

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Кафедра автоматизации, телекоммуникации и метрологии

ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ

Уфа 2023

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки бакалавров 27.03.04 - Управление в технических системах (БУС) и 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств (БАТ, БАГ) и специалистов 21.05.06 Нефтегазовая техника и технологии (АГ), изучающих дисциплину «Электроника».

Учебно-методическое пособие представляет собой руководство по выполнению лабораторных работ. Оно включает цель работы, порядок ее выполнения, краткие теоретические сведения, требования к отчету и контрольные вопросы.

Публикуется в авторской редакции.

Составители:	Ишемгузин А.И.	канд. техн. наук, доцент каф. АТМ
	Монов И.Е.,	преподаватель каф. АТМ

Рецензент:	Кирюшин О.В.,	канд. техн. наук, доцент каф. АТМ
------------	---------------	-----------------------------------

Рекомендовано к регистрации в качестве электронного ресурса учебно-методическим советом кафедры АТМ.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Биполярный транзистор. Статические характеристики. Режим по постоянному току	4
Лабораторная работа № 2. Усилитель с общим эмиттером	11
Лабораторная работа № 3. Генераторы синусоидальных напряжений	20
Лабораторная работа № 4. Генераторы импульсов	25
Список использованной литературы	30

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР. СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

РЕЖИМ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Цель работы: исследование характеристик транзистора и изучение методов анализа схем, содержащих транзистор, получение навыков моделирования и исследования электронных схем с помощью программы Electronics Workbench.

Краткие сведения из теории

Статический коэффициент передачи тока определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{CT} = \frac{I_K}{I_B}.$$

Коэффициент передачи тока β на переменном токе определяется отношением приращения ΔI_K коллекторного тока к приращению ΔI_B базового тока:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}.$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{вх}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению ΔI_B тока базы:

$$r_{ВХ} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}}.$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{ВХ}$ транзистора в схеме с ОЭ через параметры транзистора определяется выражением:

$$r_{ВХ} = (r_B + (1 + \beta) \cdot (r_{Эдиф} + R_{Э1})),$$

где r_B – распределенное сопротивление базовой области полупроводника,

$r_э$ – дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения: $r_э = 25/I_э$, где $I_э$ – постоянный ток эмиттера в миллиамперах.

$R_{э1}$ – значение сопротивления в цепи эмиттера, к которому параллельно не подключен конденсатор.

Порядок выполнения работы

1. Построение статических характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ

1.1. Составить схему для снятия статических характеристик транзистора с общим эмиттером (ОЭ) (рис.1).

1.2. Снять **входные характеристики** транзистора $I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ для значений $U_{кэ} = 0 \text{ В}, 5 \text{ В}, 10 \text{ В}$. Для того чтобы обеспечить равенство $U_{кэ}$ нулю, необходимо отключить проводник от амперметра и подсоединить его к общему проводу, чтобы выводы коллектор и эмиттер были соединены (закорочены). Задавая ряд значений тока $I_б$ в соответствии с таблицей 1 измерять напряжение $U_{бэ}$.

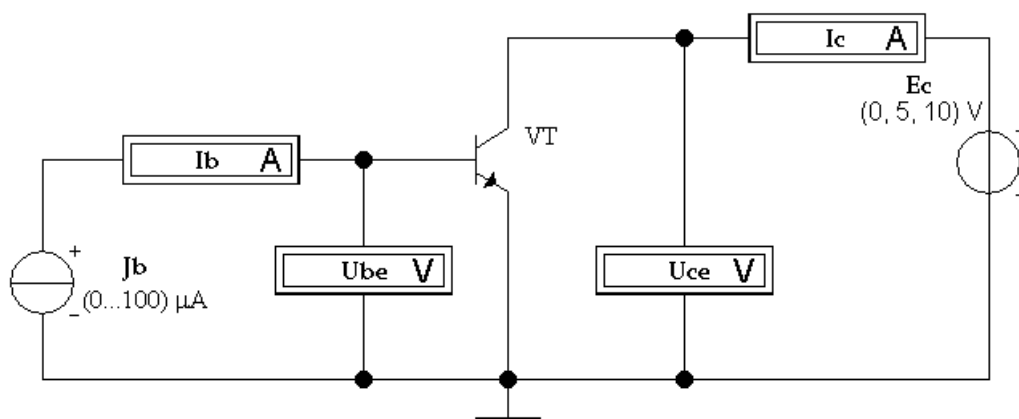


Рис.1. Схема для построения входных и выходных характеристик транзистора

Установить напряжение $U_{кэ} = 5 \text{ В}$, затем $U_{кэ} = 10 \text{ В}$ и вновь повторить эксперименты при тех же значениях базовых токов. Заполнить таблицу 1.

Таблица 1

$I_{б}, \mu\text{А}$	$U_{бэ}, \text{В}(U_{кэ}, \text{В})$		
	$U_{бэ}(0), \text{В}$	$U_{бэ}(5), \text{В}$	$U_{бэ}(10), \text{В}$
0			
0.5			
1			
2			
5			
10			
20			
40			
60			
80			
100			

1.3. По полученным данным построить семейство входных вольтамперных характеристик.

1.4. Снять **выходные характеристики** $I_{к} = f(U_{кэ})$ при $I_{б} = \text{const}$ для значений $I_{б} = 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \mu\text{А}$.

Таблица 2

$U_{кэ}, \text{В}$	$I_{к}, \text{mA}(I_{б}, \mu\text{А})$										
	$I_{к}(0)$	$I_{к}(10)$	$I_{к}(20)$	$I_{к}(30)$	$I_{к}(40)$	$I_{к}(50)$	$I_{к}(60)$	$I_{к}(70)$	$I_{к}(80)$	$I_{к}(90)$	$I_{к}(100)$
0											
0.1											
0.5											
1											
5											
10											
15											
20											

Задаваясь рядом значений $U_{кэ}$, в соответствии с таблицей 2 измерять ток $I_{к}$. В процессе эксперимента необходимо следить за постоянством тока базы. Для обеспечения $I_{б} = 0$ разорвем цепь питания базы. Ток коллектора при этом обозначается как $I_{кэ0}$. По полученным данным необходимо построить семейство выходных вольтамперных характеристик биполярного транзистора.

2. Расчет схемы усилителя с ОЭ на постоянном токе

2.1. Рассчитать и выбрать номинальные значения элементов, усилителя с ОЭ на постоянном токе (рис.2). Исходные данные (конкретные значения указываются преподавателем):

$$E_K = (10 - 20) \text{ В}; \quad I_{K\max} = (5 - 15) \text{ мА}; \quad R_H = (5 - 10) \text{ кОм};$$

$$R_r = (500 - 1000) \text{ Ом}, \quad f_H = (20 - 100) \text{ Гц}.$$

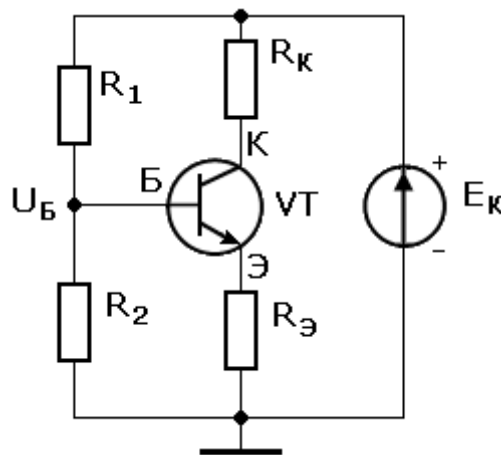


Рис.2. Схема усилителя с емкостной связью

Последовательность расчета следующая. Отметить на осях координат семейства выходных характеристик (рис.3) заданные значения E_K , $I_{K\max}$, соединить их прямой, эта прямая является **нагрузочной прямой по постоянному току**, угол наклона которой определяет сумму значений резисторов R_K и $(R_E + R_{Э1})$:

$$R_K + R_E + R_{Э1} = E_K / I_{K\max}.$$

На нагрузочной прямой выделяем рабочий участок bc и примерно на середине этого участка отмечаем точку покоя a и находим ее координаты $U_{КЭП}, I_{КП}, I_{БП}$.

