

# МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

## *Лабораторная работа №4. Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах*

**Цель работы** - Изучение работы усилительных каскадов на биполярных транзисторах, определение основных параметров и их расчет по постоянному току.

### **Краткие теоретические сведения**

*Усилитель* это устройство, преобразующее сигнал малой мощности в сигнал большей мощности за счёт энергии источника питания. Именно увеличение мощности выходного сигнала, по сравнению с мощностью входного, является характерной особенностью усилителя и отличает его от других преобразующих устройств, в которых изменяется либо напряжение, либо электрический ток, а мощность остаётся постоянной (точнее уменьшается, т. к. КПД любого устройства меньше единицы). Примером такого устройства может служить повышающий трансформатор, преобразующий входное напряжение в более высокое выходное, при этом мощность выходного сигнала, за счёт потерь, будет ниже, чем мощность входного.

*Усилительный каскад* это минимальный функциональный блок, обеспечивающий усиление сигнала. Обычно в его состав входят один или несколько *усилительных элементов* (электронный прибор, обеспечивающий усиление сигнала – транзистор или электронная лампа), цепи обратной связи, элементы обеспечивающие режим по постоянному току, и т. д.

Важнейшей величиной, характеризующей усилитель, является *коэффициент усиления*, равный отношению уровня выходного сигнала к уровню входного. Различают три коэффициента усиления – коэффициент усиления по напряжению, току и мощности:

- по напряжению  $K_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$  ,

- по току  $K_I = \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}}$  ,

- по мощности  $K_P = \Delta P_{\text{ВЫХ}} / \Delta P_{\text{ВХ}} = K_U K_I$  .

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  ,  $U_{\text{ВХ}}$  ,  $I_{\text{ВЫХ}}$  ,  $I_{\text{ВХ}}$  – действующие значения напряжений и токов.

При каскадном соединении нескольких усилительных устройств произведение их коэффициентов усиления определяет общий коэффициент усиления системы:

$$K_{\text{общ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n.$$

*Полоса пропускания усилителя* – диапазон рабочих частот, в пределах которого коэффициент усиления не снижается ниже  $0.707 \cdot K_{\text{max}}$ .

Зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)* усилителя.

Входное и выходное сопротивления – важнейшие параметры усилительных устройств. Их значения должны учитываться при согласовании усилительного устройства как с источником входного сигнала, так и с нагрузкой.

Выходная мощность усилителя – мощность, которая может быть выделена на сопротивлении нагрузки.

Искажения сигналов в усилителе бывают двух типов – статические (нелинейные), обусловленные нелинейностью статических ВАХ применяемых полупроводниковых приборов, и динамические (амплитудные и фазовые), связанные с частотной зависимостью амплитуды и фазы усиливаемого сигнала.

Для количественной оценки нелинейных искажений служит коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник)  $K_{\text{н}}$ .

Рабочий режим схемы на биполярных транзисторах можно определить из следующей системы уравнений (для схемы ОК сопротивление резистора  $R_{\kappa} = 0$ ) :

$$\begin{aligned} U_{\text{nut}} &= I_{\kappa} R_{\kappa} + U_{\kappa\text{э}} + I_{\text{э}} R_{\text{э}}, \\ E_{\text{б}} &= I_{\text{б}} R_{\text{б}} + U_{\text{бэ}} + I_{\text{э}} R_{\text{э}}, \end{aligned}$$

Здесь  $E_{\text{б}}$  и  $R_{\text{б}}$  - эквивалентный источник питания и эквивалентное сопротивление в цепи базы, которые соответственно равны:

$$\begin{aligned} E_{\text{б}} &= U_{\text{nut}} R_2 / (R_1 + R_2), \\ R_{\text{б}} &= R_1 R_2 / (R_1 + R_2). \end{aligned}$$

В систему уравнений необходимо включить уравнения, описывающие работу транзистора в активном режиме:

$$\begin{aligned} I_{\text{э}} &= I_{\kappa} + I_{\text{б}}, \\ I_{\kappa} &= \beta I_{\text{б}}, \\ U_{\text{бэ}} &\approx 0.7 \text{ В}. \end{aligned}$$

Последнее равенство учитывает, что в активном режиме напряжение на базе существенно не меняется (входная вольтамперная характеристика круто поднимается вверх).

К основным параметрам усилительных каскадов относятся:

$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  - коэффициент усиления напряжения;

$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$  - входное сопротивление каскада;

$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}$  - выходное сопротивление каскада.

