

Министерство высшего и средне-специального образования  
Республики Узбекистан

Ташкентский государственный технический университет  
имени А.Р.Беруни

Факультет «Электроники и автоматики»

## **Курсовая работа**

по дисциплине: «Электроника»

на тему: «Исследование усилительных каскадов на биполярных  
транзисторах»

**Выполнил:** студент III курса

**Проверил:** Хайдаров А

**Ташкент 2011**

Тасдиқлайман \_\_\_\_\_

Кафедра мудири

Кафедра \_\_\_\_\_ 201\_\_ йил “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_

## Курс лойиҳаси

Курс бўйича \_\_\_\_\_

Гуруҳ \_\_\_\_\_ Талаба \_\_\_\_\_ Бошлиқ \_\_\_\_\_

## ТОПШИРИҚ

1. Ишланадиган лойиҳа \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

2. Бошланғич маълумотлар \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. Қўлланмалар \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. График қисмининг тузилиши \_\_\_\_\_

1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

4. \_\_\_\_\_

5. Тушунтириш ёзилмасининг тузилиши \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

6. Қўшимча машғулотлар ва кўрсатмалар \_\_\_\_\_

7. Лойиҳани топшириш даври

Режа  
Факт

				4	Х ИМОЯ

Бошлиқ \_\_\_\_\_

## Исследование усилительных каскадов на биполярных транзисторах

### Рабочее задание

1 Для схемы усилительного каскада ОЭ (рисунок 1) и указанных параметров элементов предварительно рассчитать значение резистора R1 при условии  $U_{к} = 0,5E$ . Рассчитать рабочий режим транзистора ( $I_{к}, U_{кэ}, I_{б}$ ).

2 Рассчитать малосигнальные параметры схемы: коэффициент усиления  $K_U$ , входное сопротивление  $R_{вх}$ , выходное сопротивление  $R_{вых}$ .

3 Для схемы усилительного каскада ОК (рисунок 2) и указанных параметров элементов предварительно рассчитать значение резистора R1 при условии  $U_{э} = 0,5E$  и рабочий режим транзистора ( $I_{к}, U_{кэ}, I_{б}$ ).

4 Рассчитать малосигнальные параметры схемы ( $K_U, R_{вх}, R_{вых}$ ).

### Экспериментальная часть

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  $R_б$ ), **Emitter ohmic resistance [RE]** (сопротивление эмиттера  $R_э$ ), **Collector ohmic resistance [RC]** (сопротивление коллектора  $R_к$ ) в соответствии с таблицей 1. Значения других параметров оставить без изменения.

Для исследования схемы усилительного каскада ОЭ собрать схему в соответствии с рисунком 1.

№ транзистора	Обозначение транзистора	Тип варианта	$\beta$ (BF)	$R_б$ , Ом (RB)	$R_э$ , Ом (RE)	$R_к$ , 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
11	VT1	КТ503Д	40	2,5	1,2	0,5
12	VT1	КТ503Е	40	2,5	1,2	0,5
13	VT1	КТ3102А	100	3	1	0,6
14	VT1	КТ3102Б	200	3	1	0,6
15	VT1	КТ3102В	200	3	1	0,6
16	VT1	КТ503Б	80	2,5	1,2	0,5
17	VT1	КТ3102А	100	3	1	0,6
18	VT1	КТ3102В	200	3	1	0,6
19	VT1	КТ503Г	80	2,5	1,2	0,5
20	VT1	КТ315А	30	5	2	1
21	VT1	КТ3102А	100	3	1	0,6
22	VT1	КТ503Е	40	2,5	1,2	0,5
23	VT1	КТ315Б	60	5	2	1
24	VT1	КТ3102Б	200	3	1	0,6

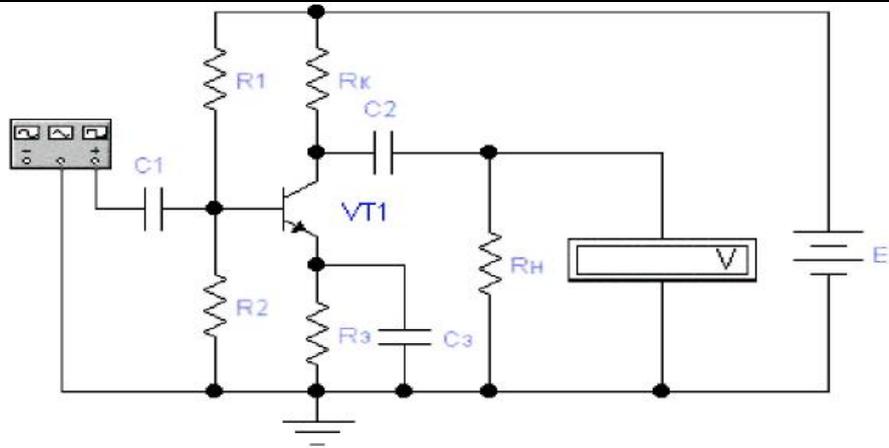


Рисунок 1

Установить значения сопротивлений резисторов, емкости конденсаторов и напряжение источника питания для схемы рисунка 1 в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

№ варианта	Е, В	R2, кОм	R3, Ом	Rк, кОм	Rн, кОм	C1, мкФ	C3, 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
11	12	3,0	270	3,9	3	22	22
12	15	2,7	300	4,3	3	22	22
13	9	2,0	220	3,6	3	33	22
14	10	3,0	200	3,9	3	22	22
15	12	2,7	300	4,3	3	22	33
16	15	3,0	330	4,7	3	22	22
17	9	2,2	180	3,9	3	33	33
18	10	2,4	240	4,3	3	22	22
19	12	3,0	300	4,7	3	22	33
20	15	3,6	360	5,1	3	22	33
21	9	2,2	220	3,3	3	33	22
22	10	2,4	200	3,6	3	22	33
23	12	2,7	300	3,9	3	22	22
24	15	3,0	330	4,3	3	22	22

Для определения коэффициента усиления каскада ОЭ на вход каскада подать с функционального генератора синусоидальное напряжение  $U_{вх} = 0,1$  В частотой  $f = 1$  кГц. Измерить выходное напряжение  $U_{вых}$  на нагрузочном резисторе  $R_H$ .