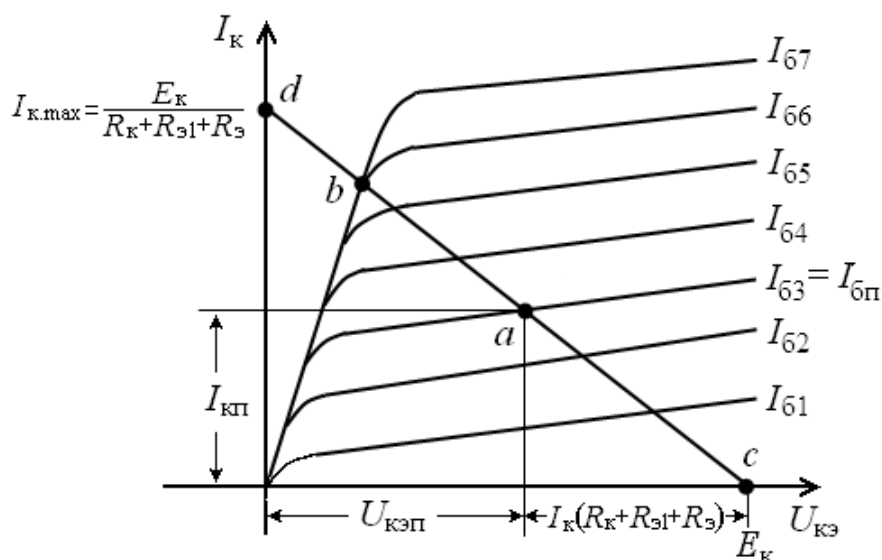


Рис. 3. Построение нагрузочной прямой по постоянному току.

По входной характеристике по известному току $I_{БП}$ найдем $U_{БЭП}$.

Далее рассчитываем значения элементов R_3 , R_1 , R_2 , чтобы обеспечить выбранный режим по постоянному току.

Сначала находим: $U_{ЭП} = (0.1 \dots 0.3) \cdot E_K$, затем значение сопротивления резистора $R_3 + R_{31}$:

$$R_3 + R_{31} = U_{ЭП} / I_{ЭП} \approx U_{ЭП} / I_{КП}.$$

Задаемся током через R_2 :

$$I_{R2} = 5 \cdot I_{БП}.$$

Находим значение R_2 :

$$R_2 = (U_{БЭП} + U_{ЭП}) / I_{R2}.$$

Определяем значение R_1 :

$$R_1 = (E_K - U_{БЭП} - U_{ЭП}) / (I_{R2} + I_{БП}).$$

Определяем значение R_K :

$$R_K = E_K / I_{Kmax} - (R_3 + R_{31}).$$

Резистор R_{31} обычно выбирают равным 100 Ом.

Все резисторы выбираются из ряда номинальных значений.

РАСЧЕТЫ И ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПОЛНЯЮТСЯ В MATHCAD.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРОВЕРЯЮТСЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ ELECTRONICS WORKBENCH.

Ряды номинальных значений E12 и E24: **10**, 11, **12**, 13, **15**, 16, **18**, 20, **22**, 24, 27, 30, **33**, 36, **39**, 43, **47**, 51, **56**, 62, **68**, 75, **82**, 91.

Для электролитических конденсаторов используется ряд: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

1. Схему для снятия статических характеристик биполярного транзистора;
2. Таблицы с полученными результатами;
3. Входные и выходные статические характеристики транзистора;
4. Расчет схемы усилителя с на постоянном токе;
5. Результаты экспериментальной проверки с помощью программы Electronics Workbench.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните структуру и принцип действия биполярного транзистора.
2. Дайте определение входных и выходных вольт – амперных характеристик.
3. Сопоставьте входные характеристики транзистора с физическими процессами, протекающими в нем. Дайте объяснение виду входных характеристик.
4. Выделите на выходных характеристиках характерные участки, объясните их вид, связав с физическими процессами, протекающими в транзисторе.
5. Какой режим работы транзистора называют режимом покоя? Как графически определить координаты точки покоя?

Варианты к лабораторным работам №1 и №2 – в таблице 3.

Таблица 3

$V_n := \begin{pmatrix} EK_n \\ IK_n \\ RL_n \\ Ri_n \\ f_n \\ VT_n \end{pmatrix}$	$V_1 = \begin{pmatrix} 15 \\ 15 \\ 10 \\ 800 \\ 90 \\ 5 \end{pmatrix}$	$V_2 = \begin{pmatrix} 16 \\ 14 \\ 8 \\ 500 \\ 50 \\ 2 \end{pmatrix}$	$V_3 = \begin{pmatrix} 18 \\ 13 \\ 6 \\ 500 \\ 70 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_4 = \begin{pmatrix} 16 \\ 11 \\ 6 \\ 500 \\ 100 \\ 2 \end{pmatrix}$	$V_5 = \begin{pmatrix} 19 \\ 11 \\ 9 \\ 800 \\ 50 \\ 2 \end{pmatrix}$
$V_6 = \begin{pmatrix} 15 \\ 10 \\ 5 \\ 1 \times 10^3 \\ 70 \\ 5 \end{pmatrix}$	$V_7 = \begin{pmatrix} 18 \\ 14 \\ 8 \\ 700 \\ 60 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_8 = \begin{pmatrix} 16 \\ 10 \\ 6 \\ 600 \\ 50 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_9 = \begin{pmatrix} 15 \\ 10 \\ 8 \\ 800 \\ 70 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_{10} = \begin{pmatrix} 15 \\ 13 \\ 8 \\ 500 \\ 90 \\ 4 \end{pmatrix}$	
$V_{11} = \begin{pmatrix} 20 \\ 12 \\ 7 \\ 500 \\ 60 \\ 2 \end{pmatrix}$	$V_{12} = \begin{pmatrix} 15 \\ 12 \\ 7 \\ 800 \\ 90 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_{13} = \begin{pmatrix} 15 \\ 12 \\ 8 \\ 700 \\ 80 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_{14} = \begin{pmatrix} 17 \\ 10 \\ 10 \\ 600 \\ 90 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_{15} = \begin{pmatrix} 18 \\ 14 \\ 7 \\ 600 \\ 70 \\ 3 \end{pmatrix}$	
$V_{16} = \begin{pmatrix} 15 \\ 14 \\ 6 \\ 800 \\ 90 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_{17} = \begin{pmatrix} 17 \\ 14 \\ 8 \\ 1 \times 10^3 \\ 60 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_{18} = \begin{pmatrix} 15 \\ 11 \\ 8 \\ 500 \\ 70 \\ 1 \end{pmatrix}$	$V_{19} = \begin{pmatrix} 19 \\ 10 \\ 5 \\ 800 \\ 50 \\ 4 \end{pmatrix}$	$V_{20} = \begin{pmatrix} 17 \\ 14 \\ 6 \\ 900 \\ 70 \\ 2 \end{pmatrix}$	
$V_{21} = \begin{pmatrix} 19 \\ 13 \\ 9 \\ 800 \\ 60 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_{22} = \begin{pmatrix} 20 \\ 10 \\ 9 \\ 800 \\ 60 \\ 1 \end{pmatrix}$	$V_{23} = \begin{pmatrix} 18 \\ 13 \\ 7 \\ 800 \\ 50 \\ 5 \end{pmatrix}$	$V_{24} = \begin{pmatrix} 17 \\ 10 \\ 9 \\ 800 \\ 90 \\ 3 \end{pmatrix}$	$V_{25} = \begin{pmatrix} 19 \\ 11 \\ 7 \\ 600 \\ 60 \\ 2 \end{pmatrix}$	

