

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 09.04.2024 12:50:56
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
«15» 04 2021 г.



Сборник из восьми практических работ для расчета аналоговых устройств

Методические указания по выполнению практических работ по дисциплинам «Электротехника, электроника, схемотехника» и «Основы электроники» для студентов специальностей 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 «Программная инженерия»

Курск 2021

УДК 004.92(942)

Составитель: М.В. Бобырь

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент Т.Н. Конаныхина

1. Сборник из восьми практических работ для расчета аналоговых устройств: методические указания по выполнению практических работ по дисциплинам «Электротехника, электроника, схемотехника» и «Основы электроники» для студентов специальностей 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 «Программная инженерия» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: М.В. Бобырь. – Курск, 2021. – 44 с.: ил. 16, табл.9. – Библиогр.: с.44.

Рассмотрены восемь практических работ для расчета аналоговых устройств. В учебно-методической работе содержатся задания для выполнения практических работ.

Методические указания соответствуют требованиям программ дисциплин «Электротехника, электроника, схемотехника» и «Основы электроники».

Предназначены для студентов специальностей 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 «Программная инженерия»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 18.08.21 Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 2,56 Уч.-изд. л. 2,3 Тираж 50 экз. Заказ. 279 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1: «АКТИВНЫЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК»

Активный четырехполюсник (АЧ) – это многополюсник, имеющий четыре точки подключения. При этом две точки являются входом аналоговой схемы, а две другие её выходом.

Состояния входных и выходных сигналов определяются четырьмя параметрами: напряжением и током во входной (Δu_{11} , Δi_1) и выходной (Δu_{22} , Δi_2) цепях (рис. 1).



Рис. 1 Схема активного четырёхполюсника

Как правило, на входные зажимы активного четырехполюсника подаётся исходный сигнал, с выходных снимается преобразованный. Четырёхполюсниками являются: стабилизаторы напряжения, электронные усилители, фильтры и т.д.

Различают 4 вида активных четырехполюсников:

- источники напряжения, управляемые напряжением – ИНУН;
- источники напряжения, управляемые током – ИНУТ;
- источники тока, управляемые током – ИТУТ;
- источники тока, управляемые напряжением – ИТУН.

Категории ИТУТ соответствуют биполярные транзисторы. Малые приращения входного напряжения Δu_{11} и выходного тока Δi_2 являются функциями входного тока Δi_1 и выходного напряжения Δu_{22} :

$$\Delta u_{11} = h_{11}\Delta i_1 + h_{12}\Delta u_{22};$$

$$\Delta i_2 = h_{21}\Delta i_1 + h_{22}\Delta u_{22}.$$

Параметры активного четырехполюсника:

$$h_{11} = \Delta u_{11} / \Delta i_1 \text{ – входное сопротивление (кОм) при } \Delta u_{22} = 0.$$

$$h_{12} = \Delta u_{11} / \Delta u_{22} \text{ – коэффициент обратной связи при } \Delta i_1 = 0.$$

$$h_{21} = \Delta i_2 / \Delta i_1 \text{ – коэффициент передачи тока при } \Delta u_{22} = 0.$$

$$h_{22} = \Delta i_2 / \Delta u_{22} \text{ – выходная проводимость (мСм) при } \Delta i_1 = 0.$$

Выходное напряжение на нагрузке равно

$$\Delta u_{22} = -h_{21} \Delta i_1 R_{\text{ЭКВ}}.$$

Эквивалентная схема активного четырёхполюсника приведена на рисунке 2.

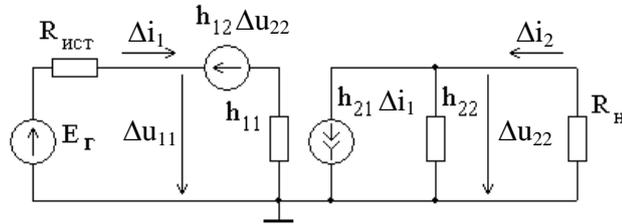


Рис. 2 Эквивалентная схема активного четырёхполюсника

Эквивалентное сопротивление $R_{\text{ЭКВ}}$ включает в себя нагрузку $R_{\text{н}}$ и выходную проводимость четырехполюсника h_{22} :

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{н}} \parallel \frac{1}{h_{22}} = \frac{R_{\text{н}}}{1 + h_{22} R_{\text{н}}}.$$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \left| \frac{\Delta u_2}{E_r} \right| = \frac{h_{21} \Delta i_1 R_{\text{ЭКВ}}}{\Delta i_1 (R_{\text{ист}} + R_{\text{вх}})} = \frac{h_{21} R_{\text{ЭКВ}}}{R_{\text{ист}} + R_{\text{вх}}},$$

где $R_{\text{ист}}$ – внутреннее сопротивление источника напряжения.

Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ активного четырехполюсника рассчитывается как:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta u_{11}}{\Delta i_1} = \frac{h_{11} \Delta i_1 + h_{12} \Delta u_{22}}{\Delta i_1} = h_{11} - h_{21} h_{12} R_{\text{ЭКВ}}.$$

При отключенной нагрузке, т.е. при $R_{\text{н}} = \infty$, эквивалентное сопротивление холостого хода найдется:

$$R_{\text{ЭКВ.ХХ}} = \frac{1}{h_{22}}.$$

И тогда входное сопротивление холостого хода определится как:

$$R_{\text{вх.ХХ}} = h_{11} - \frac{h_{21} h_{12}}{h_{22}},$$

и усиление будет максимальным:

$$K_{u.OC} = \frac{h_{21}}{h_{22} (R_{\text{ист}} + R_{\text{вх.ХХ}})}.$$

Задание для выполнения расчетной работы:

- 1) Построить график входной характеристики по табл. 1.
- 2) Вычислить дифференциальное входное сопротивление h_{11} (в кОм) в заданной рабочей точке (при заданном в табл. 2 токе $I_{1.0}$).
- 3) По выходным характеристикам (рисунка 4 согласно варианту) вычислить дифференциальные параметры h_{21} и h_{22} (h_{22} – в мСм).
- 4) Рассчитать эквивалентное сопротивление $R_{\text{ЭКВ}}$, входное сопротивление четырехполюсника $R_{\text{ВХ}}$, коэффициент усиления по напряжению при отключенной нагрузке $K_{u \text{ ХХ}}$ и при подключении нагрузки K_u .

Таблица 1

**Данные для построения графика входной характеристики
активного четырехполюсника**

u_{11} , мВ	i_1 , мкА	u_{11} , мВ	i_1 , мкА
5	0.53	105	35.8
10	1.11	110	40.1
15	1.75	115	44.9
20	2.46	120	50.1
25	3.24	125	55.9
30	4.11	130	62.3
35	5.07	135	69.4
40	6.13	140	77.2
45	7.30	145	85.9
50	8.59	150	95.4
55	10.0	155	106.0
60	11.6	160	117.7
65	13.3	165	130.6
70	15.3	170	144.8
75	17.4	175	160.6
80	19.8	180	178.0
85	22.4	185	197.2
90	25.2	190	218.5
95	28.4	195	242.0
100	31.9	200	268.0

График описывающий входную вольт-амперную характеристику активного четырёхполюсника, составленный по данным таблицы 1 должен выглядеть аналогично графику, представленному на рисунке 3.