Для усилительного каскада ОЭ (рисунок 1) эти параметры можно рассчитать или через  $h$ -параметры малосигнальной схемы замещения, или через известные рабочие токи транзистора:

$$K_U = -(I_K / \varphi_T) \cdot R_K \cdot \xi_{\text{вых}},$$

$$R_{\text{вх}} = [\beta(\varphi_T / I_K)] \parallel R_{\text{б}},$$

$$R_{\text{вых}} = R_K.$$

В этих уравнениях  $\varphi_T$  - тепловой потенциал, который для нормальной температуры приблизительно равен 25 мВ;  $\xi_{\text{вых}}$  - коэффициент деления выходного напряжения:

$$\xi_{\text{вых}} = R_H / (R_K + R_H).$$

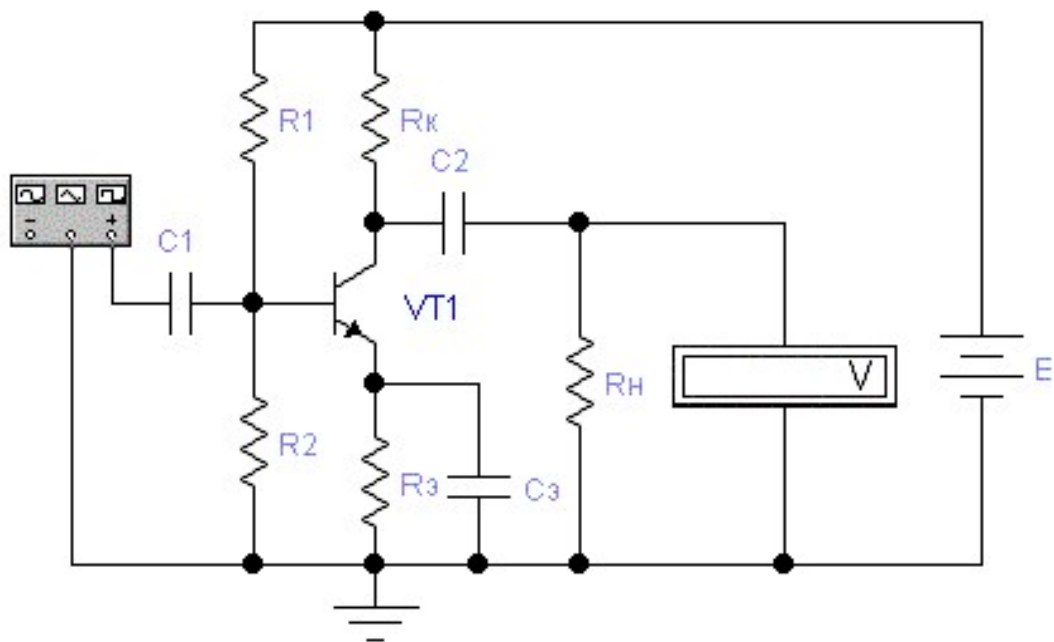


Рисунок 1 – Усилительный каскад с общим эмиттером

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  являются разделительными:  $C_1$  препятствует связи по постоянному току источника входного сигнала и усилителя,

а  $C_2$  служит для разделения по постоянному току коллекторной цепи и нагрузки. Емкости  $C_1$  и  $C_2$  выбирают такими, что на частоте переменной составляющей их сопротивлением можно было пренебречь. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют делитель напряжения, определяющий положение рабочей точки эмиттерного перехода.

Для схемы ОК (рисунок 2) основные параметры рассчитываются через малосигнальную схему замещения каскада:

$$K_U = \beta R_3 / (1 + \beta R_3),$$

$$R_{ex} = \left\{ \left[ (\varphi_T / I_K) + R_3 \right] \cdot \beta \right\} \parallel R_3,$$