ЕК – напряжение питания усилителя, В; **IK** – максимальный ток коллектора транзистора усилителя, мА; **RL** – сопротивление нагрузки усилителя, кОм; **Rг** – внутреннее сопротивление источника входного сигнала, Ом ; **f** – нижняя частота среза усилителя, Гц ; **VT** – марка транзистора. **VT₁** – 2N2218, **VT₂** – 2N2222, **VT₃** – 2N3904, **VT₄** – 2N4401.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.

УСИЛИТЕЛЬ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Цель работы: расчет и исследование характеристик транзисторного усилителя с ОЭ и изучение методов анализа электронных схем, получение навыков моделирования и исследования электронных схем с помощью программы Electronics Workbench.

Краткие сведения из теории

Статический коэффициент передачи тока определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{CT} = \frac{I_K}{I_B}.$$

Коэффициент передачи тока β на переменном токе определяется отношением приращения ΔI_K коллекторного тока к приращению ΔI_B базового тока:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}.$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{вх}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению ΔI_B тока базы:

$$r_{ВХ} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}}.$$

Дифференциальное входное сопротивление $r_{ВХ}$ транзистора в схеме с ОЭ через параметры транзистора определяется выражением:

$$r_{ВХ} = (r_B + (1 + \beta) \cdot (r_{Эдиф} + R_{Э1})),$$

где r_B – распределенное сопротивление базовой области полупроводника,

r_3 – дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения: $r_3 = 25/I_3$, где I_3 - постоянный ток эмиттера в миллиамперах.

R_{31} – значение сопротивления в цепи эмиттера, к которому параллельно не подключен конденсатор.

Порядок выполнения работы

1. Расчет схемы усилителя

1.1. Расчет и выбор номинальных значений элементов, усилителя с

ОЭ

Исходные данные (конкретные значения указываются преподавателем):

$$E_k = (10 - 20) \text{ В}; \quad I_{k\max} = (5 - 15) \text{ мА}; \quad R_H = (5 - 10) \text{ кОм};$$

$$R_r = (500 - 1000) \text{ Ом}, \quad f_H = (20 - 100) \text{ Гц}.$$

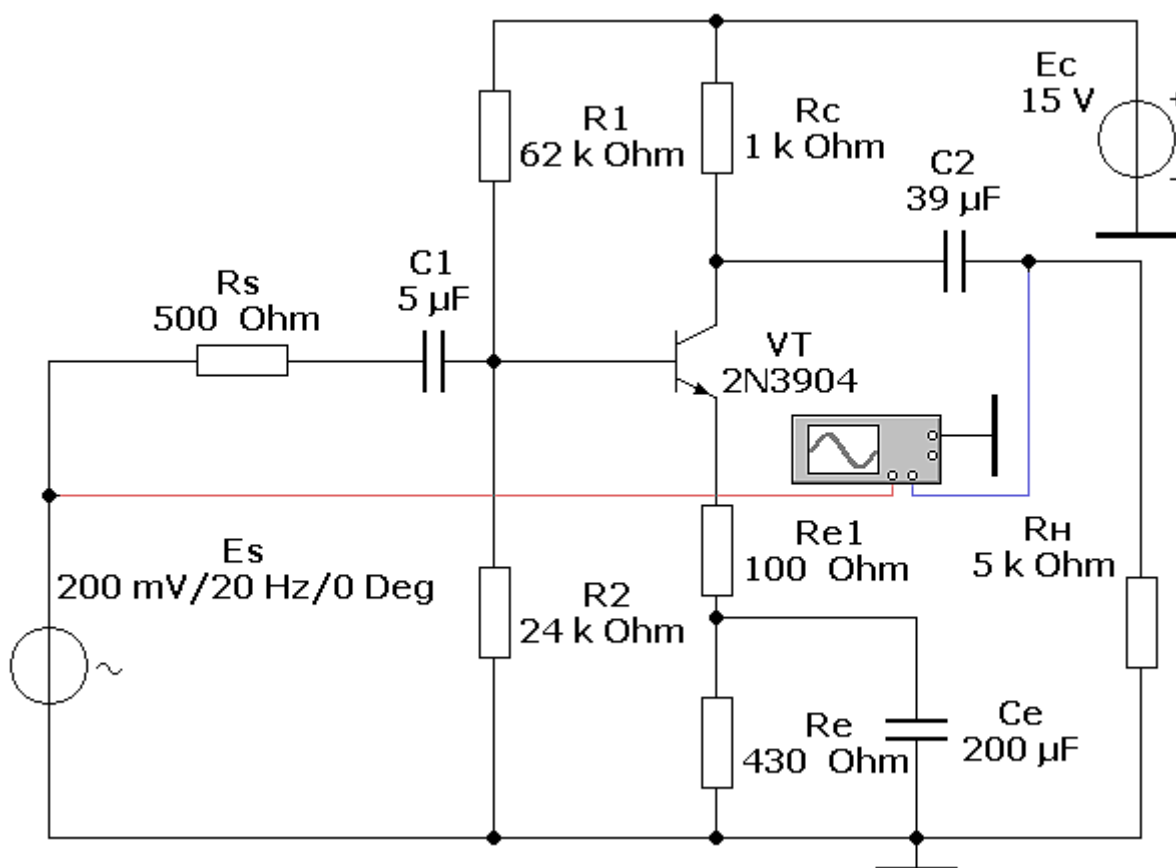


Рис.1. Схема усилителя с емкостной связью

При определении переменных составляющих выходного напряжения каскада и коллекторного тока транзистора используют линию нагрузки каскада по переменному току. При этом необходимо учесть, что по переменному току сопротивление в цепи эмиттера транзистора равно $R_{э1}$, так как резистор $R_э$ шунтируется конденсатором $C_э$, а к коллекторной цепи подключается нагрузка $R_н$, поскольку сопротивление конденсатора C_2 по переменному току мало. Если к тому же учесть, что сопротивление источника питания $E_к$ по переменному току близко к нулю, то окажется, что сопротивление каскада по переменному току определяется сопротивлениями резисторов $R_к$ и $R_н$, включенных параллельно, и сопротивлением $R_{э1}$, т. е. $(R_к \parallel R_н + R_{э1})$.