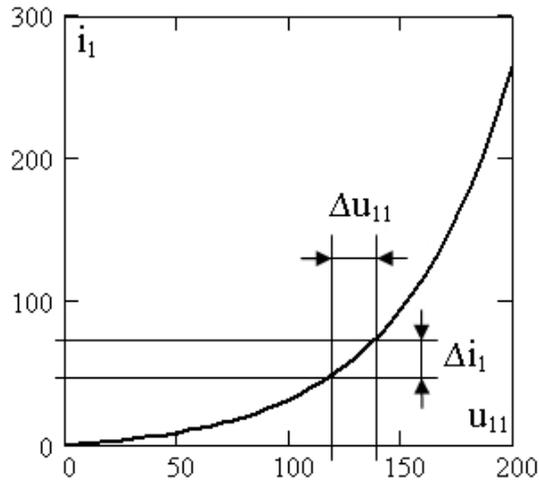
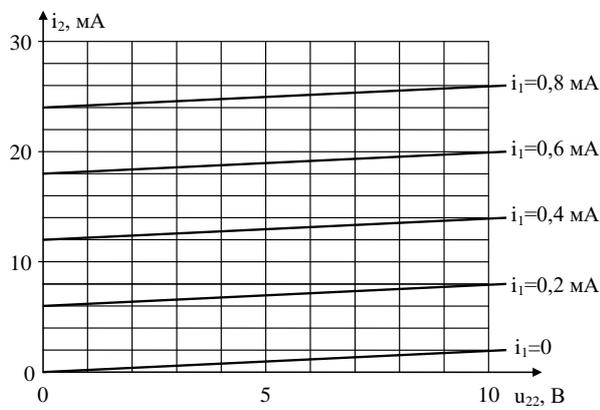
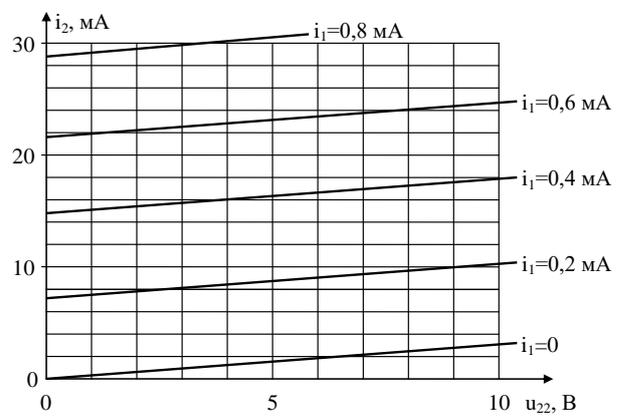


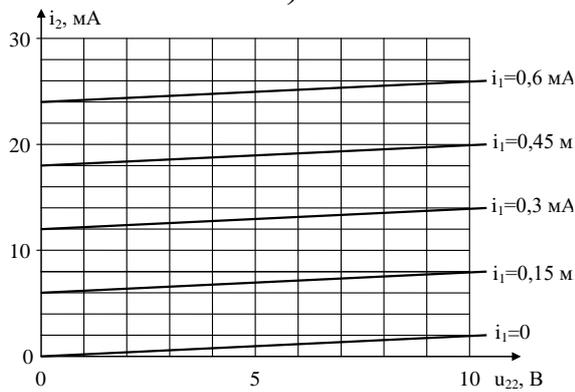
Рис. 3 Входная характеристика активного четырехполюсника



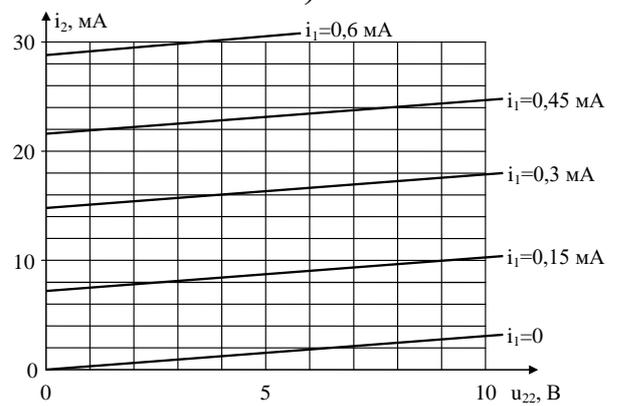
а)



б)



в)



г)

Рис. 4 Выходные характеристики: а – тип 1; б – тип 2; в – тип 3; г – тип 4

Таблица 2

**Варианты заданий для расчета параметров активного
четырёхполюсника**

№	Ток покоя $I_{1.0}$, мкА	Тип выходных характеристик	h_{12}	Нагрузка R_H , кОм	$R_{ист}$, кОм
1	105	1	0.0004	3.0	0.25
2	65	2	0.0005	2.5	0.33
3	70	3	0.0003	3.3	0.40
4	100	4	0.0006	2.7	0.30
5	80	1	0.0002	3.2	0.35
6	85	2	0.0004	3.5	0.25
7	90	3	0.0005	2.4	0.33
8	75	4	0.0003	3.0	0.40
9	110	1	0.0006	2.5	0.30
10	70	2	0.0002	3.3	0.35
11	90	3	0.0004	2.7	0.25
12	60	4	0.0005	3.2	0.33
13	95	1	0.0003	3.5	0.40
14	65	2	0.0006	2.4	0.30
15	80	3	0.0002	3.0	0.35
16	75	4	0.0004	2.5	0.25
17	105	1	0.0005	3.3	0.33
18	60	2	0.0003	2.7	0.40
19	85	3	0.0006	3.2	0.30
20	100	4	0.0002	2.5	0.35
21	65	1	0.0003	3.3	0.25
22	95	2	0.0005	2.7	0.33
23	70	3	0.0006	3.2	0.40
24	90	4	0.0003	3.5	0.35
25	110	1	0.0005	2.4	0.30
26	125	2	0.0002	2.5	0,25

Пример расчета параметров активного четырёхполюсника для варианта №26 (таблица 2).

Рассчитаем дифференциальное входное сопротивление h_{11} , в кОм в заданной рабочей точке $I_{10}=125$ мА (таблица 1).

$$h_{11} = \frac{\Delta u_{11}}{\Delta i_1} = \frac{165 - 160}{130.6 - 117.7} = 0,388 \text{ кОм.}$$

Далее по выходной характеристики – тип 2, согласно варианту (рис. 4) вычислим дифференциальные параметры h_{21} и h_{22} .

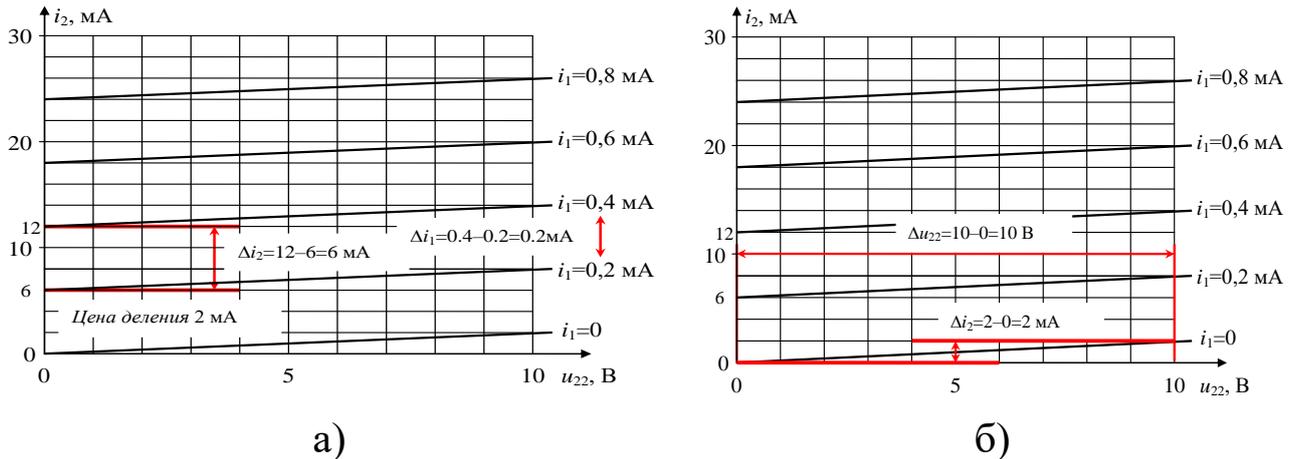


Рис.5 Выходные характеристики – тип 2: а – расчет h_{21} ; б – расчет h_{22}

Найдем коэффициент передачи тока (рис. 5, а):

$$h_{21} = \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1} = \frac{12 - 6}{0.4 - 0.2} = 30.$$