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

Таблица 3

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

Исследовать зависимость изменения тока коллектора транзистора от изменения температуры от  $-20$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  при  $U_{\text{вх}} = 0\text{В}$ . 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

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

Для исследования усилительного каскада ОК собрать схему в соответствии с рисунком 2.

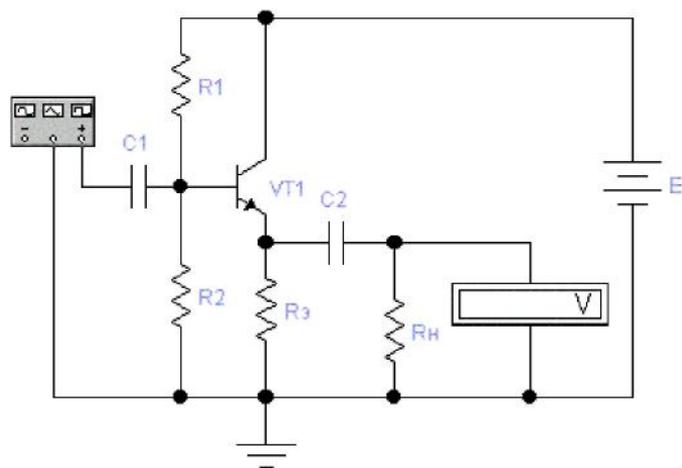


Рисунок 2

Установить значения сопротивлений резисторов, емкости конденсаторов и напряжение источника питания для схемы рисунка 2 в соответствии с таблицей 5.

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



## Обработка экспериментальных данных

Рассчитать коэффициент усиления каскада ОЭ по формуле:

$$K_{\text{УОЭ}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} .$$

Рассчитать коэффициент усиления каскада ОК по формуле:

$$K_{\text{УОК}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$$

Построить графики зависимости  $I_k = f(\beta)$  и  $I_k = f(T)$  для каскада ОЭ в соответствии с таблицей 3 и таблицей 4.

Построить графики зависимости  $I_k = f(\beta)$  и  $I_k = f(T)$  для каскада ОК в соответствии с таблицей 6 и таблицей 7.

Оформить отчет, куда включить все исследуемые схемы, результаты расчета схем, таблицы с результатами экспериментов и графики.

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

### Методические указания

Важнейшими характеристиками усилителя являются: коэффициент усиления, полоса пропускания (диапазон рабочих частот усилителя), входное и выходное сопротивления, выходная мощность, коэффициент нелинейных искажений.

Коэффициент усиления – отношение установившихся значений входного и выходного сигналов усилителя. В зависимости от типа усиливаемой величины различают коэффициенты усиления:

- 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  $K_P = AP_{\text{ВЫХ}} / AP_{\text{ВХ}}$

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)  $K_H$ .

Рабочий режим схемы на биполярных транзисторах можно определить из следующей системы уравнений (для схемы ОК сопротивление резистора  $R_K=0$ ):

$U_{пит} = I_K \cdot R_K + U_{кэ} + I_э R_э$ ,  $E_б = I_б R_б + U_{бэ} + I_э R_э$ . Здесь  $E_б$  и  $R_б$  - эквивалентный источник питания и эквивалентное сопротивление в цепи базы, которые соответственно равны:

$$E_б = U_{пит} R_2 / (R_1 + R_2); R_б = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

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

$$I_э = I_K + I_б,$$

$$I_K = \beta I_б,$$

$$U_{бэ} \approx 0,7 \text{ В}.$$

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:

$K_U = (U_{вых} / U_{вх})$  - коэффициент усиления напряжения;

$R_{вх} = (U_{вх} / I_{вх})$  - входное сопротивление каскада;

$R_{вых} = (AU_{вых} / AI_{вых})$  - 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:

$$K_U = -(I_K / \phi_T) \cdot R_{к\text{ вых}},$$

$$R_{вх} = [\beta \cdot (\phi_T / I_K)],$$

$$R_{вых} = R_K$$

В этих уравнениях  $\phi_T$  - тепловой потенциал, который для нормальной температуры приблизительно равен 25 мВ;  $\hat{\alpha}_{вых}$  - коэффициент деления выходного напряжения:

$$R_{вых} = R_H / (R_K + R_H).$$

Для схемы ОК (рисунок 2) основные параметры рассчитываются через

малосигнальную схему замещения каскада:

$$KU = p \cdot R_3 / (1 + p \cdot R_3),$$

$$R_{вх} = \{[(\phi_T / I_k) + R_3] \cdot P\} \parallel R_б, R_{вых} = R_3 \parallel (\phi_T / I_k).$$

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

Все полупроводниковые транзисторы делятся на две группы: биполярные и униполярные (полевые) транзисторы. Основное различие заключается в том, что биполярные транзисторы управляются током, а полевые — напряжением (электрическим полем).

