Боде, позволяет исследовать амплитудно-частотную характеристику.

Задание 1 Определение режима каскада по постоянному току

Задать напряжение источника $V_1 E = 5 + \sqrt[4]{N}$ (в вольтах, округление до двух знаков после запятой), где N — номер по списку.

В нечетных вариантах использовать транзистор имеющий маркировку 2N2102.

В четных вариантах использовать транзистор имеющий маркировку 2N2218.

Установить мультиметры ХММ2 и ХММ4 в режим измерения постоянного напряжения, а мультиметр ХММ3 в режим постоянного тока.

Запустить моделирование и измерить значения I_K , U_B и U_{ε} . Рассчитать режим работы биполярного транзистора:

$$U_{B\varepsilon} = U_B - U_{\varepsilon},$$

$$U_{K\varepsilon} = E_{V1} - I_K R_6 - U_{\varepsilon}.$$

Снять и построить нагрузочную линию $I_K = f(E_{\Pi})$, где $E_{\Pi} = (E_{V1} - U_{\varepsilon})$. Для этого изменять величину сопротивления R_5 от 20% до 100% и измерять значения I_K и U_{ε} по мультиметрам ХММ3 и ХММ4.

На графике отметить рабочую точку транзистора (приблизительно середина графика) и с помощью R_5 выставить соответствующий ток I_K .

Задание 2 Исследование усилительного каскада с ёмкостной связью по переменному току

Установить на мультиметрах ХММ1, ХММ2 и ХММ5 режим измерения переменного напряжения.

Снять и построить амплитудную характеристику $U_{\text{вых}} = f(e_{\Gamma})$ для двух значений сопротивления нагрузки $R_H = R_8 = 1\text{КОм}$ и $R_H = R_9 = 10\text{КОм}$ при значениях $F_{\Gamma} = 1\text{КГц}$ и $R_{\Gamma} = R_1 = 1\text{КОм}$. Резисторы R_8 и R_9 переключаются ключом J_3 .

Таблица 11

Е _Г (амп.), мВ	2	5	10	15	20	30	50	80	100
е _Г (действ.), мВ									
U _{ВЫХ} (1КОм), мВ									
U _{ВЫХ} (10КОм), мВ									

На осциллографе ХSC1 отображаются входной и выходной сигналы.

Рассчитать коэффициент усиления каскада:

$$K_v = \frac{U_{\text{вых}}}{e_2} \text{ при } E_{\Gamma} = 10 \text{ мВ, } R_{\Gamma} = 1\text{КОм и } R_{\text{н}} = 10\text{КОм.}$$

Определить входное сопротивление усилителя ($r_{\text{вх}}$) при $R_{\Gamma} = R_1 = 1\text{КОм}$ и $E_{\Gamma} = 15\text{мВ}$:

$$r_{\text{вх}} = \frac{R_{\Gamma}}{\frac{e_{\Gamma}}{U_{\text{вх}}} - 1}, \quad U_{\text{вх}} - \text{напряжение на базе транзистора, на мультиметре}$$

ХММ2.

Определите выходное сопротивление усилителя при напряжении генератора равном $E_{\Gamma} = 10\text{мВ}$:

$$r_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}2} - U_{\text{ВЫХ}1}}{\frac{U_{\text{ВЫХ}1}}{R_8} - \frac{U_{\text{ВЫХ}2}}{R_9}}, \quad U_{\text{ВЫХ}1} \text{ при включенном } R_8, U_{\text{ВЫХ}2} \text{ при включенном } R_9.$$

Задание 3 Исследование частотных свойств усилителя

Исследуйте влияние значения величин элементов схемы на частотные свойства усилителя, т.е. $F_{\text{н}}$ -нижнюю и $F_{\text{в}}$ – верхнюю (на уровне -3дБ) граничную частоту, при $E_{\Gamma} = 10 \text{ мВ}$ и заполните таблицу 12.

Таблица 12

	J_2	R_{Γ}	R_H	$C_H=C_5$	F_H	F_B	K_V
1	5мкФ	1КОм	1КОм	-			
2	1мкФ	1КОм	1КОм	-			
3	5мкФ	10КОм	1КОм	-			
4	5мкФ	1КОм	10КОм	-			
5	5мкФ	1КОм	1КОм	4нФ			

где $J_2 - C_3$ или C_4 , $R_{\Gamma} - R_1$ или R_2 , $R_H - R_8$ или R_9 .