Рассчитаем выходную проводимость (рис. 5, б):

$$h_{22} = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_{22}} = \frac{2 - 0}{10 - 0} = 0.2 \text{ мСм}.$$

Далее согласно четвертого задания определяем эквивалентное сопротивление $R_{\text{экв}}$,

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_{\text{н}}}{1 + h_{22} R_{\text{н}}} = \frac{2.5}{1 + 0.2 \cdot 2.5} = 1.67 \text{ кОм}.$$

Рассчитываем входное сопротивление четырехполюсника $R_{\text{вх}}$

$$R_{\text{вх}} = h_{11} - h_{21} h_{12} R_{\text{экв}} = 0,388 - 30 \cdot 0,0002 \cdot 1,67 = 0,378 \text{ кОм}.$$

Находим коэффициент усиления по напряжению:

– при подключенной нагрузке K_u

$$K_u = \frac{h_{21} R_{\text{экв}}}{R_{\text{ист}} + R_{\text{вх}}} = \frac{30 \cdot 1,67}{0,25 + 0,378} = 79,8;$$

– при отключенной нагрузке $K_{u \text{ xx}}$

с учётом входного сопротивления холостого хода

$$R_{\text{вх xx}} = h_{11} - \frac{h_{21} h_{12}}{h_{22}} = 0,388 - \frac{30 \cdot 0,0002}{0,2 \text{ мСм}} = 0,358;$$

$$K_{u \text{ xx}} = \frac{h_{21}}{h_{22} (R_{\text{ист}} + R_{\text{вх xx}})} = \frac{30}{0,2(0,25 + 0,358)} = 247.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2: «ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ»

Стабилизатор напряжения – это преобразователь электрической энергии, позволяющий обеспечить на выходе аналоговой схемы требуемое напряжение в заданных пределах, при больших изменениях, напряжения на входе схемы, так и тока в её нагрузке. По типу выходного напряжения стабилизаторы делятся на стабилизаторы постоянного и переменного тока.

Стабилизаторы напряжения в зависимости от расположения регулирующего элемента делятся на два типа:

- последовательный, регулирующий элемент включен последовательно с нагрузкой;
- параллельный, регулирующий элемент включен параллельно нагрузке.

В зависимости от способа стабилизации стабилизаторы делятся на:

- параметрический, для работы используется участок пробоя вольт-амперной характеристики стабилитрона.
- компенсационный стабилизация выходного напряжения осуществляется за счет использования обратной связи.

Структурная схема параллельного параметрического стабилизатора на стабилитроне приведена на рисунке 1.

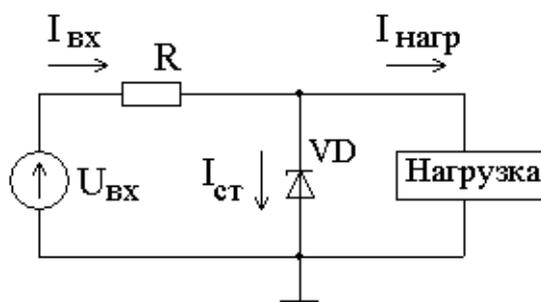


Рис. 1 Структурная схема параллельного параметрического стабилизатора напряжения

В этой схеме стабильность выходного напряжения определяется параметрами стабилитрона VD .

Условия нормальной работы параметрического стабилизатора заключаются в следующем:

Входное напряжение $U_{вх}$ должно быть больше напряжения пробоя стабилитрона $U_{ст}$. При этом номинальное входное напряжение рассчитывается как

$$U_{вх ном} = U_{ст} + (I_{ст ном} + I_{н ном})R.$$

Ток, проводящий через стабилитрон VD должен находиться в заданном диапазоне значений $I_{ст min} \div I_{ст max}$ ($I_{ст min}$ и $I_{ст max}$ – предельно допустимые токи стабилитрона). При выполнении этого условия $I_{ст min} < I_{ст} < I_{ст max}$ напряжение на нагрузке $U_{вых} = U_{ст}$ стабильно. Для ограничения тока через стабилитрон устанавливается балластный резистор R , номинал которого определяется по формуле

$$R = \frac{U_{вх ном} - U_{ст}}{I_{вх ном} + I_{н ном}}.$$

На балластном резисторе падает разность напряжений $U_{вх} - U_{ст}$, а напряжение $U_{ст}$ приложено к нагрузке. Колебания входного напряжения $U_{вх}$ и/или тока нагрузки $I_{нагр}$ приводят к изменению тока через стабилитрон $I_{ст}$.

Наибольший ток через стабилитрон протекает при максимальном входном напряжении и минимальном токе нагрузки

$$U_{вх max} = U_{ст} + (I_{ст max} + I_{н min})R.$$

Наименьший ток стабилитрона при минимальном входном напряжении и максимальном токе нагрузки

$$U_{вх min} = U_{ст} + (I_{ст min} + I_{н max})R.$$

С учетом данной формулы максимальный ток на нагрузке определится

$$I_{н max} = \frac{U_{вх min} - U_{ст}}{R} - I_{ст min}.$$

Качество работы аналоговой схемы параметрического стабилизатора напряжения оценивает коэффициент стабилизации, который определяется как

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вых}} = \left(\frac{R}{r_{ст}} + 1\right) \cdot \frac{U_{ст}}{U_{вх ном}},$$

где $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вых}$ – изменение входного и выходного напряжения, соответственно; $r_{ст}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Коэффициент полезного действия стабилизатора $\eta_{ст}$ – это отношение мощности P_H , отдаваемой в нагрузку, к мощности $P_{пот}$, потребляемой от первичного источника питания:

$$\eta_{ст} = \frac{P_H}{P_{пот}} = \frac{U_{ст} I_{H ном}}{U_{вх ном} (I_{ст ном} + I_{H ном})}$$

Задание для выполнения расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Сопротивление балластного резистора R .
2. В зависимости от варианта рассчитать: максимально допустимый ток нагрузки $I_{H max}$; номинальный ток в нагрузке $I_{H ном}$; для расчета принять, что минимальный ток в нагрузке равен $I_{H min} = 0$.
3. Изменение выходное напряжение при номинальном токе нагрузки $I_{H ном}$, если входное напряжение изменяется от $U_{вх min}$ до $U_{вх max}$.
4. Коэффициент полезного действия стабилизатора напряжения.

Таблица 1

Варианты заданий для расчета параметрического стабилизатора напряжения

	$U_{ст},$ В	$I_{ст.min},$ мА	$I_{ст.max},$ мА	$I_{H.max},$ мА	$U_{вх.mi},$ н, В	$U_{вх.но},$ м, В	$U_{вх.m},$ ax, В	$R,$ кОм	$r_{ст},$ Ом
1	5,6	3	55	25		18			1,0
2	5,6	3	55	20				0,4	1,4
3	5,6	3	55	30			33,1		1,2
4	5,6	3	159		22,2			0,2	1,8
5	5,6	3	159	76			37,4		1,5
6	6,8	3	45	20		17			2,1
7	6,8	3	45	18		20			5,0
8	6,8	3	45		12,4			0,2	4,5
9	6,8	3	119	50		24			2,0
10	6,8	3	119	45			18,7		1,5
11	6,8	3	119	55	15,5				1,6
12	7,5	2	20	10				0,4	2,7
13	7,5	2	20	12		16			4,0
14	7,5	2	20		13,5			0,6	6,5
15	8,2	3	18	8			19		8,4
16	8,2	3	18	10	14,7				3,2
17	8,2	3	18	6				0,7	3,0

Продолжение таблицы 1

18	9,1	2	22	12			20,1		2,8
19	9,1	2	22		16,3			0,6	2,6
20	10	1	79	40		22			2,4
21	10	1	79		19			0,25	2,2
22	12	3	67	30		22			2,0
23	12	3	67	25				0,3	1,8
24	15	1	45	20			33		1,5
25	15	1	45		23			0,5	1,2
26	10	2	48	20		22			1,5

Пример расчета параметров стабилизатора напряжения для варианта №26 (таблица 1).