**Биполярным транзистором** называется полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими  $p-n$ -переходами. Биполярные транзисторы различаются по структуре. В зависимости от чередования областей различают биполярные транзисторы типа  $p-n-p$  и  $n-p-n$  (рис. 3.16). Транзисторы имеют три вывода: эмиттер (Э), базу (Б) и коллектор (К). В биполярных транзисторах типа  $n-p-n$  положительная полярность источника питания  $E_k$  подключается к коллектору, а в транзисторах типа  $p-n-p$  — к эмиттеру.

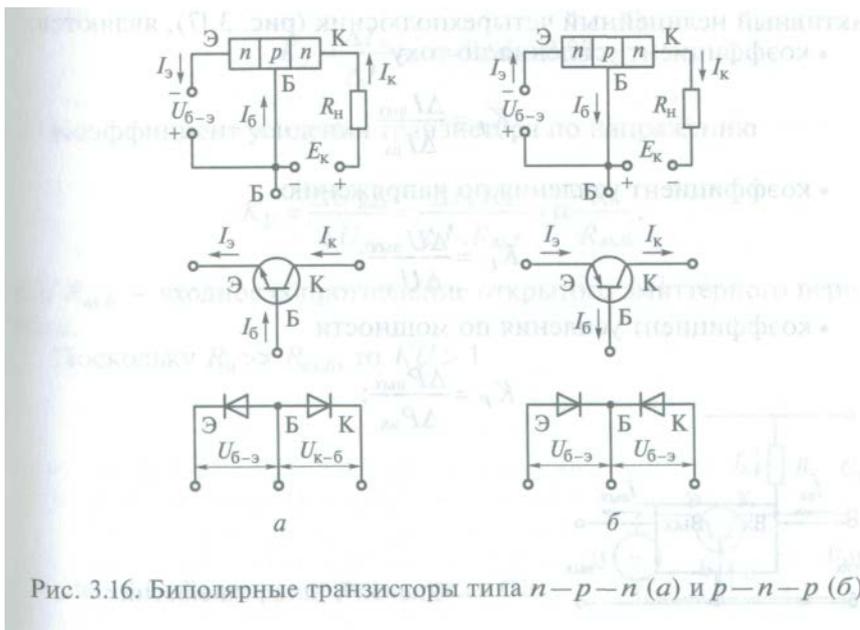


Рис. 3.16. Биполярные транзисторы типа  $n-p-n$  (а) и  $p-n-p$  (б)

Биполярные транзисторы классифицируются по двум параметрам: мощности и частотным свойствам. По мощности они подразделяются на маломощные ( $P_{вых} < 0,3$  Вт), средней мощности ( $0,3$  Вт  $< P_{вых} < 1,5$  Вт) и мощные ( $P_{вых} > 1,5$  Вт); по частотным свойствам — на низкочастотные ( $f_a <$

0,3 МГц), средней частоты ( $0,3 \text{ МГц} < f_a < 3 \text{ МГц}$ ), высокой частоты ( $3 \text{ МГц} < f_a < 30 \text{ МГц}$ ) и сверхвысокой частоты ( $f_a > 30 \text{ МГц}$ ).

Принцип действия биполярного транзистора основан на использовании физических процессов, происходящих при переносе основных носителей электрических зарядов из эмиттерной области в коллекторную через базу:

$$I_э = I_к + I_б,$$

где  $I_э, I_к, I_б$  — токи соответственно в цепи эмиттера, коллектора, базы.

Важнейшими параметрами, характеризующими качество транзистора, являются дифференциальный коэффициент передачи тока из эмиттера в коллектор —  $\alpha$  и дифференциальный коэффициент передачи тока из базы в коллектор —  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \text{ при } U_{к-э} = \text{const}; \beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \gg 1.$$

Современные транзисторы имеют  $\alpha = 0,9...0,99$  и  $\beta = 4... 10000$ . Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (рис. 3.17), являются:

- коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}},$$

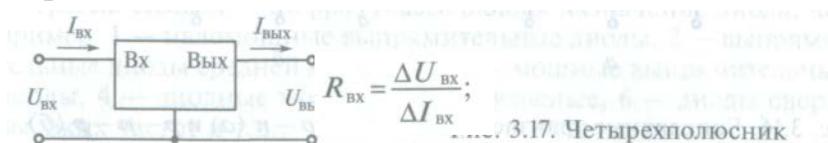
- коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}},$$

- коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}},$$

- входное сопротивление



- выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}$$

Обычно транзисторы включаются в электрическую схему таким образом, чтобы один из его электродов был входным, второй — выходным, а третий — общий для входа и выхода. В зависимости от этого различают три способа включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). Рассмотрим особенности каждой схемы.

В схеме с ОБ (рис. 3.18) входной сигнал поступает на эмиттер, а выходной снимается с коллектора. Входным сопротивлением схемы  $R_{вх}$  является сопротивление открытого эмиттерного  $p-n$ -перехода, которое составляет десятки ом. Выходное сопротивление определяется обратным включенным коллекторным переходом. Поэтому  $R_{вых} \gg R_{вх}$ .