Сопротивление нагрузки каскада по постоянному току $(R_к + R_э + R_{э1})$ больше, чем сопротивление нагрузки каскада по переменному току.

Поскольку при наличии входного сигнала напряжение и ток транзистора представляют собой суммы постоянных и переменных составляющих, линия нагрузки по переменному току проходит через точку покоя «а» (рис. 2). Наклон линии нагрузки по переменному току будет больше, чем по постоянному току. Линию нагрузки по переменному току строят по отношению приращений напряжения к току:

$$\Delta U_{кэ} / \Delta I_к = (R_к \parallel R_н) + R_{э1}.$$

При подаче на вход каскада напряжения $u_{вх}$ в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока, связанная с напряжением $u_{вх}$ входной характеристикой транзистора.

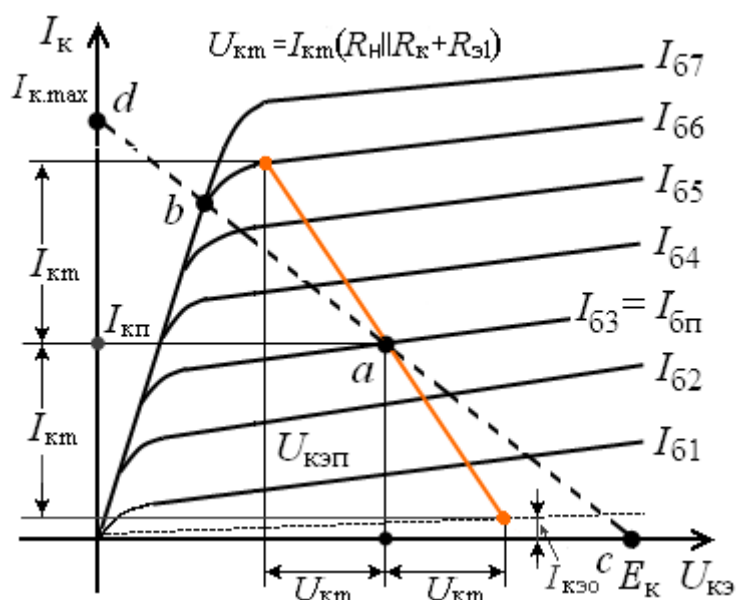


Рис. 2. Построение нагрузочной прямой по переменному току.

Так как ток коллектора через коэффициент β пропорционально зависит от тока базы, в коллекторной цепи транзистора создаются переменная составляющая тока $i_{K\sim}$ и переменное выходное напряжение $u_{\text{вых}}$, связанное с током $i_{K\sim}$ линией нагрузки по переменному току. При этом линия нагрузки по переменному току характеризует изменение мгновенных значений тока коллектора i_K и напряжения на транзисторе $u_{KЭ}$ или, как говорят, перемещение *р а б о ч е й т о ч к и*. Рабочая точка перемещается вниз от точки покоя «а» при положительной полуволне входного напряжения и вверх – при отрицательной полуволне. Для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы рабочая точка при перемещении вверх по линии нагрузки не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз – в область начальных токов коллектора $I_{KЭ0}$. Работа каскада без искажений выходного сигнала достигается за счет обеспечения соответствующей величины входного сигнала и правильного выбора режима (точки) покоя.

Влияние конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 можно определять, используя принцип суперпозиции.

Определим влияние конденсатора C_1 на коэффициент передачи по напряжению K_U :

$$K_U = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} \cong -\beta \cdot \frac{R_B \cdot \frac{r_{KЭ} \cdot R_{KH}}{r_{KЭ} + R_{KH}}}{R_{\Gamma} R_B + R_B R_{БЭ} + R_{\Gamma} R_{БЭ}} = -\beta \cdot \frac{\frac{R_B}{R_B + R_{БЭ}} \cdot \frac{r_{KЭ} \cdot R_{KH}}{r_{KЭ} + R_{KH}}}{R_{\Gamma} + \frac{R_B R_{БЭ}}{R_B + R_{БЭ}}}.$$

Для низшей частоты ω_H можно записать

$$K_{UC1} = -\beta \cdot \frac{\frac{r_{KЭ} \cdot R_{KH}}{r_{KЭ} + R_{KH}} \cdot \frac{R_B}{R_B + r_{БЭ}}}{R_{\Gamma} + \frac{R_B R_{БЭ}}{R_B + R_{БЭ}} + 1/j\omega_H C_1}.$$

Найдем отношение

$$\frac{K_U}{K_{UC1}} = 1 + \frac{1}{j\omega_H C_1 \cdot \left(R_{\Gamma} + \frac{R_B R_{БЭ}}{R_B + R_{БЭ}} \right)}.$$

Обозначим $\tau_{HC1} = C_1 \cdot \left(R_{\Gamma} + \frac{R_B R_{БЭ}}{R_B + R_{БЭ}} \right)$. Получим $\frac{K_{UC}}{K_{UH1}} = 1 + \frac{1}{j\omega_H \tau_{HC1}}$.

Модуль полученного отношения называется коэффициентом низкочастотных искажений (M_{HC1}):

$$M_{HC1} = \left| \frac{K_U}{K_{UC1}} \right| = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{j\omega_H \tau_{HC1}} \right)^2}.$$

Аналогичные выражения можно получить для конденсаторов C_2 и C_3 :

$$M_{HC2} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{j\omega_H \tau_{HC2}} \right)^2}, \quad M_{HC3} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{j\omega_H \tau_{HC3}} \right)^2}.$$

Постоянные времени вычисляются следующим образом

$$\tau_{HC1} = C_1 \cdot \left(R_{\Gamma} + \frac{R_B R_{БЭ}}{R_B + R_{БЭ}} \right), \quad \tau_{HC2} = C_2 (R_K + R_H),$$

$$\tau_{HC3} = C_3 \left(\frac{R_{\Gamma}}{(1+\beta)} + \left(1 + \frac{R_{\Gamma}}{R_B} \right) \cdot \left(\frac{r_B}{(1+\beta)} + r_{\text{Эдиф}} + R_{Э1} \right) \right).$$

Суммарные низкочастотные искажения подсчитываются по формуле

$$M_H = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{j\omega_H \tau_H} \right)^2}, \text{ где } \tau_H = \frac{1}{\left(\frac{1}{\tau_{HC1}} + \frac{1}{\tau_{HC2}} + \frac{1}{\tau_{HC3}} \right)}.$$

Обычно наибольшее влияние оказывает конденсатор C_3 .

На низшей частоте усиливаемого сигнала необходимо обеспечить, $\tau_H \geq 1/\omega_H$, то есть $\tau_H \geq 1/(2\pi f_H)$. В этом случае $M_H \leq \sqrt{2}$.

Емкость конденсаторов рассчитывается по приведенным формулам и выбирается по таблице номинальных значений, при этом выбирается большее значение из ближайших номинальных значений.

1.2. Расчет основных параметров усилителя с емкостной связью

$K_U, R_{вх}, R_{вых}$.