Сначала найдем номинальные значения токов стабилизатора и нагрузки:

$$I_{\text{ст.ном}} = \frac{I_{\text{ст.макс}} + I_{\text{ст.мин}}}{2} = \frac{48 + 2}{2} = 25 \text{ мА.}$$

$$I_{\text{н.ном}} = \frac{I_{\text{н.макс}} + I_{\text{н.мин}}}{2} = \frac{20 + 0}{2} = 10 \text{ мА.}$$

Далее рассчитаем номинал балластного резистора

$$R = \frac{U_{\text{вх.ном}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст.ном}} + I_{\text{н.ном}}} = \frac{22 - 10}{25 + 10} = 0.343 \text{ кОм.}$$

Зная балластное сопротивление, определим максимальное и минимальное выходные напряжения

$$U_{\text{вх.макс}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст.макс}} + I_{\text{н.мин}})R = 10 + 48 \cdot 0.343 = 26.5 \text{ В.}$$

$$U_{\text{вх.мин}} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст.мин}} + I_{\text{н.макс}})R = 10 + (2 + 20) \cdot 0.343 = 17.5 \text{ В.}$$

Далее рассчитаем коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения

$$K_{\text{ст}} = \left(\frac{R}{r_{\text{ст}}} + 1 \right) \cdot \frac{U_{\text{ст}}}{U_{\text{вх.ном}}} = \left(\frac{343}{1.5} + 1 \right) \cdot \frac{10}{22} = 104.4.$$

Зная номинал коэффициента стабилизации, определим изменение выходного напряжения при номинальном токе нагрузки

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}} \Rightarrow \Delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{K_{\text{ст}}} = \frac{26.5 - 17.5}{104.4} = 0.086 \text{ В.}$$

Коэффициент полезного действия стабилизатора напряжения

$$\text{определится } \eta_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{ст}} I_{\text{н.ном}}}{U_{\text{вх.ном}} (I_{\text{ст.ном}} + I_{\text{н.ном}})} = \frac{10 \cdot 10}{22(25 + 10)} = 0.13.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3: «УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ»

Усилительный каскад с емкостными связями на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером широко применяется для усиления сигналов переменного тока как в исполнении на дискретных компонентах, так и в составе интегральных микросхем. На рисунке 1 приведена схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером.

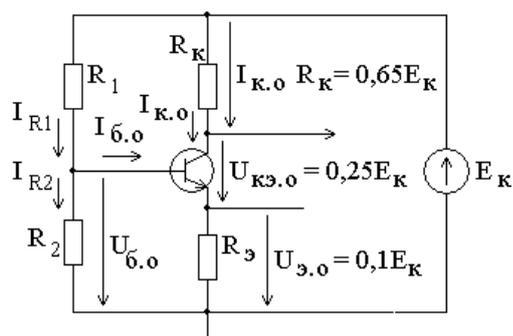


Рис. 1 Схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

1-й способ расчета

Резистор $R_э$ в цепи эмиттера включен для стабилизации статического режима транзистора за счет отрицательной обратной связи по постоянному току. Напряжение $U_{э.о}$ на этом резисторе в режиме покоя можно принять равным $U_{э.о} = 0,1 \cdot E_к$.

В статическом состоянии (в покое) рабочая точка характеризуется током коллектора покоя $I_{к.о}$ и напряжением коллектор-эмиттер $U_{кэ.о}$. Эти значения связаны уравнением *статической линии нагрузки*

$$I_{к.о} = \frac{E_к - U_{э.о} - U_{кэ.о}}{R_к}.$$

Напряжение покоя $U_{кэ.о}$ принимаем равным $0,25 E_к$, после чего можно вычислить ток коллектора $I_{к.о}$:

Из формулы тока коллектора

$$I_к = h_{21э} I_б + h_{22э} U_{кэ}$$

находим ток базы покоя $I_{б.о}$:

$$I_{\text{б.о}} = \frac{I_{\text{к.о}} - h_{22\varepsilon} U_{\text{кэ.о}}}{h_{21\varepsilon}}.$$

Чтобы рассчитать сопротивления R_1 и R_2 , необходимо задаться значениями токов I_{R1} и I_{R2} . Выбираем компромиссное условие:

– ток $I_2 = 5 \cdot I_{\text{б.о}}$;

– ток $I_1 = 6 \cdot I_{\text{б.о}}$.

Теперь, используя значения токов I_1 и I_2 , определяем номиналы сопротивлений делителя R_1 - R_2 задающего требуемую *точку покоя* ($I_{\text{к.о}}$; $U_{\text{кэ.о}}$) в статическом режиме:

$$R_1 = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{б.о}}}{I_1};$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{б.о}}}{I_2} = \frac{U_{\text{э.о}} + U_{\text{бэ}}}{I_2}.$$

Полученные значения сопротивлений следует округлить до ближайших стандартных номиналов.

При вычислениях, независимо от типа транзистора (n - p - n или p - n - p), все значения напряжений, включая $U_{\text{бэ}}$, равное 0,6 В для кремниевого или 0,2 В для германиевого транзистора, берутся по модулю, без учета полярности источника питания.

Сопротивление резистора R_3 равно

$$R_3 = \frac{U_{\text{э.о}}}{I_{\text{э.о}}} = \frac{U_{\text{э.о}}}{I_{\text{к.о}} + I_{\text{б.о}}}.$$

2-й способ расчета

Согласно теореме об эквивалентном источнике ЭДС, заменим, как показано на рисунке 2, резисторный делитель R_1 - R_2 (см. рис. 1) базовой цепи эквивалентным генератором с э.д.с., равной

$$E_{\text{б}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_{\text{к}}, \text{ и сопротивлением } R_{\text{б}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

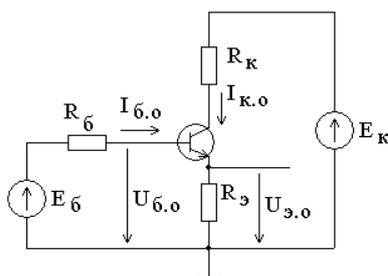


Рис. 2 Эквивалентная схема усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Для данной схемы определяем номинал базового сопротивления, так же, как и в предыдущей схеме обеспечивающий ток базы покоя $I_{б.о.}$, задающий требуемую *точку покоя* ($I_{к.о.}$; $U_{кэ.о.}$) в статическом режиме

$$R_{б} = 0,3 \cdot h_{21э} \cdot R_{э}.$$

Далее определяем напряжение эквивалентного источника ЭДС

$$E_{б} = U_{б.о.} + I_{б.о.} \cdot R_{б}.$$

Затем рассчитываем сопротивление R_1

$$R_1 = \frac{R_{б} \cdot E_{к}}{E_{б}},$$

и сопротивление R_2

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{б}}{R_1 - R_{б}}.$$

Полученные значения сопротивлений округляем до ближайших стандартных номиналов.

После расчета статического режима, осуществляем расчет динамического режима.

Схема усилительного каскада с емкостными связями на биполярном транзисторе с общим эмиттером приведена на рисунке 3.