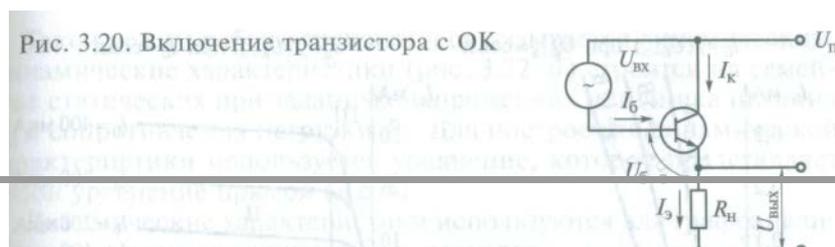
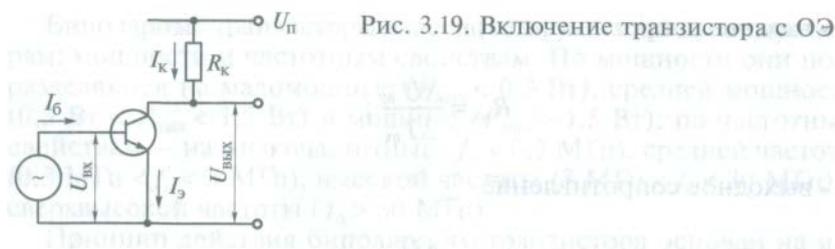
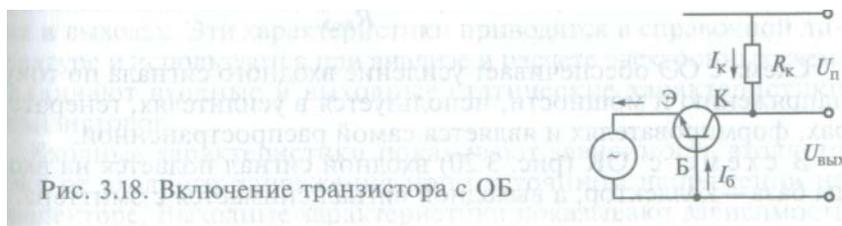
Коэффициент усиления транзистора с ОБ по току соответствует примерно коэффициенту передачи  $\alpha$ :

$$K_I \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_Э} \approx \alpha = 0,95 \dots 0,99.$$

Коэффициент усиления транзистора по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_Э R_{вх.б}} = \alpha \frac{R_H}{R_{вх.б}},$$

где  $R_{вх.б}$  — входное сопротивление открытого эмиттерного перехода. Поскольку  $R_H \gg R_{вх}$ , то  $K_U > 1$ .



Таким образом, схема включения транзистора с ОБ не обеспечивает усиление по току, однако усиливает входной сигнал по напряжению и мощности.

В схеме с ОЭ (рис. 3.19) входной сигнал поступает на входы база—эмиттер, а выходной снимается с коллектора.

Входное сопротивление  $R_{вх.э}$  схемы значительно больше, чем в схеме с ОБ:

$$R_{вх.э} = \frac{\Delta U_{э-б}}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_э R_{вх.б}}{\Delta I_б} \approx \beta R_{вх.б}$$

Входное сопротивление  $R_{вх.э}$  обычно составляет 1 ...3 кОм.

Выходное сопротивление схемы с ОЭ определяется обратным включенным коллекторным переходом и составляет сотни килоом, поэтому  $R_{вых} \gg R_{вх}$ .

$$K_I = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} \approx \beta \gg 1.$$

Коэффициент усиления схемы по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_к R_H}{\Delta I_б R_{вх.э}} \approx \beta \frac{R_H}{R_{вх.э}} > 1.$$

Коэффициент усиления схемы по току

Коэффициент усиления схемы по мощности равен произведению коэффициентов  $K_I$  и  $K_U$ :

$$K_P = K_I K_U = \beta^2 \frac{R_H}{R_{вх.э}} \gg 1.$$

Схема с ОЭ обеспечивает усиление входного сигнала по току, напряжению и мощности, используется в усилителях, генераторах, формирователях и является самой распространенной.

В схеме с ОК (рис. 3.20) входной сигнал подается на входы база — коллектор, а выходной сигнал снимается с эмиттера.

Входное сопротивление схемы  $R_{вх}$  велико и равно  $R_{вх} = R_H(\beta + 1)$ . Коэффициент усиления схемы с ОК по току

$$K_I = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \beta + 1 = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_э - \Delta I_к} = \frac{1}{1 - \alpha} \gg 1.$$

Коэффициент усиления схемы с ОК по напряжению

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вх} - U_{б-э}}{U_{вх}} < 1.$$

Коэффициент усиления схемы с ОК по мощности

$$K_P = K_I K_U \approx K_I > 1.$$

Схему с ОЭ часто называют эмиттерным повторителем, так как нагрузка включена в цепь эмиттера. Схема обеспечивает усиление по току, мощности, имеет коэффициент усиления по напряжению меньше единицы ( $K_U \ll 0,9 \dots 0,99$ ), отличается большим входным сопротивлением и малым выходным  $R_{вх} \gg R_{вых}$  и широко используется в качестве согласующего каскада.

Эмиттерный повторитель широко применяется в качестве входных или выходных каскадов в усилителях, в частности при работе на емкостную нагрузку или линию связи.

Статические характеристики транзисторов представляют собой графические зависимости между токами, протекающими в цепях транзистора, и напряжениями на их входах и выходах. Эти характеристики приводятся в справочной литературе и используются при анализе и расчете электронных схем. Различают входные и выходные статические характеристики транзисторов.