$$R_{ббх} = R_3 \parallel (\varphi_T / I_K).$$

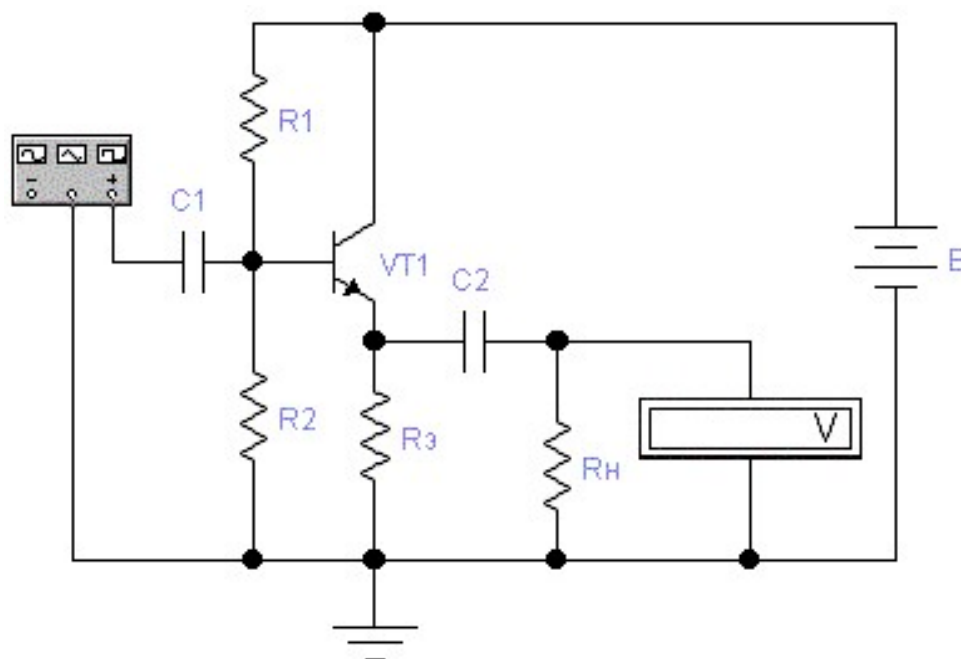


Рисунок 2 – Усилительный каскад с общим коллектором

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  задают напряжение покоя базы, которое определяет положение точки покоя на линии нагрузки. Конденсатор  $C_1$  разделяет каскад и источник сигнала по постоянному току. Конденсатор  $C_2$  разделяет каскад и нагрузку по постоянному току. Каскад усиливает ток, а напряжение не усиливает.

Приведенные выше уравнения удобны для расчета основных параметров схемы тем, что кроме коэффициента усиления транзистора  $\beta$  никаких других справочных данных не нужно. Малосигнальные параметры транзистора определяются через его рабочий ток  $I_K$ .

## Порядок выполнения работы

1 Создать модель транзистора в соответствии с вариантом задания таблицы 1. Для этого щелкнуть два раза клавишей указания мыши на изображении транзистора и выбрать в появившемся окне **NPN Transistor Properties** в разделе **Library** библиотеку **default**, а затем в разделе **Model** – тип транзистора **ideal**. Выбрать последовательно клавишей указания мыши кнопки **Copy** и **Paste**, записать латинскими буквами в появившемся окне тип транзистора в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку **OK**. В результате в разделе **Model** добавится новый тип транзистора. Для корректировки его параметров нажать кнопку «Edit» и установить значения параметров **Forward current gain coefficient [BF]** (коэффициент усиления  $\beta$ ), **Base ohmic resistance [RB]** (сопротивление базы  $R_b$ ), **Emitter ohmic resistance [RE]** (сопротивление эмиттера  $R_e$ ), **Collector ohmic resistance [RC]** (сопротивление коллектора  $R_k$ ) в соответствии с таблицей 1. Значения других параметров оставить без изменения.

Таблица 1

№ варианта	Обозначение транзистора	Тип транзистора	$\beta(BF)$	$R_b$ , Ом (RB)	$R_e$ , Ом (RE)	$R_k$ , Ом (RC)
1	VT1	КТ315Б	60	5	2	1
2	VT1	КТ3102Ж	100	3	1	0,6
3	VT1	КТ315Г	60	5	2	1
4	VT1	КТ3102А	100	3	1	0,6
5	VT1	КТ3102Д	200	3	1	0,6
6	VT1	КТ315Е	50	5	2	1
7	VT1	КТ3102А	100	3	1	0,6
8	VT1	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5
10	VT1	КТ503Г	80	2,5	1,2	0,5

2. Для исследования схемы усилительного каскада ОЭ собрать схему в соответствии с рисунком 1. Установить значения сопротивлений резисторов, емкости конденсаторов и напряжение источника питания для схемы рисунка 1 в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

№ Вариант	Е, В	$R_1 = R_2$ , кОм	$R_e$ , кОм	$R_k$ , кОм	$R_H$ , кОм	$C_1 = C_2$ , мкФ	$C_e$ , мкФ
1	9	1,6	180	3,3	3	33	33
2	10	2,2	180	3,6	3	33	33
3	12	2,7	200	3,9	3	22	22
4	15	3,0	150	4,3	3	22	33
5	9	1,8	200	3,6	3	33	22