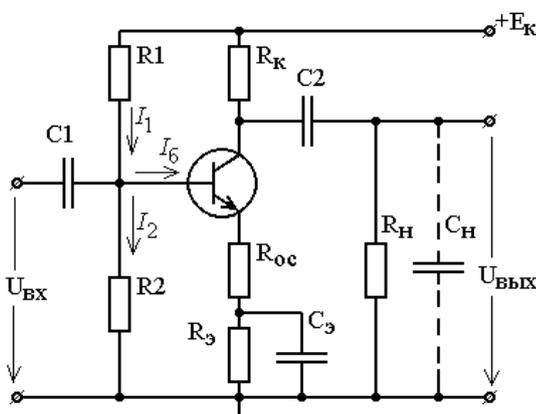


Рис. 3 Схема усилительного каскада с емкостными связями на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Конденсатор C_1 изолирует вход каскада по постоянному току и соединяет его с источником сигнала по переменному току. Конденсатор C_2 выполняет такую же функцию по отношению к выходу каскада и нагрузке. Оба конденсатора должны иметь достаточно малое сопротивление на частоте сигнала.

Для переменного тока реактивное сопротивление конденсатора C_2 мало и поэтому сопротивления нагрузки и коллектора включены параллельно: $R_{к.н} = R_k // R_H$. Коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада в области средних частот равен

$$K_{u.o} = - \frac{h_{21э} \cdot R_{к.н}}{R_{вх.тр} \cdot (1 + h_{22э} \cdot R_{к.н})}$$

где $R_{вх.тр}$ – входное сопротивление транзистора (знак “–” означает инверсию входного сигнала на выходе усилителя).

Без резистора $R_{ос}$ в цепи эмиттера входное сопротивление транзистора минимально и равно $R_{вх.тр} = h_{11э}$, и усиление максимально.

$$h_{11э} = \frac{\phi_m}{I_{б.о}} = \frac{26 \text{ мВ}}{I_{б.о}}$$

Резистор $R_{ос}$ увеличивает $R_{вх.тр}$:

$$R_{вх.тр.ос} = h_{11э} + (h_{21э} + 1)R_{ос}$$

и во столько же раз снижает усиление:

$$K_{u.ос} = \frac{h_{21э} R_{к.н}}{R_{вх.тр.ос} (1 + h_{22э} R_{к.н})}$$

Величина $R_{ос}$ выбирается, исходя из заданного коэффициента усиления $K_{u.ос}$.

Нижняя граничная частота, на которой усиление уменьшается в $\sqrt{2}$ раз, равна

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}$$

Постоянная времени усилителя в области нижних частот τ_H определяется постоянными времени трех цепей, в которые входят конденсаторы:

$$\frac{1}{\tau_H} = \frac{1}{\tau_{H1}} + \frac{1}{\tau_{H2}} + \frac{1}{\tau_{Hэ}}$$

Постоянная времени входной цепи определяется как $\tau_{H1} = R_{вх}C_1$, где входное сопротивление усилителя равно эквивалентному сопротивлению параллельно включенных $R_{вх.тр.ос}$, R_1 и R_2 :

$$R_{вх} = \frac{1}{\frac{1}{R_{вх.тр.ос}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Постоянная времени выходной цепи

$$\tau_{н2} = (R_k + R_H)C_2.$$

Постоянная времени цепи эмиттера

$$\tau_{нэ} = \left[\frac{h_{11э}}{h_{21э} + 1} + R_{oc} \right] \cdot C_э.$$

Исходя из заданной нижней частоты усилителя f_H , можно определить требуемую величину постоянной времени τ_H и найти значения $\tau_{н1}$, $\tau_{н2}$ и $\tau_{нэ}$. Для расчета целесообразно принять постоянные времени всех трех цепей одинаковыми:

$$\tau_{н1} = \tau_{н2} = \tau_{нэ} = 3 \tau_H.$$

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Двумя способами статический режим работы усилительного каскада на биполярном транзисторе.
2. Исходя из заданной нижней частоты f_H и коэффициента усиления $K_{и.ос}$, емкости конденсаторов C_1 , C_2 , $C_э$ для усилителя с емкостными связями на биполярном транзисторе.

Таблица 1

Варианты заданий для расчета усилительного каскада

№	$h_{21э}$	$h_{22э}$, мСм	E_k , В	R_k , кОм	R_H , кОм	$K_{и.ос}$	f_H , Гц
1	50	0,05	14	6	3	13	50
2	60	0,08	10	5	2,5	10	40
3	65	0,06	15	7	3,5	12	60
4	40	0,05	12	6	3	15	45
5	55	0,09	15	8	4	14	75
6	60	0,07	10	5	2,5	12	80
7	70	0,06	12	5	2,5	10	100
8	65	0,08	13	6	3	12	30
9	60	0,06	16	8	4	13	45
10	50	0,05	12	5	2,5	12	70
11	45	0,09	14	7	3,5	14	50
12	40	0,07	15	8	4	13	40
13	55	0,04	10	4	2	10	60
14	60	0,08	13	6	3	15	45
15	70	0,06	16	7	3,5	16	75
16	50	0,07	14	6	3	15	80
17	60	0,06	15	8	4	10	100
18	65	0,08	10	5	2,5	12	30
19	40	0,06	13	6	3	13	45
20	55	0,05	16	7	3,5	10	70
21	45	0,05	14	6	3	13	50

№	$h_{21э}$	$h_{22э}$, мСм	E_k , В	R_k , кОм	R_H , кОм	$K_{и.ос}$	f_H , Гц
22	40	0,08	10	4	2	11	40
23	55	0,06	15	7	3,5	15	60
24	60	0,05	12	6	3	14	45
25	70	0,09	15	8	4	15	75
26	60	0,09	14	6	3	13	80

Пример расчета усилительного каскада на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером для варианта №26 (таблица 1).

1-й способ расчета

Первоначально рассчитаем ток коллектора покоя

$$I_{k.0} = \frac{E_k - U_{э.о.} - U_{кэ.о.}}{R_k} = \frac{14 - 0,1 \cdot 14 - 0,25 \cdot 14}{6} = 1,5 \text{ мА.}$$

Далее определим ток покоя базы

$$I_{б.0} = \frac{I_{k.0} - h_{22э} U_{кэ.о.}}{h_{21э}} = \frac{1,5 - 0,09 \cdot 3,5}{60} = 0,02 \text{ мА.}$$

Рассчитаем токи в плечах делителя R_1 и R_2 :

– ток $I_1 = 6 \cdot I_{б.0} = 6 \cdot 0,02 = 0,12 \text{ мА.}$

– ток $I_2 = 5 \cdot I_{б.0} = 5 \cdot 0,02 = 0,1 \text{ мА.}$

Найдем номиналы резисторов делителя напряжения

$$R_1 = \frac{E_k - U_{б.о.}}{I_1} = \frac{14 - (1,4 + 0,6)}{0,12} = 100 \text{ кОм;}$$

$$R_2 = \frac{U_{б.о.}}{I_2} = \frac{2}{0,1} = 20 \text{ кОм.}$$

Сопротивление резисторов в цепи эмиттера будет равно

$$R_э + R_{ос} = \frac{U_{э.о.}}{I_{к.о} + I_{б.о.}} = \frac{1,4}{1,5 + 0,02} = 0,92 \text{ кОм.}$$

2-й способ расчета

Первоначально рассчитаем эквивалентное сопротивление в цепи базы

$$R_б = 0,3 \cdot h_{21э} \cdot (R_э + R_{ос}) = 0,3 \cdot 60 \cdot 0,92 = 16,6 \text{ кОм.}$$

Далее найдем напряжение источника ЭДС

$$E_1 = U_{6,0} + I_{6,0} \cdot R_6 = 2 + 0,02 \cdot 16,6 = 2,33 \text{ В.}$$

Затем рассчитываем сопротивление R_1

$$R_1 = \frac{R_6 \cdot E_k}{E_6} = \frac{16,6 \cdot 14}{2,33} = 99,7 \text{ кОм}$$

и сопротивление R_2

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_6}{R_1 - R_6} = \frac{99,7 \cdot 16,6}{99,7 - 16,6} = 19,9 \text{ кОм.}$$

Из результатов расчета по первому и второму способу видно, что разность между сопротивлениями не превышает 5%.