Входные характеристики показывают зависимость входного тока от входного напряжения при постоянном напряжении на Коллекторе. Выходные характеристики показывают зависимость выходного тока от напряжения на коллекторе при постоянном входном токе или напряжении. На рис. 3.21 приведены статические характеристики для схемы с ОЭ.

На выходной характеристике можно выделить три зоны, свойственные трем режимам работы транзисторов (см. рис. 3.21, б):

- область I — режим отсечки;
- область II — режим усиления;
- область III — режим насыщения.

Динамические характеристики транзисторов определяют режим их работы, в выходной цепи которого имеется нагрузка, а на вход подается усиливаемый сигнал (рис. 3.22). В схеме с ОЭ увеличение тока базы вызывает возрастание тока в цепи коллектора и уменьшение напряжения на коллекторе. Ток и напряжение на коллекторе связаны между собой уравнением

$$U_{к-э} = U_{п} - I_{к} R_{к}.$$

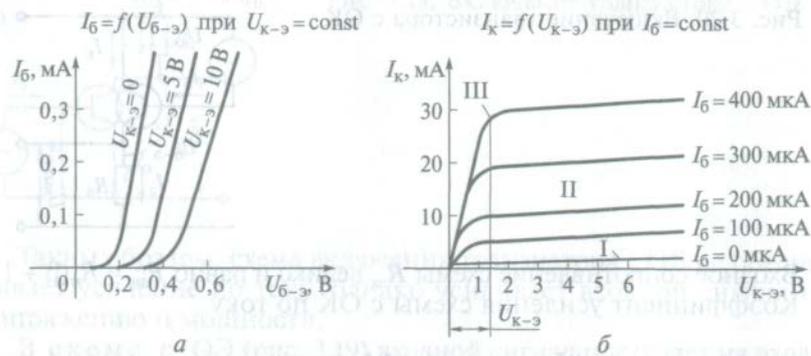


Рис. 3.21. Статические входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора с ОЭ

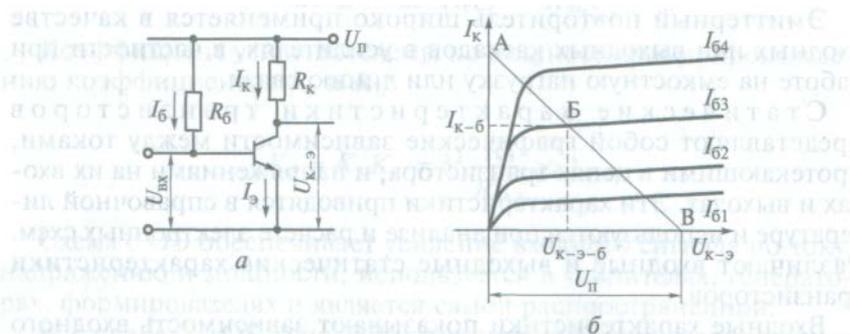


Рис. 3.22. Схема усилителя с ОЭ (а) и его выходная характеристика (б)

Такой режим работы транзисторов называется динамическим. Динамические характеристики (рис. 3.22, б) строятся на семействе статических при заданных напряжениях источника питания  $U_{\Pi}$  и сопротивлении нагрузки  $R_{\kappa}$ . Для построения динамической характеристики используется уравнение, которое представляет собой уравнение прямой (АВВ).

Динамические характеристики используются для графоаналитического расчета усилительных каскадов.

Биполярные транзисторы могут работать в линейном или ключевом режимах. В линейном режиме работают усилительные каскады, в ключевом — импульсные схемы. Важным вопросом при проектировании таких схем является правильный выбор транзисторов. В импульсных схемах транзисторы должны иметь малое напряжение насыщения, малое время рассасывания и большое быстродействие. Для ключевых режимов очень важным является время переключения транзистора из одного состояния в другое. В то же время для усилительного режима более важным являются его свойства, которые показывают возможность транзистора усиливать сигналы различных частот. Процессы включения и выключения транзисторного ключа показаны на рис. 3.23. При включении транзистора (рис. 3.23, а) в его базу подается прямоугольный импульс тока положительной полярности с крутым фронтом. Ток коллектора достигает установившегося значения не сразу после подачи тока в базу. Имеется некоторое время задержки  $t_{\text{зад}}$ , спустя которое появляется ток в коллекторе.

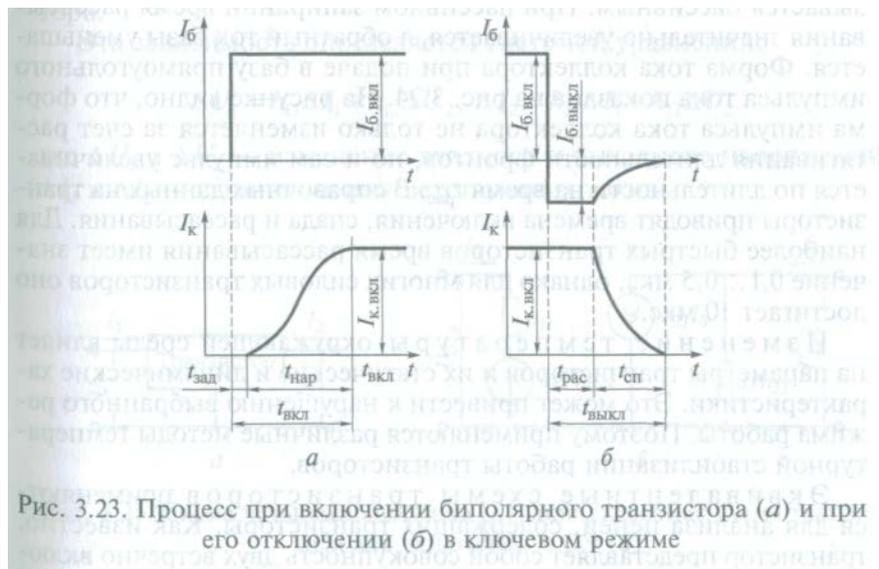


Рис. 3.23. Процесс при включении биполярного транзистора (а) и при его отключении (б) в ключевом режиме

Затем ток в коллекторе плавно нарастает и после времени  $t_{нар}$  достигает установившегося значения  $I_{к\ вкл}$ ,

$$T_{вкл} = t_{зад} + t_{нар} \gg$$

где  $t_{вкл}$  — время включения транзистора.