Коэффициент передачи по напряжению рассчитать по формуле:

$$K_U \cong - \frac{\beta \left(\frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H} \right)}{R_\Gamma + \left(1 + \frac{R_\Gamma}{R_B} \right) \cdot (r_B + (1 + \beta)(r_{Эдиф} + R_{Э1}))}.$$

Входное сопротивление:

$$R_{вх} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_{БЭ}}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_{БЭ} + R_2 \cdot R_{БЭ}}, \text{ где } R_{БЭ} = r_B + (1 + \beta)(r_{Эдиф} + R_{Э1}).$$

Выходное сопротивление:

$$R_{вых} = \frac{R_K \cdot r_K}{R_K + r_K} \approx R_K.$$

Максимальная амплитуда выходного переменного напряжения:

2. Исследование усилителя с емкостной связью по схеме с ОЭ

Собрать схему исследования усилителя (рис.1) со своими рассчитанными данными, на вход подсоединить генератор переменного напряжения, подключить осциллограф, так чтобы один из входов был подсоединен к входу усилителя, а второй к его выходу.

2.1. Измерение коэффициента усиления по напряжению K_U . После подключения приборов задать напряжение на входе порядка (0.01 ... 0.5) В, частотой 1 кГц, настроить осциллограф для наблюдения форм входного и выходного сигнала. При отключенной нагрузке (резистор R_H) регулируя входное напряжение добиться, чтобы выходной сигнал имел синусоидальную форму. Измерить входное напряжение с помощью осциллографа. Выходное напряжение измеряется дважды: при отключенной нагрузке (такой режим называют холостым ходом) и включенной нагрузке. Определить коэффициент усиления в режиме холостого хода

$$K_{U_{xx}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.ХХ}}}{U_{\Gamma}},$$

и коэффициент усиления по напряжению с учетом нагрузки

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\Gamma}}.$$

2.2. Измерение выходного сопротивления $R_{\text{ВЫХ}}$. Как видно из предыдущего эксперимента, выходное напряжение при подключении нагрузки уменьшается. Это происходит за счет падения напряжения на выходном сопротивлении усилителя. Эквивалентную схему выходной цепи усилителя можно представить в виде (рис.3).

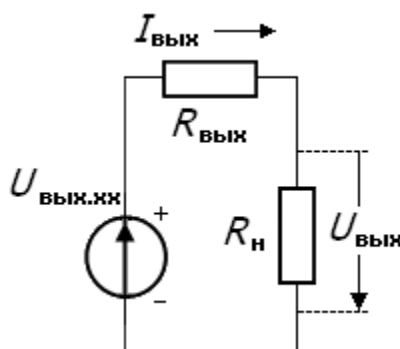


Рис.3. Эквивалентная схема выходной цепи усилителя

Пользуясь эквивалентной схемой, можно найти

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{(U_{\text{ВЫХ.ХХ}} - U_{\text{ВЫХ}})}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot R_H.$$

2.3. Определение входного сопротивления усилителя $R_{вх}$. Рассмотрим эквивалентную схему входной цепи (рис. 4).

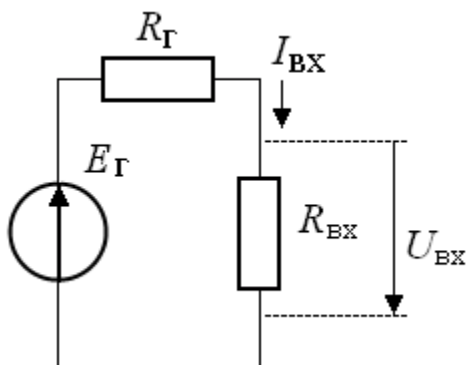


Рис.4. Эквивалентная схема входной цепи усилителя

Измерив с помощью вольтметра переменные напряжения $E_Г, U_{вх}$, считая известным $R_Г$, последовательно найдем

$$I_{вх} = \frac{E_Г - U_{вх}}{R_Г}, \quad R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = R_Г \cdot \frac{U_{вх}}{E_Г - U_{вх}}.$$

Сравните расчетные значения по пункту, полученные из анализа схемы усилителя с емкостной связью с экспериментальными данными.

3. Исследование влияния обратной связи на свойства усилителя

Резисторы в цепи эмиттера $R_э, R_{э1}$, устанавливаются для введения отрицательной обратной связи по постоянному и переменному току, что позволяет стабилизировать ток покоя транзистора, а также коэффициент усиления усилителя.

4.1. Исследовать влияние эмиттерного резистора на напряжение на коллекторе и ток коллектора. Измерить напряжение $U_К$ и ток $I_К$ при включенном и замкнутым (шунтированным) резисторе $R_{э1}$. Сделать вывод о влиянии обратной связи на параметры усилителя на переменном и постоянном токе. Объяснить полученный результат.

4.2. Исследовать влияние эмиттерного резистора на динамический режим работы. Отключить эмиттерный конденсатор $C_э$, определить коэффициент усиления по напряжению $K_U (C_э = 0)$. Сравнить с K_U для случая, когда включен конденсатор $C_э$. Сделать выводы и объяснить полученный результат.

Ряды номинальных значений E12 и E24: **10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91.**

Для электролитических конденсаторов используется ряд: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

6. Схему усилителя с емкостной связью,
7. Рассчитанные и экспериментальные значения элементов и параметров усилителя с емкостной связью,
8. Выводы по результатам экспериментов.
9. Эксперименты выполняются в EWB.
10. Расчеты и построения характеристик выполнять в MathCAD.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6. Как изменится положение нагрузочной прямой, при изменении E_K и R_K ?
7. Приведите формулы, определяющие K_U , для схемы включения транзистора с ОЭ.
8. Объясните назначение элементов схемы усилителя с емкостной связью.
9. Объясните влияние конденсатора C_3 и резисторов R_3 включенных в цепь эмиттера на работу усилителя.
10. Объясните как теоретически и экспериментально определить характеристики усилителя.

ВАРИАНТЫ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №2 ТЕ ЖЕ, ЧТО И К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: Изучить принципы построения и работы RC-генераторов синусоидальных напряжений на основе операционных усилителей. Ознакомиться с методами стабилизации работы генераторов. Освоить построение модели и исследование генераторов с помощью Electronics Workbench.

Порядок выполнения работы

1. Генератор с мостом Вина (цепью нулевого фазового сдвига)

1.1. Собрать схему генератора (рис. 1).

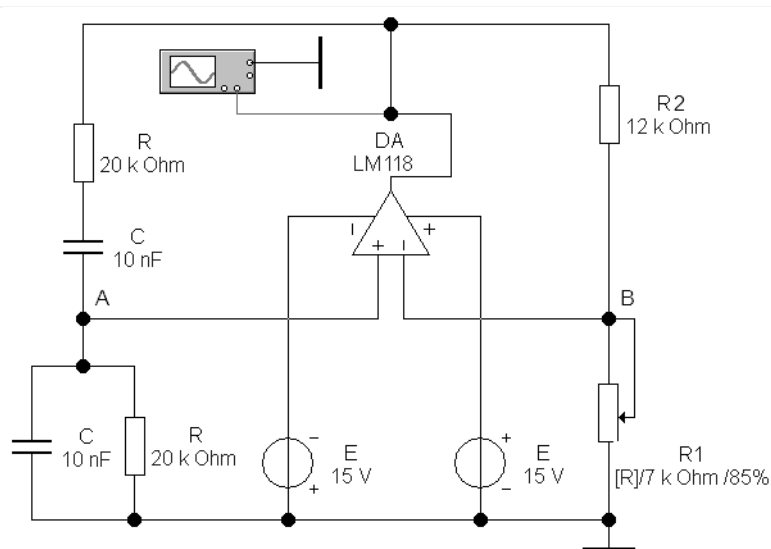


Рис. 1 Генератор с мостом Вина (цепью нулевого фазового сдвига)

1.2. Рассчитать элементы (R) в соответствии с вариантом задания (таблица).

Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_0 , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C, нФ	27	27	18	15	12	8.2	6.8	5.6	5.6
R, кОм									
$f_{0э}$, кГц									

Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
f_0 , кГц	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C, нФ	4.7	3.9	3.9	2.7	2.7	2.2	2.2	1.8	1.5
R, кОм									
$f_{0э}$, кГц									
Вариант	19	20	21	22	23	24	25		
f_0 , кГц	19	20	21	22	23	24	25		
C, нФ	1.2	1.0	0.82	1.2	1.5	1.8	2.2		
R, кОм									
$f_{0э}$, кГц									

1.3. Установить **расчетные значения** элементов схемы.

1.4. Запустить модель генератора, изменив, при необходимости, коэффициент усиления с помощью резистора R1.

1.5. Измерить частоту генерации f_0 . Изменяя R, при необходимости, добиться наилучшего совпадения f_0 с заданной частотой.

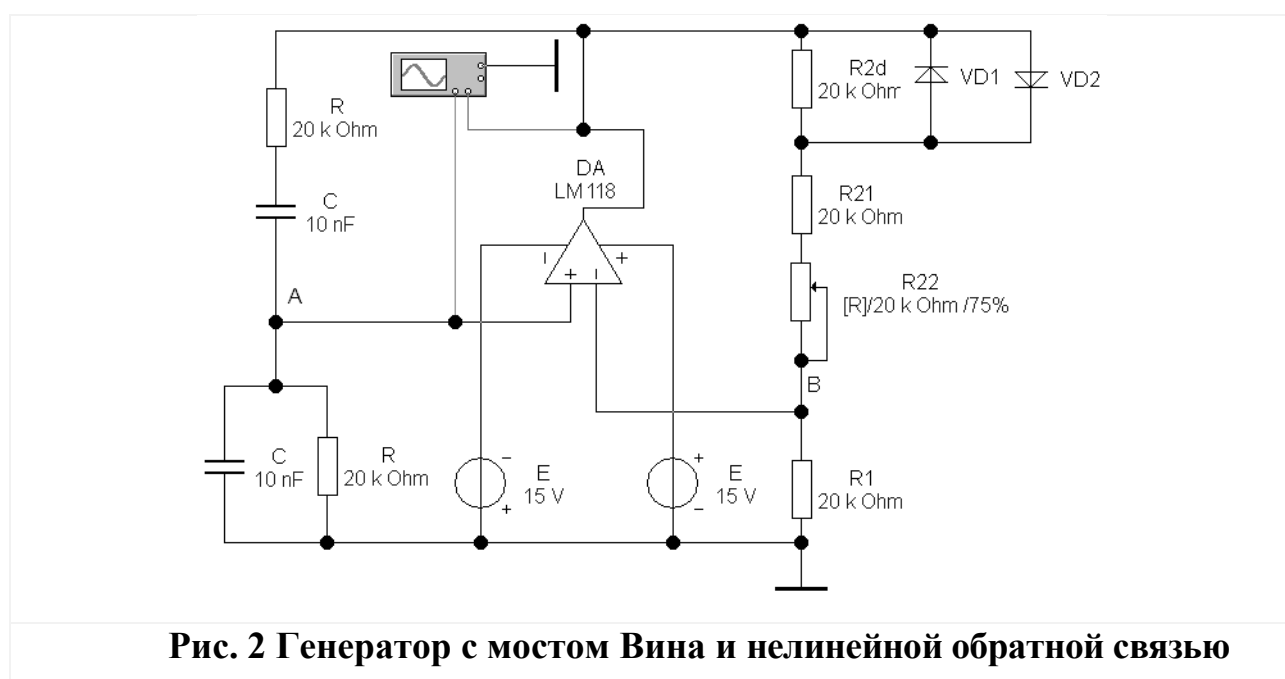
Используя ряд E24, установить окончательно значение сопротивления R и измерить частоту $f_{0э}$.

1.6. Оценить влияние коэффициента усиления на работу генератора.

1.7. Сделать выводы о работе генератора.

2. Генератор с мостом Вина и нелинейной обратной связью

2.1. Собрать схему генератора с нелинейной обратной связью (рис. 2).



- 2.2. Запустить схему. Наблюдать форму выходного напряжения.
- 2.3. Установить влияние нелинейной обратной связи на работу генератора.
- 2.4. Отключить R_d . Запустить модель генератора.
- 2.5. Наблюдать изменение формы выходного напряжения.
- 2.6. Сделать выводы о работе генератора и о влиянии нелинейной обратной связи на работу генератора.

3. Генератор с фазосдвигающей цепью

- 3.1. Собрать схему генератора с фазосдвигающей цепью и нелинейной обратной связью (рис. 3).