Округляем значения $R_1=100$ кОм; $R_2=20$ кОм.

Далее определим значения конденсаторов для схемы усилительного каскада с емкостными связями на биполярном транзисторе.

Входное сопротивление транзистора с учетом обратной связи определится как

$$R_{\text{вх тр ос}} = \frac{h_{21э} R_{\text{к.н}}}{K_{\text{у.ос}} (1 + h_{22э} R_{\text{к.н}})} = \frac{60 \cdot 2}{13(1 + 0,09 \cdot 2)} = 7,82 \text{ кОм.}$$

при этом

$$R_{\text{к.н}} = \frac{R_{\text{к}} \cdot \beta R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ кОм.}$$

С учетом

$$h_{11э} = \frac{26}{0,02} = 1,3 \text{ кОм}$$

сопротивление обратной связи будет равно

$$R_{\text{ос}} = \frac{R_{\text{вх тр ос}} - h_{11э}}{h_{21э}} = \frac{7,82 - 1,3}{60 + 1} = 0,107 \text{ кОм.}$$

Округляем $R_{\text{ос}}=0,11$ кОм.

Постоянная времени в области нижних частот рассчитывается как

$$\tau_{\text{н}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}}} = \frac{1}{6,28 \cdot 80} = 2 \text{ мс.}$$

Постоянные времени всех участков цепи равны между собой

$$\tau_{\text{н1}} = \tau_{\text{н2}} = \tau_{\text{н.э}} = 3 \cdot \tau_{\text{н}} = 3 \cdot 2 = 6 \text{ мс.}$$

Входное сопротивление усилителя

$$R_{\text{вх}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{вх тр ос}}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{7,28} + \frac{1}{100} + \frac{1}{20}} = 5,32 \text{ кОм.}$$

Входная емкость равна

$$C_1 = \frac{\tau_{\text{н1}}}{R_{\text{нх}}} = \frac{6}{5,32} = 1,13 \text{ мкФ.}$$

Округляем $C_1=1,3$ мкФ.

Выходная емкость рассчитывается как

$$C_2 = \frac{\tau_{\text{н2}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}} = \frac{6}{6+3} = 0,67 \text{ мкФ.}$$

Округляем $C_2=1$ мкФ.

Емкость в цепи эмиттера определяется как

$$C_3 = \frac{\tau_{\text{н.э}}}{\frac{h_{11э}}{h_{21э}} + R_{\text{ос}}} = \frac{6}{\frac{1,31}{60+1} + 0,11} = 46,9 \text{ мкФ.}$$

Округляем $C_3=47$ мкФ.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4: «УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ»

Преимуществом полевых транзисторов перед биполярными являются малое потребление мощности, вследствие того, что на вход аналоговых схемы не подается ток. Схема усилительного каскада на полевом транзисторе приведена на рисунке 1.

Воспользуемся для расчета усилительного каскада на полевом транзисторе графо-аналитическим методом (рис. 2).

Точка 1 динамической линии нагрузки $U_{си} = E_{экв} - I_c R_{экв}$ должна находиться на крутом участке выходной характеристики, так чтобы при симметричных колебаниях напряжения затвор-исток относительно напряжения смещения $U_{зи.0}$ приращения тока стока $+\Delta I_c$ и $-\Delta I_c$ тоже были симметричными. При этом и колебания выходного напряжения $-\Delta U_{си}$ и $+\Delta U_{си}$ также будут симметричными, т.е. искажения выходного сигнала будут минимальными. График крутого участка выходной характеристики при $U_{зи} = 0$ на интервале $0 < U_{си} < U_{си.нас}$ описывается выражением

$$I_{c.1} = I_{c.нач} \left[1 - \left(1 - \frac{U_{си.1}}{U_{си.нас}} \right)^2 \right],$$

где $U_{си.нас}$ – напряжение насыщения, разделяющее крутой и пологий участки выходной характеристики. Значение $U_{си.нас}$ равно по модулю напряжению отсечки $U_{зи.отс}$.

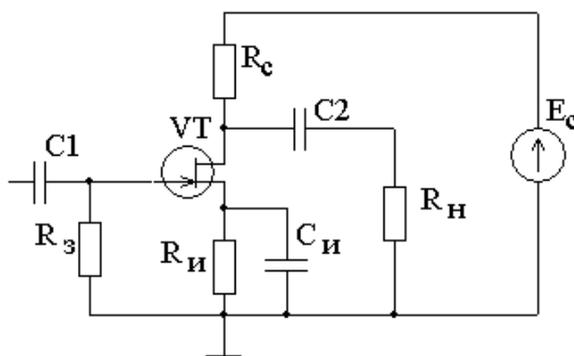


Рис. 1 Схема усилительного каскада на полевом транзисторе

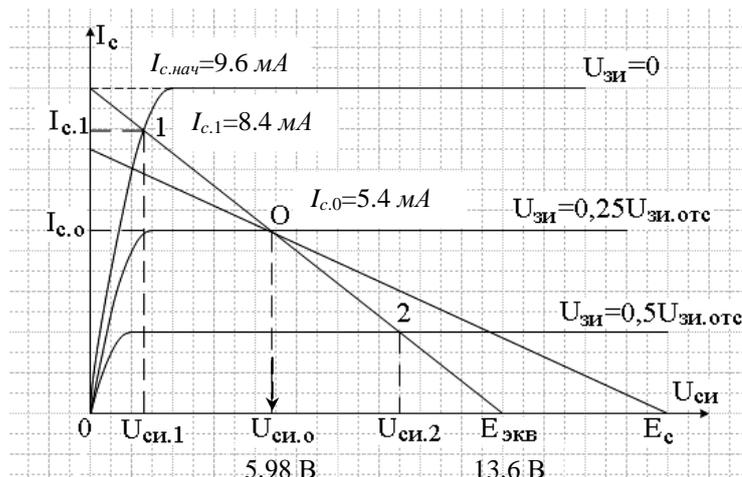


Рис. 2 Графо-аналитический метод расчета усилителя на полевых транзисторах

После определения координат точки 1 ($U_{си.1}$; $I_{с.1}$) можно построить график динамической линии нагрузки. Для этого необходимо выбрать значение эквивалентного сопротивления цепи стока в пределах $R_{\text{ЭКВ}} = R_c \parallel R_H = (0,6 \dots 0,75)R_H$, и вычислить напряжение эквивалентного источника:

$$E_{\text{ЭКВ}} = U_{си.1} + I_{с.1} \cdot R_{\text{ЭКВ}}.$$

$R_c \parallel R_H$	$(3/5) \cdot R_H$	$(2/3) \cdot R_H$	$(5/7) \cdot R_H$	$(3/4) \cdot R_H$
R_c	$1,5 \cdot R_H$	$2 \cdot R_H$	$2,5 \cdot R_H$	$3 \cdot R_H$

Построив динамическую линию нагрузки, можно определить напряжение покоя $U_{си.о}$ и напряжение питания E_c :

$$E_c = U_{си.о} + I_{с.о} \cdot R_c.$$

В точке покоя $U_{зи.о} = 0,25 \cdot U_{зи.отс}$, ток стока $I_{с.о} = \frac{9}{16} I_{с.нач}$. Сопротивление для автосмещения

$$R_{\text{и}} = \frac{U_{зи.о}}{I_{с.о}}.$$

Коэффициент усиления

$$K_{\text{и}} = S \cdot (R_c \parallel R_H) = S \cdot R_{\text{ЭКВ}}.$$

Крутизна передаточной характеристики в рабочей точке ($U_{зи.о} = 0,25 \cdot U_{зи.отс}$):