При выключении транзистора на его базу подается обратное напряжение, в результате чего ток базы меняет свое направление и становится равным  $I_{б\ выкл}$ . Пока происходит рассасывание неосновных носителей в базе, этот ток не меняет своего значения. Это время называется временем рассасывания  $t_{рас}$ . После окончания процесса рассасывания происходит спад тока базы, который продолжается в течение времени  $t_{сп}$ . Таким образом, время выключения транзистора равно:  $t_{выкл} = t_{рас} + t_{сп}$ .

Следует отметить, что при выключении транзистора, несмотря на изменение направления тока базы, транзистор в течение времени  $t_{рас}$  остается включенным и коллекторный ток  $I_{к\ вкл}$  не меняет своего значения. Спад тока коллектора начинается одновременно со спадом тока базы, и заканчиваются они практически одновременно.

Время рассасывания сильно зависит от степени насыщения транзистора перед его выключением. Минимальное время выключения получается при граничном режиме насыщения. Для ускорения процесса рассасывания в базу пропускают обратный ток, который зависит от обратного напряжения на базе.

Если к базе транзистора в процессе запираения не прикладывается обратное напряжение, то такое запираение транзистора называется пассивным. При пассивном запираении время рассасывания значительно увеличивается, а обратный ток базы уменьшается. Форма тока коллектора при подаче в базу прямоугольного импульса тока показана на рис. 3.24. На рисунке видно, что форма импульса тока коллектора не только изменяется за счет растягивания

длительности фронтов, но и сам импульс увеличивается по длительности на время  $t_{рас}$ . В справочных данных на транзисторы приводят времена включения, спада и рассасывания. Для наиболее быстрых транзисторов время рассасывания имеет значение 0,1... 0,5 мкс, однако для многих силовых транзисторов оно достигает 10 мкс.

Изменение температуры окружающей среды влияет на параметры транзисторов и их статические и динамические характеристики. Это может привести к нарушению выбранного режима работы. Поэтому применяются различные методы температурной стабилизации работы транзисторов.

## Расчет транзисторного усилительного каскада

В процессе выполнения задания необходимо определить:

- положение рабочей точки покоя и соответствующие ей значения токов  $I_{б0}$ ,  $I_{к0}$ ,  $I_{э0}$  и напряжений  $U_{бэ0}$ ,  $U_{кэ0}$ ;
- диапазон изменения входного  $\pm U_{м\text{ вх}}$  и выходного  $\pm U_{м\text{ вых}}$  напряжения;
- значения сопротивлений резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_э$ ,  $R_к$  и емкости конденсаторов  $C_э$ ,  $C_{п1}$  и  $C_{п2}$ ;
- параметры усилительного транзисторного каскада: входное  $R_{кас\text{к вх}}$  и выходное  $R_{кас\text{к вых}}$  сопротивления, коэффициенты усиления по току  $K_I$ , напряжению  $K_U$  и мощности  $K_P$ .

Тип биполярного транзистора для усилительного каскада МП41А. Предельно допустимые и  $h_б$ -параметры транзисторов приведены в таблице 2.1. Напряжение источника питания  $E_к = 13,5$  В.

Таблица 2.1 – Выбор типа биполярного транзистора

Номер варианта	Тип транзистора	h-параметры				Предельные значения		
		$h_{11б}, \text{Ом}$	$h_{12б}$	$h_{21б}$	$h_{22б}, \text{См}$	$U_{кэ}, \text{В}$	$I_к, \text{мА}$	$P_{доп}, \text{мВт}$
23	МП41А	25	$2 \cdot 10^{-3}$	-0,98	$1 \cdot 10^{-6}$	15	40	150

Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке. Причем мощность, требующаяся для управления, как правило, намного меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного и выходного сигналов совпадают.

В усилительном каскаде на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, в коллекторную цепь транзистора включен резистор  $R_к$ , с помощью которого формируется выходное напряжение.