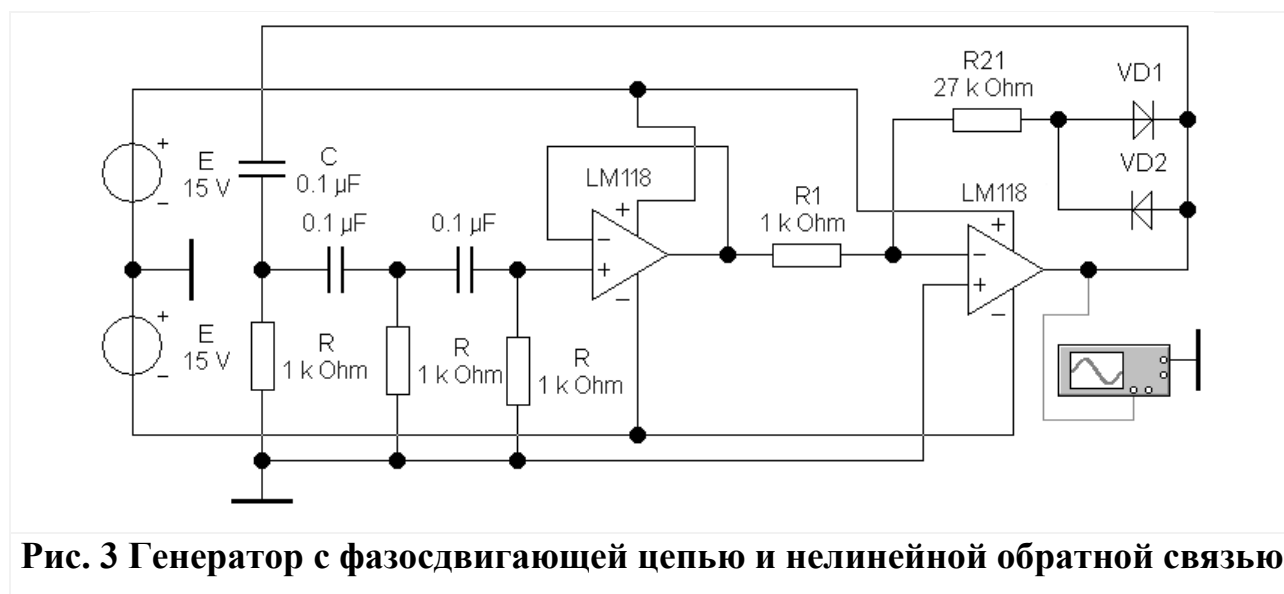


Рис. 3 Генератор с фазосдвигающей цепью и нелинейной обратной связью

- 3.1. Рассчитать значения сопротивлений резисторов R в соответствии с вариантом задания (таблица).
- 3.2. Установить расчетные значения элементов схемы.
- 3.3. Запустить модель генератора, изменив, при необходимости, коэффициент усиления с помощью резистора $R1$;
- 3.4. Измерить частоту генерации f_0 . **Изменяя R , при необходимости, добиться наилучшего совпадения f_0 с заданной частотой. Используя ряд E24, установить окончательно значение сопротивления R и измерить частоту $f_{0э}$.**
- 3.5. Установить влияние коэффициента усиления на работу генератора.
- 3.6. Установить влияние нелинейной обратной связи на работу генератора.
- 3.7. Сделать выводы о работе генератора.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Частота, при которой возникает генерация в схеме на рис. 1 и рис. 2, определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}.$$

На данной частоте коэффициент передачи цепи ПОС будет равен 1/3. Поэтому для возникновения генерации коэффициент передачи цепи ООС на этой частоте должен быть чуть меньше 1/3, то есть

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \leq \frac{1}{3} \quad \text{или} \quad \frac{R_1 + R_2}{R_1} \geq 3,$$

где R_2 - суммарное сопротивление в цепи ООС.

Влияние диодов VD.

Предположим, амплитуда выходного напряжения возросла. Это возрастание приводит к увеличению тока через диоды, что уменьшает их сопротивление в соответствии с формулой $R_{vd} \cong 25/I_d$, где $[I_d] = \text{мА}$, $[R_{vd}] = \text{Ом}$. Уменьшение сопротивления R_{vd} увеличивает напряжение т. В, что ограничивает возрастание выходного напряжения.

Предположим, амплитуда выходного напряжения уменьшилась. Это уменьшение приводит к уменьшению тока через диоды, что увеличивает их сопротивление в соответствии с формулой $R_{vd} \cong 25/I_d$. Увеличение сопротивления R_{vd} уменьшает напряжение т. В, что ограничивает дальнейшее уменьшение выходного напряжения.

Частота, при которой возникает генерация в схеме на рис. 3, определяется следующим выражением

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{6} \cdot \pi \cdot R \cdot C}.$$

На данной частоте обратная связь становится положительной.

Для того чтобы возникала генерация коэффициент передачи цепи ОС на этой частоте должен быть больше 29, то есть

$$\frac{R_{21} + R_{VD}}{R_1} \geq 29.$$

Значения R в таблице вариантов должны быть вычислены и установлены в соответствии с рядом E24. Количество резисторов для замещения R – не больше трех. Значения $f_{0э}$ должны быть вычислены по периоду синусоидальных колебаний, измеренному с помощью осциллографа в ходе проведения эксперимента в EWB.

Амплитуда выходного напряжения генераторов должна находиться в пределах 5...10 В. Форма выходного напряжения должна быть синусоидальной.

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) Схемы по рис. 1, 2, 3 с рассчитанными элементами в соответствии с вариантом задания.
- 2) Осциллограммы входного и выходного напряжений схем на рис. 1, 2, 3
- 3) Экспериментальные данные по частоте выходного напряжения схем на рисунке 1, 2 и 3.
- 4) Все необходимые расчеты для построения схем рис. 1, 2, 3 своего варианта.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- принципы построения RC-генераторов синусоидальных колебаний;
- работу схем рис. 1, 2, 3;
- назначение элементов схем;
- основные расчетные соотношения схем рис. 1, 2, 3.
- основные выводы по работе схем рис. 1, 2, 3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ

Цель работы

1. Изучить принципы построения и работу мультивибратора на операционном усилителе.
2. Изучить принципы построения и работу функционального генератора прямоугольного и треугольного напряжений на операционных усилителях.

Порядок выполнения работы

- 1.1. Собрать схему мультивибратора на операционном усилителе (рис. 1).
- 1.2. Для генератора прямоугольного напряжения рассчитать значение сопротивления резистора R , в соответствии с вариантом задания.
- 1.3. Запустить модель. По осциллографу наблюдать напряжения на конденсаторе C и на выходе схемы. Измерить период, коэффициент заполнения и амплитуду напряжений. Рассчитать частоту f_0 выходного напряжения.
- 2.1. Собрать схему функционального генератора прямоугольного и треугольного напряжений, соответствующую рис 2.
- 2.2. Рассчитать значение сопротивления резистора R , в соответствии с вариантом задания.
- 2.3. Запустить модель. По осциллографу наблюдать напряжения на выходах схемы. Измерить период, коэффициент заполнения и амплитуду напряжений.
- Рассчитать частоту f_0 выходного напряжения.
- 2.4. Собрать схему функционального генератора прямоугольного и треугольного напряжений, соответствующую рис 3.
- 2.5. Рассчитать значения сопротивлений элементов R_+ , R_- в соответствии с вариантом задания. Коэффициент заполнения прямоугольных выходных импульсов принять равным $\gamma = 0.2$.

2.6. Запустить модель. С помощью осциллографа наблюдать напряжения на выходах схемы. Измерить период, коэффициент заполнения и амплитуду напряжений. Рассчитать частоту f_3 выходного напряжения и коэффициент заполнения γ_3 .