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{1,25 I_{с.нач}}{U_{зи.отс}} \text{ (мА/В)}.$$

Для расчета емкостей конденсаторов необходимо первоначально определить постоянную времени усилителя в области низких частот

$$\tau_{\text{нч}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}}} \text{ (мс)}.$$

Постоянная времени каждого конденсатора – в 3 раза больше:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_{\text{и}} = 3\tau_{\text{нч}}.$$

Принимаем $R_3 = 50$ кОм определяем номиналы емкостей конденсаторов по следующим формулам

$$\begin{aligned} \tau_1 &= C_1 \cdot R_3, \\ \tau_2 &= C_2 \cdot (R_c + R_{\text{н}}), \\ \tau_{\text{и}} &= \frac{C_{\text{и}} \cdot R_{\text{и}}}{1 + S \cdot R_{\text{и}}}. \end{aligned}$$

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Сопротивление и напряжение источника ЭДС в цепи стока.
2. Исходя из заданной нижней частоты $f_{\text{н}}$ определить коэффициента усиления $K_{\text{и}}$ и емкости конденсаторов $C_1, C_2, C_{\text{и}}$.

Таблица 1

Варианты задания для расчета усилителя на полевом транзисторе

№ варианта	$U_{\text{зи.отс}}$, В	$I_{\text{с.нач}}$, мА	$R_{\text{н}}$, кОм	$f_{\text{н}}$, Гц
1	-1,6	4,0	2,0	50
2	-2,0	4,8	2,4	40
3	-2,4	8,0	2,0	60
4	-2,0	8,0	3,3	45
5	-2,4	8,8	3,0	75
6	-1,6	8,0	3,0	80
7	-2,0	12	2,0	70
8	-1,6	6,4	2,2	30
9	-2,4	9,6	2,1	45
10	-2,0	11,2	2,2	70
11	-2,4	9,6	2,7	50
12	-1,6	8,0	2,5	40
13	-2,0	8,8	2,4	60
14	-2,8	12,8	2,0	45
15	-2,4	9,6	3,3	75

№ варианта	$U_{зи.отс}, В$	$I_{с.нач}, мА$	$R_H, кОм$	$f_H, Гц$
16	-2,0	7,2	2,7	80
17	-1,4	5,6	2,4	60
18	-2,8	12,8	1,8	30
19	-2,4	9,6	2,2	45
20	-2,0	8	2,4	70
21	-1,6	6,4	2,7	50
22	-2,4	11,2	2,5	40
23	-1,6	4,8	2,0	60
24	-2,0	7,2	2,3	45
25	-2,4	12,8	2,0	75
26	-2,4	9,6	2,4	45

Пример расчета усилительного каскада на полевом транзисторе в для варианта №26 (таблица 1).

Вначале зададим координаты рабочей точки:

$$I_{с.о} = 9/16 I_{с.нач} = 9/16 \cdot 9.6 = 5.4 \text{ мА};$$

$$U_{зи.о} = 1/4 U_{зи.отс} = 1/4 \cdot 2.4 = 0.6 \text{ В}.$$

С целью минимизации искажений выходного сигнала необходимо обеспечить симметрию колебаний напряжения $\Delta U_{си}$ и $+\Delta U_{си}$. Для этого примем

$$I_{с.1} = 14/16 I_{с.нач} = 14/16 \cdot 9.6 = 8.4 \text{ мА}.$$

После этого рассчитаем вторую координату ($I_{с.1}$; $U_{си.1}$) точки 1 (см. рис. 1.14)

$$U_{си.1} = U_{си.нас} \left[1 - \left(\sqrt{1 - \frac{I_{с.1}}{I_{с.нач}}} \right) \right] = 2.4 \left[1 - \left(\sqrt{1 - \frac{8.4}{9.6}} \right) \right] = 1.55 \text{ мВ}.$$

Примем сопротивление на стоке равное

$$R_c = 1,5 \cdot R_H = 1,5 \cdot 2,4 = 3,6 \text{ кОм}.$$

Определим эквивалентное сопротивление

$$R_{эКВ} = \frac{R_c R_H}{R_c + R_H} = \frac{3,6 \cdot 2,4}{3,6 + 2,4} = 1,44 \text{ кОм}.$$

Рассчитаем эквивалентное напряжение источника ЭДС

$$E_{эКВ} = U_{си.1} + I_{с.1} \cdot R_{эКВ} = 1,55 + 8,4 \cdot 1,44 = 13,6 \text{ В}.$$

Соединим линией координату точки 1 ($I_{с.1}$; $U_{си.1}$) точкой соответствующей на оси абсцисс номиналу $E_{эКВ}$. На пересечении получившейся линии (см. рис. 1.14. – точки 1-2) с *горизонтальной линией* соответствующей координате рабочей точки $I_{с.о} = 5.4 \text{ мА}$

отметим рабочую точку О. Далее из рабочей точки О проведем перпендикуляр к оси абсцисс. На пересечении с осью абсцисс отметим координату $U_{си.о}=5.98В$.

Зная координаты рабочей точки О ($I_{с.о}$; $U_{си.о}$), рассчитаем напряжение ЭДС источника питания

$$E_c = U_{си.о} + I_{с.о} \cdot R_c = 5.98 + 5.4 \cdot 3.6 = 25.4 В.$$

Сопротивление для автосмещения будет равно

$$R_{и} = \frac{U_{зи.о}}{I_{с.о}} = \frac{0.6}{5.4} = 0.11 \text{ кОм.}$$

Крутизна передаточной характеристики полевого транзистора равна

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{1,25 \cdot 9.6}{2.4} = 5 \text{ мА / В.}$$

Тогда коэффициент усиления определится

$$K_u = S \cdot (R_c \parallel R_{и}) = 5 \cdot 1.44 = 7.2.$$

Для расчета емкостей конденсаторов определим постоянную времени усилителя в области низких частот

$$\tau_{нч} = \frac{1}{2\pi f_{н}} = \frac{1}{6.28 \cdot 45} = 3.5 \text{ мс.}$$

Постоянные времени для всех участков цепи равные между собой

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_{и} = 3\tau_{нч} = 3 \cdot 3.5 = 10.5 \text{ мс.}$$

Далее рассчитаем значения емкостей конденсаторов

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_3} = \frac{10.5}{50} = 0.21 \text{ мкФ,}$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_c + R_{и}} = \frac{10.5}{3.6 + 2.4} = 1.75 \text{ мкФ,}$$

$$C_{и} = \frac{\tau_{и}(1 + S \cdot R_{и})}{R_{и}} = \frac{10.5(1 + 5 \cdot 0.11)}{0.11} = 150 \text{ мкФ.}$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5: «ЭМИТТЕРНЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ»

Повторителями принято называть усилители с коэффициентом усиления, близким к единице, не меняющие полярность входного сигнала и обладающие повышенным входным и пониженным выходным сопротивлениями (по сравнению с простейшими усилительными каскадами). Эмиттерный повторитель отличается от усилителя с общим эмиттером тем, что выходное напряжение снимается не с коллектора, а с эмиттера и что в цепи коллектора отсутствует резистор R_k . Схема эмиттерного повторителя с двумя разнополярными источниками напряжения питания приведена на рисунке 1, а.