Откройте плоттер Боде (ХВР1). Выставьте величины указанные в таблице. Включите источник питания схемы. Определите коэффициент усиления K_V на частоте 1 КГц (рисунок 33).

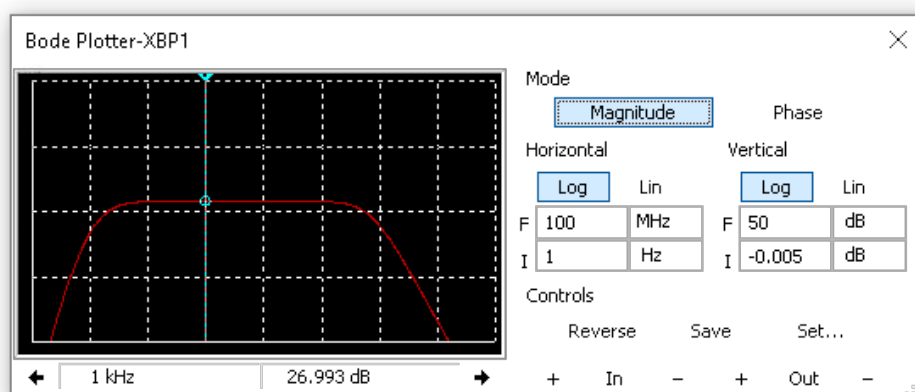


Рисунок 33

Перемещая курсор влево и вправо на величину уменьшения K_V (дБ) на -3 дБ зафиксируйте значения F_H и F_B (рисунок 34,35).

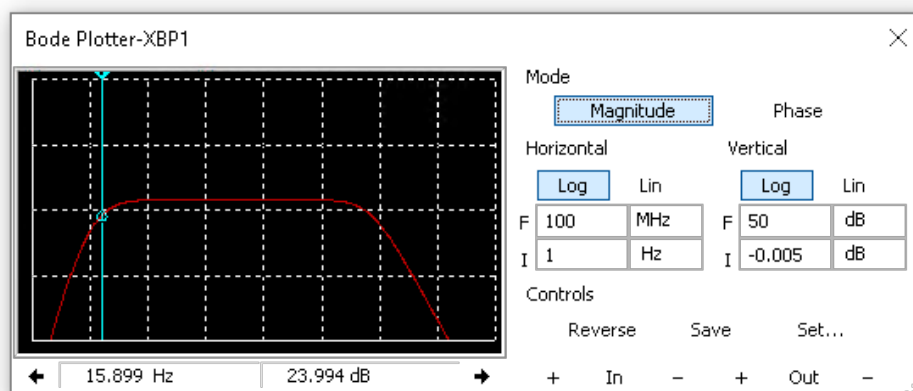


Рисунок 34

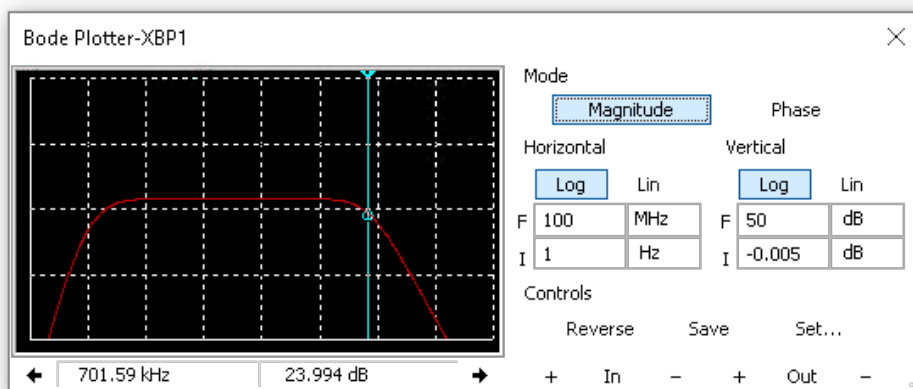


Рисунок 35

Повторите измерения для других номиналов элементов из таблицы 2.

Проанализируйте результаты.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические расчётные схемы и схемы цепи, собранные в Multisim.
3. Расчётные формулы.
4. Графики рабочей точки и амплитудной характеристики.
5. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
6. Выводы по работе.