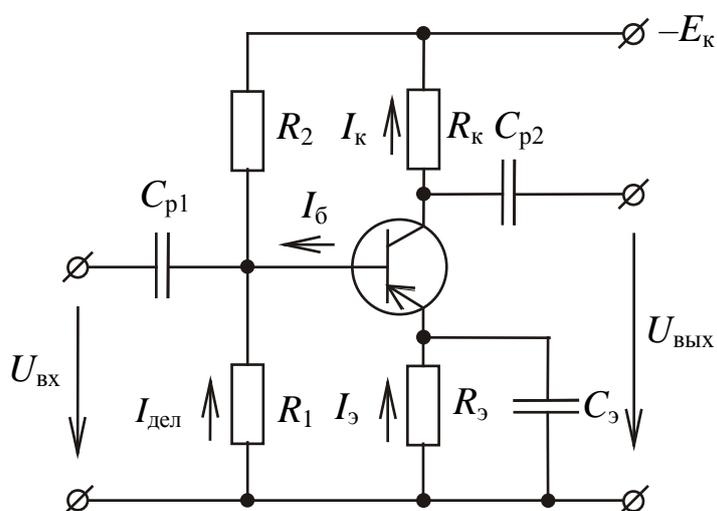


Рисунок 2.1 – Схема транзисторного усилительного каскада с эмиттерной стабилизацией рабочего режима

Делитель напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  определяет значение тока базы  $I_{б0}$ , обеспечивающего положение рабочей точки покоя  $P_T$  в режиме класса А. Для уменьшения влияния температуры на режим работы транзистора в цепь эмиттера включен резистор  $R_э$ , который осуществляет последовательную отрицательную обратную связь по постоянной составляющей. Конденсатор  $C_э$  исключает влияние отрицательной обратной связи по переменной составляющей. Разделительный конденсатор  $C_1$  устраняет влияние внутреннего сопротивления источника входного сигнала  $U_{вх}$  на режим работы транзистора по постоянному току. Конденсатор  $C_2$  обеспечивает выделение из коллекторного напряжения переменной составляющей  $U_{вых}$ , которая может подаваться на нагрузочный резистор  $R_n$ .  $R_k$  позволяет регулировать разность потенциалов  $U_{кэ}$ .

Начертим входную характеристику  $I_б = f(U_{бэ})$  при  $U_{кэ} = -5$  В и семейство выходных вольт-амперных характеристик  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_б = \text{const}$ , на которых по нескольким точкам построим кривую допустимой мощности  $P_k$ , рассеиваемой транзистором (рис. П2.1). Ниже этой кривой из точки  $U_{кэ} = 14$ , выбрав наиболее подходящий угол наклона, проведем нагрузочную линию  $U_{кэ} = E_k - I_k(R_k + R_э)$ , на которой выберем и отметим положение рабочей точки покоя  $P_T$  в режиме класса А и допустимые при этом пределы изменения амплитуды базового тока  $\pm I_{мб}$ , соответствующие максимальному значению входного сигнала. Положение рабочей точки на входной характеристике должно соответствовать значению тока  $I_{б0}$ , при котором выбрана рабочая точка на пересечении линии нагрузки и выходной характеристики.

На графиках выходных и входной характеристик изобразим (подобно рис. П.2) кривые  $i_k = I_{к0} + I_{мк} \sin(\omega t)$ ,  $u_{кэ} = U_{кэ0} + U_{мкэ} \sin(\omega t)$ ,  $i_б = I_{б0} + I_{мб} \sin(\omega t)$ . По графикам определим и значения:

$$I_{б0} = 0,3 \text{ мА};$$

$$\pm I_{мб} = \pm 0,5 (I_{б \text{ max}} - I_{б \text{ min}}); \quad (2.1)$$

$$I_{мб} = 0,5 (0,5 - 0,1) = 0,2 \text{ мА};$$

$$I_{к0} = 22 \text{ мА};$$

$$\pm I_{мк} = \pm 0,5 (I_{к \text{ max}} - I_{к \text{ min}}); \quad (2.2)$$

$$I_{мк} = 0,5 (34 - 8) = 13 \text{ мА};$$

$$I_{э0} = I_{б0} + I_{к0}; \quad (2.3)$$

$$I_{э0} = 0,0003 + 0,022 = 0,0223 \text{ А};$$

$$U_{бэ0} = 0,24 \text{ В};$$

$$\pm U_{мбэ} = \pm 0,5 (U_{б \text{ max}} - U_{б \text{ min}}); \quad (2.4)$$

$$U_{мбэ} = 0,5 (0,275 - 0,18) = 0,095 \text{ В}.$$

$$U_{кэ0} = 6,2 \text{ В}$$

$$\pm U_{мкэ} = \pm U_{м \text{ вых}} = \pm 0,5 (U_{кэ \text{ max}} - U_{кэ \text{ min}}). \quad (2.5)$$

$$U_{мкэ} = 0,5 (10,4 - 2,0) = 4,2 \text{ В}.$$

Рассчитаем значения  $h_э$ -параметров для схемы с общим эмиттером:

$$h_{11э} = h_{11б} / (1 + h_{21б});$$

$$h_{11э} = 25 / (1 + (-0,98)) = 1250 \text{ Ом}.$$

$$h_{12э} = (h_{11б} h_{22б} - h_{12б} h_{21б} - h_{12б}) / (1 + h_{21б});$$

$$h_{12\varepsilon} = (25 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,98) - 2 \cdot 10^{-3}) / (1 - 0,98) = -0,00075.$$

$$h_{21\varepsilon} = -h_{21\sigma} / (1 + h_{21\sigma});$$

$$h_{21\varepsilon} = -(-0,98) / (1 - 0,98) = 49.$$

$$h_{22\varepsilon} = h_{22\sigma} / (1 + h_{21\sigma});$$

$$h_{22\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-6} / (1 - 0,98) = 1 \cdot 10^{-5} \text{ См}$$