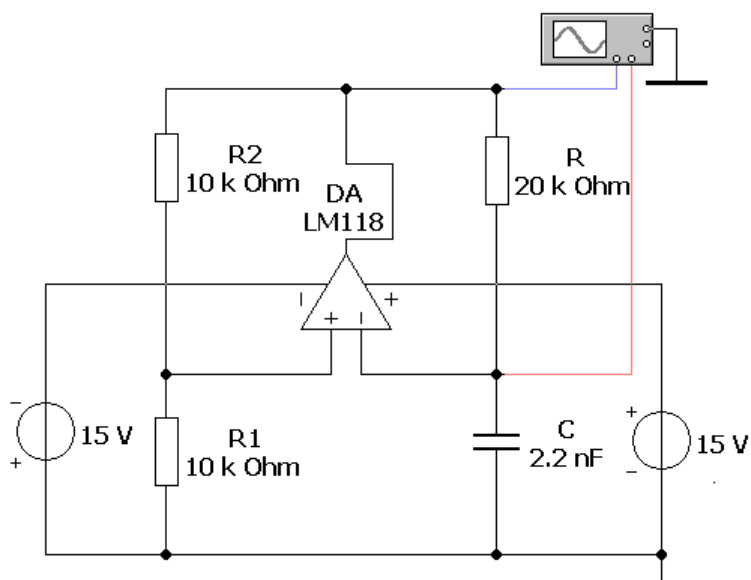


Рис. 1. Мультивибратор

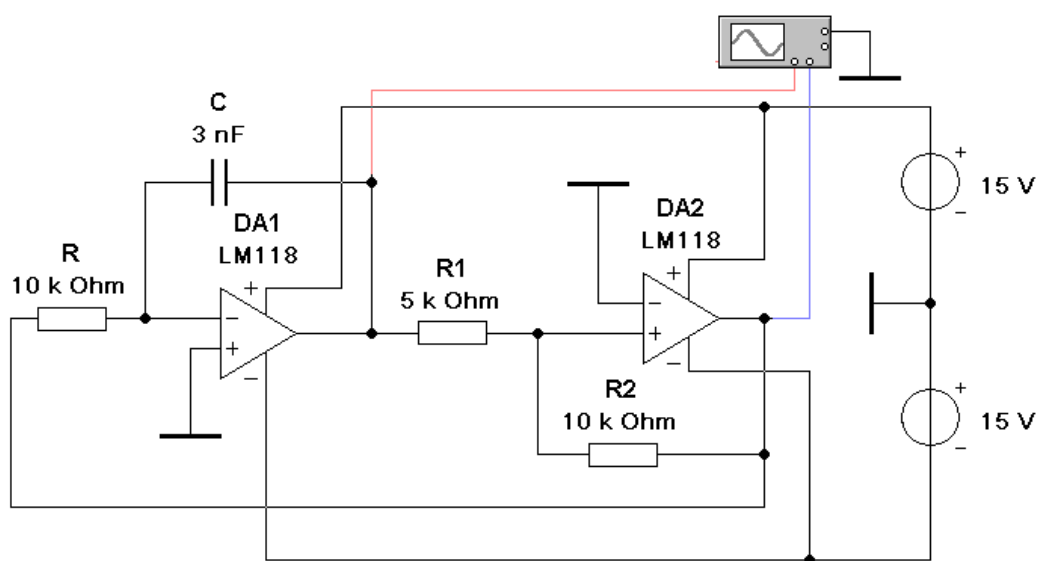


Рис. 2. Функциональный генератор

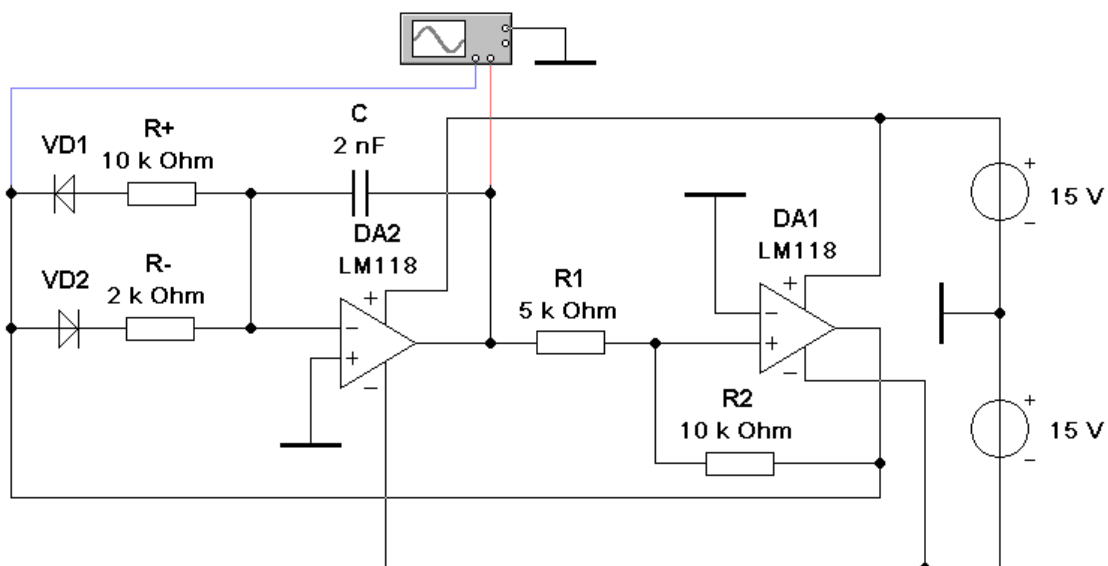


Рис. 3. Функциональный генератор с $\gamma \neq 0.5$

Методические указания

1. Мультивибратор по рис.1

Частота мультивибратора рис. 1 определяется выражением:

$$f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C \cdot \ln(1 + 2 \cdot R_1/R_2)}$$

Задаваясь C можно найти расчетное значение R_p :

$$R = \frac{1}{2 \cdot f \cdot C \cdot \ln(1 + 2 \cdot R_1/R_2)}$$

Окончательно R выбирается по ряду E24, при этом частота f_z должна максимально соответствовать заданной частоте f.

2. Функциональный генератор по рис.2

Частота функционального генератора (рис. 2) определяется выражением:

$$f = \frac{R_2}{4 \cdot R_1} \cdot \frac{1}{R \cdot C}$$

Задаваясь C можно найти R:

$$R = \frac{R_2}{4 \cdot R_1} \cdot \frac{1}{f \cdot C}$$

Окончательно R выбирается по ряду E24, при этом частота f_3 должна максимально соответствовать заданной частоте f .

3. Функциональный генератор по рис.3

Частота функционального генератора (рис. 3) определяется выражением:

$$f = \frac{R_2}{2 \cdot R_1} \cdot \frac{1}{(R_+ + R_-) \cdot C}.$$

Длительность положительного импульса:

$$t_{\text{и}} = \frac{2 \cdot R_1}{R_2} \cdot (R_+ \cdot C).$$

Длительность отрицательного импульса:

$$t_{\text{п}} = \frac{2 \cdot R_1}{R_2} \cdot (R_- \cdot C).$$

Коэффициент заполнения:

$$\gamma = \frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{и}} + t_{\text{п}}} = \frac{R_+}{R_+ + R_-}.$$

Окончательно R_+ и R_- выбирается по ряду E24. При этом частота f_3 и коэффициент заполнения γ_3 должны максимально соответствовать заданным значениям f и γ .

Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f , кГц	0.5	1	1.5	2	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
C , нФ	18	18	18	10	10	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	3.9	3.9
R , кОм														
f_3 , кГц														
Вари-	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25			
f , кГц	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5			
C , нФ	3.9	3.9	3.9	3.9	3.3	3.3	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2			
R , кОм														
f_3 , кГц														

ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

1. Расчеты элементов генераторов импульсов.
2. Осциллограммы напряжений на конденсаторе C и на выходах генераторов с финальными значениями сопротивлений R , R_+ , R_- .
3. Результаты расчета и измерения периода и частоты выходного напряжения схем по рисункам 1, 2, 3
4. Результаты расчета и измерения коэффициента заполнения γ для схемы рис. 3.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип работы и расчета мультивибратора на ОУ.
2. Принцип работы и расчета функционального генератора.
3. Принцип работы и расчета функционального генератора с коэффициентом заполнения не равным 0,5.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лачин В.И., Савёлов Н.С., Электроника: Учеб. пособие.- Ростов н /Д: изд-во “Феникс”, 2007. – 704 с.
2. Латышев Л.Н., Основы электроники: курс лекций. – Уфа: Изд-во «Реактив», 2008. -384 с.
3. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурнин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях – Т2: Электроника. – М.: Издательство МЭИ, 2004. –332 с.
4. Игумнов Д.В., Костюнина Г.П. Основы полупроводниковой электроники. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011.– 394 с.
5. Латышев Л.Н. Основы электроники: учебное пособие. – Уфа: Изд-во. УГНТУ, 2016.– 206 с.
6. Шарапов А.В. Аналоговая схемотехника: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2006. – 193 с.