6	10	2,0	180	3,9	3	33	33
7	12	2,2	270	4,3	3	33	22
8	15	2,4	180	4,7	3	22	33
9	9	2,2	240	3,3	3	33	22
10	10	2,4	180	3,6	3	22	33

3. Для определения коэффициента усиления каскада ОЭ на вход каскада подать с функционального генератора синусоидальное напряжение  $U_{\text{вх}} = 0.1$  В частотой  $f = 1$  кГц. Измерить выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  на нагрузочном резисторе  $R_H$ .

4. Определить изменение тока коллектора транзистора от вариации коэффициента усиления в диапазоне  $(\beta \pm 30\%)$  при  $U_{\text{вх}} = 0$  В. Результаты занести в таблицу 3.

Таблица 3

$\beta$	0,7 $\beta$	0,8 $\beta$	0,9 $\beta$	$\beta$	1,1 $\beta$	1,2 $\beta$	1,3 $\beta$
$I_K, A$							

5. Исследовать зависимость изменения тока коллектора транзистора от изменения температуры от -20 до +600 °C при  $U_{\text{вх}} = 0$  В. Для установки температуры открыть пункт меню **Analysis/ Analysis Options/Global** и установить требуемое значение рабочей температуры (параметр **Simulation Temperature (TEMP)**). Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 4

$T, ^\circ C$	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
$I_K, A$									

6. Рассчитать коэффициент усиления каскада ОЭ по формуле:

$$K_{U_{OЭ}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$$

7. Построить графики зависимостей  $I_K = f(\beta)$  и  $I_K = f(T)$  для каскада ОЭ в соответствии с таблицами 3 и 4 (в OpenOffice или MS Excell).

8. Для исследования усилительного каскада ОК собрать схему в соответствии с рисунком 2. Установить значения сопротивлений резисторов, емкости конденсаторов и напряжение источника питания для схемы рисунка 2 в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5

№ Вариан та	Е, В	$R_1 = R_2,$ кОм	$R_э,$ кОм	$R_H,$ кОм	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ
-------------------	------	---------------------	---------------	---------------	---------------	---------------

1	9	1,6	0,82	3	33	33
2	10	2,2	0,91	3	33	33
3	12	2,7	0,68	3	22	22
4	15	3,0	1,0	3	22	33
5	9	1,8	0,82	3	33	22
6	10	2,0	0,91	3	33	33
7	12	2,2	0,68	3	33	22
8	15	2,4	1,0	3	22	33
9	9	2,2	0,82	3	33	22
10	10	2,4	0,91	3	22	33

9. Для определения коэффициента усиления каскада ОК на вход каскада подать с функционального генератора синусоидальное напряжение  $U_{\text{вх}} = 1\text{В}$  частотой  $f = 1$  кГц. Измерить выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  на нагрузочном резисторе  $R_n$ .

10. Определить изменение тока коллектора транзистора от вариации коэффициента усиления в диапазоне  $(\beta \pm 30\%)$ . Результаты занести в таблицу 6.

Таблица 6

$\beta$	$0,7\beta$	$0,8\beta$	$0,9\beta$	$\beta$	$1,1\beta$	$1,2\beta$	$1,3\beta$
$I_k, \text{А}$							

11. Исследовать зависимость изменения тока коллектора транзистора от изменения температуры от  $-20$  до  $+600^\circ\text{C}$  при  $U_{\text{вх}} = 0.0\text{В}$ . Результаты занести в таблицу 7.

Таблица 7

$T, ^\circ\text{C}$	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
$I_k, \text{А}$									

12. Рассчитать коэффициент усиления каскада ОК по формуле:

$$K_{U_{OK}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$$

13. Построить графики зависимостей  $I_k = f(\beta)$  и  $I_k = f(T)$  для каскада ОЭ в соответствии с таблицами 6 и 7.

### Требования к оформлению отчета

Отчет по работе должен включать:

- титульный лист с указанием названия и номера варианта работы.
- наименование работы;
- цель работы;
- задание на выполнение работы;
- экспериментальную часть, включающую схемы усилителей с включенными приборами. Качество скриншотов должно обеспечивать читабельность основных параметров схемы.
- результаты расчета схем, таблицы с результатами экспериментов и графики.
- выводы (оценка результатов выполненной работы).