Для схемы включения транзистора с общим эмиттером определим входное сопротивление транзистора:

$$r_{\text{вх транз}} = h_{11\varepsilon};$$

$$r_{\text{вх транз}} = 1250 \text{ Ом.}$$

Определим коэффициент передачи тока:

$$\beta = h_{21\varepsilon};$$

$$\beta = 49.$$

Рассчитаем значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов:

$$R_3 = (0,2, \dots, 0,3) E_k / I_{30}; \quad (2.10)$$

При подстановке значений получаем:

$$R_3 = 0,25 \cdot \mathbf{13,5} / 0,0223 = 151,35 \text{ Ом.}$$

$$\text{Принимаем } I_{\text{дел}} = (2, \dots, 5) I_{60}; \quad I_{\text{дел}} = 3,5 \cdot 0,0003 = 0,00105 \text{ А.}$$

Рассчитаем делитель напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R_1 = (I_{30} R_3 + U_{6\varepsilon 0}) / I_{\text{дел}}; \quad (2.11)$$

$$R_1 = (0,0223 \cdot 151,35 + 0,24) / 0,00105 = 3442,95 \text{ Ом.}$$

$$R_2 = (E_k - I_{\text{дел}} R_1) / (I_{\text{дел}} + I_{60}); \quad (2.12)$$

$$R_2 = (13,5 - 0,00105 \cdot 3442,95) / (0,00105 + 0,0003) = 7323,15 \text{ Ом}$$

Рассчитаем напряжение, позволяющее регулировать разность потенциалов  $U_{\text{кэ}}$ .

$$R_k = (E_k - U_{\text{кэ}0} - I_{30} R_3) / I_{\text{к}0}; \quad (2.13)$$

$$R_k = (13,5 - 6,2 - 0,0223 \cdot 151,35) / 0,022 = 178,4 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем эквивалентное сопротивление базовой цепи для переменной составляющей входного тока:

$$R_6 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2); \quad (2.14)$$

$$R_6 = 3442,95 \cdot 7323,15 / (3442,95 + 7323,15) = 2341,9 \text{ Ом.}$$

Значения емкости конденсаторов при частотной полосе входного сигнала в пределах  $f_n = 100 \text{ Гц}$ ,  $f_b = 10000 \text{ Гц}$  определяются так:

$$C_3 = 10^7 / [(1, \dots, 2) 2\pi f_n R_3]; \quad (2.15)$$

$$C_{p1} = C_{p2} = 10^7 / [(1, \dots, 2) 2\pi f_n R_{\text{каск вх}}], \quad (2.16)$$

где  $C_3$ ,  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – в мкФ.

При подстановке значений получаем:

$$C_3 = 10^7 / [1,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 151,35] = 76,75 \text{ мкФ.}$$

Определим параметры усилительного каскада.

Входное и выходное сопротивления каскада определяются следующим образом:

$$R_{\text{каск вх}} = R_6 r_{\text{вх транз}} / (R_6 + r_{\text{вх транз}}); \quad (2.17)$$

$$R_{\text{каск вх}} = 2341,9 \cdot 1250 / (2341,9 + 1250) = 815 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{каск вых}} = R_k / (1 + h_{22\varepsilon} R_k); \quad (2.18)$$

$$R_{\text{каска вых}} = 178,4 / (1 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot 178,4) = 178,08 \text{ Ом.}$$

$$C_{p1} = C_{p2} = 10^7 / [1,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 815] = 13,03 \text{ мкФ.}$$

Коэффициенты усиления каскада без дополнительной внешней нагрузки, а также без учета внутреннего сопротивления источника входного сигнала имеют вид:

$$K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} \approx \beta ; K_I = 49. \quad (2.19)$$

$$K_U = -(\beta \cdot R_K) / R_{\text{каска вх}}; \quad (2.20)$$

$$K_U = -(49 \cdot 178,4) / 815 = -10,73.$$

$$K_P = K_I K_U; \quad (2.21)$$

$$K_P = 49 \cdot (-10,73) = -525,6.$$

Полезная выходная мощность каскада

$$P_{\text{вых}} = 0,5 (U_{\text{м вых}})^2 / R_K; \quad (2.22)$$

$$P_{\text{вых}} = 0,5 (4,2)^2 / 178,4 = 0,0494 \text{ Вт.}$$

Полная мощность, расходуемая источником питания,

$$P_0 = I_{\text{э0}} E_K + I_{\text{дел}}^2 \cdot (R_1 + R_2) + I_{\text{б0}}^2 R_2; \quad (2.23)$$

$$P_0 = 0,0223 \cdot 13,5 + (0,00105)^2 \cdot (3442,95 + 7323,15) + (0,0003)^2 \cdot 7323,15 = 0,314 \text{ Вт.}$$

Вычислим электрический КПД усилительного каскада

$$\eta_{\text{э}} = (P_{\text{вых}} / P_0) 100\%; \quad (2.24)$$

$$\eta_{\text{э}} = (0,0494 / 0,314) \cdot 100\% = 15,7\%.$$

Вычислим коэффициент нестабильности каскада по коллекторному току (желательно, чтобы он был меньше)

$$S = \beta / (1 + \beta \gamma); \quad (2.25)$$

$$\text{где } \gamma = R_3 / (R_6 + R_3). \quad (2.26)$$

$$\gamma = 151,35 / (2341,9 + 151,35) = 0,061;$$

$$S = 49 / (1 + 49 \cdot 0,061) = 12,33.$$

$$S \approx (R_6 + R_3) / [(1 + h_{21\beta}) R_6 + R_3], \quad (2.27)$$

$$S \approx (2341,9 + 151,35) / ((1 - 0,98) \cdot 2341,9 + 151,35) = 12,58.$$