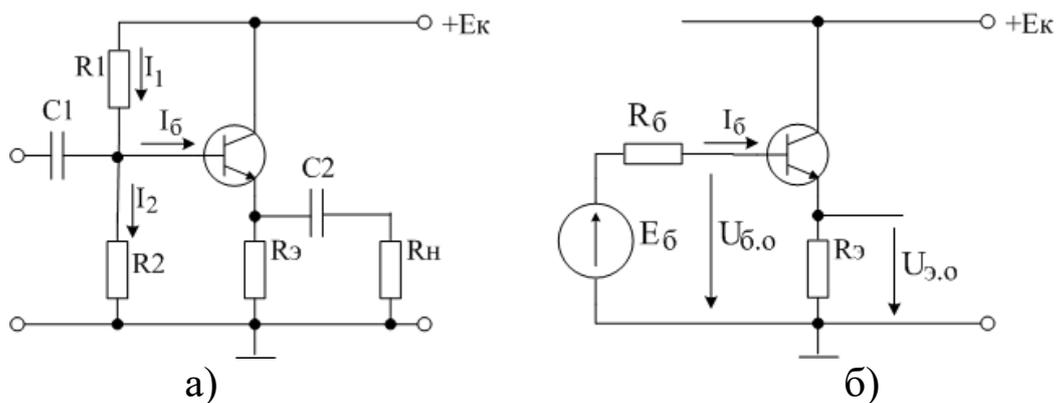


Рис. 1 Эмиттерный повторитель: а – электрическая принципиальная схема; б – эквивалентная схема

Принимаем потенциал эмиттера $U_{3.0} = E_k / 2$ и рассчитываем ток эмиттера согласно закона Ома $I_{3.0} = U_{3.0} / R_3$ или сопротивление $R_3 = U_{3.0} / I_{3.0}$ (в зависимости от варианта задания). Ток базы эмиттерного повторителя определяется

$$I_{6.0} = \frac{I_{3.0}}{h_{213} + 1}.$$

Сопротивления резисторного делителя R_1, R_2 находим по схеме замещения (рис. 1, б). Резисторный делитель базовой цепи заменяем эквивалентным генератором с ЭДС, равной

$$E_6 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_k$$

и сопротивлением

$$R_6 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Приняв

$$R_6 = 0,3 \cdot h_{21э} \cdot R_9$$

находим ЭДС эквивалентного источника в цепи базы

$$E_6 = U_{6,0} + I_{6,0} \cdot R_6 = U_{э,0} + U_{бэ,0} + I_{6,0} \cdot R_6.$$

при этом $U_{бэ,0} = 0,6$ В.

Далее определяем номиналы резистор R_1 и R_2 :

$$R_1 = \frac{R_6 \cdot E_K}{E_6}; \quad R_2 = \frac{R_1 \cdot R_6}{R_1 - R_6}.$$

Полученные значения сопротивлений округляем до ближайших стандартных номиналов.

Входное сопротивление транзистора рассчитывается

$$R_{вх.тр} = h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot (R_9 \parallel R_H),$$

где $h_{11э} = \frac{\phi_T}{I_{6,0}} = \frac{26 \text{ мВ}}{I_{6,0}},$

Коэффициент передачи напряжения

$$K_u = \frac{\Delta U_9}{\Delta U_6} = \frac{\Delta U_9 \cdot (R_9 \parallel R_H)}{\Delta U_6 \cdot R_{вх.тр}} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot (R_9 \parallel R_H)}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot (R_9 \parallel R_H)}.$$

Коэффициент передачи напряжения на холостом ходу будет равен

$$K_{u.хх} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot R_9}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot R_9}.$$

При этом входное сопротивление эмиттерного повторителя

$$R_{вх} = R_{вх.тр} \parallel R_6.$$

Для расчета емкостей разделительных конденсаторов эмиттерного повторителя воспользуемся следующими формулами.

Постоянная времени каскада в области низких частот $\tau_{нч} = \frac{1}{2\pi f_H}$

(мс).

Постоянная времени каждого конденсатора – в 2 раза больше:

$$\tau_1 = \tau_2 = 2\tau_{нч}.$$

С учетом этих соотношений номиналы разделительных конденсаторов находим из следующих соотношений

$$\tau_1 = C_1 \cdot R_{\text{вх}}, \quad \tau_2 = C_2 \cdot (R_{\text{вых}} + R_{\text{н}}) \approx C_2 \cdot R_{\text{н}}.$$

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя равно

$$R_{\text{вых}} = \frac{\phi_{\text{T}}}{I_{\text{э.о}}} = \frac{26 \text{ мВ}}{I_{\text{э.о}}}.$$

В таблице 1 представлены варианты.

Таблица 1

Варианты задания для расчета эмиттерного повторителя

№	$h_{21э}$	$E_{\text{к}}$ ($E_{\text{с}}$), В	$R_{\text{э}}$, кОм	$I_{\text{э.о}}$, мА	$R_{\text{н}}$, кОм	$f_{\text{н}}$, Гц	$U_{\text{зи.отс}}$, В	$I_{\text{с.нач}}$, мА
1	50	10	4		0,5	50	-1,6	4,0
2	60	12	6		0,5	40	-2,0	4,8
3	65	15		2,5	0,4	60	-2,4	8,0
4	40	12		2	0,4	45	-2,0	8,0
5	55	15	5		0,3	75	-2,4	8,8
6	60	10		2	0,35	80	-1,6	8,0
7	70	8	4		0,25	70	-2,0	12
8	65	10	5		0,4	30	-1,6	6,4
9	60	12		3	0,35	45	-2,4	9,6
10	50	15	6		0,3	70	-2,0	11,2
11	45	18		3	0,3	50	-2,4	9,6
12	40	12	4		0,3	40	-1,6	8,0
13	55	10		2	0,25	60	-2,0	8,8
14	60	15		3	0,33	45	-2,8	12,8
15	70	12	3		0,4	75	-2,4	9,6
16	50	8		2	0,35	80	-2,0	7,2
17	60	18		3	0,22	60	-1,4	5,6
18	65	15	6		0,27	30	-2,8	12,8
19	40	16		2,5	0,33	45	-2,4	9,6
20	55	12	5		0,35	70	-2,0	8
21	45	14		3,5	0,4	50	-1,6	6,4
22	40	10	4		0,3	40	-2,4	11,2
23	55	8		2	0,5	60	-1,6	4,8
24	60	12	6		0,4	45	-2,0	7,2
25	70	15		2,5	0,25	75	-2,4	12,8
26	60	10	5		0,3	45	-2,4	9,6

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Резисторный делитель.
2. Коэффициенты передачи эмиттерного повторителя.
3. Исходя из заданной нижней частоты f_n определить емкости конденсаторов C_1, C_2 .

Пример расчета параметров эмиттерного повторителя для варианта №26 (таблица 1).

Используя данные таблицы 1 и закон Ома определим номинал эмиттерного тока

$$I_{э.о} = \frac{U_{э.о}}{R_э} = \frac{0.5 \cdot 10}{5} = 1 \text{ мА}.$$

Ток базы найдется

$$I_{б.о} = \frac{I_{э.о}}{h_{21э} + 1} = \frac{1}{60 + 1} = 0,016 \text{ мА}.$$

Приняв

$$R_б = 0,3 \cdot h_{21э} \cdot R_э = 0,3 \cdot 60 \cdot 1 = 18 \text{ кОм},$$

находим эквивалентное напряжение на базе

$$E_б = U_{э.о} + U_{бэ.о} + I_{б.о} \cdot R_б = 5 + 0,6 + 0,016 \cdot 18 = 5,89 \text{ В}.$$

Далее определяем номиналы делителя $R_1 \div R_2$:

$$R_1 = \frac{R_б \cdot E_к}{E_б} = \frac{18 \cdot 10}{5,89} = 30 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_б}{R_1 - R_б} = \frac{30 \cdot 18}{30 - 18} = 45 \text{ кОм}.$$

Рассчитав

$$h_{11э} = \frac{26 \text{ мВ}}{I_{б.о}} = \frac{26}{0,016} = 1,62 \text{ кОм}.$$

Определяем входное сопротивление транзистора

$$R_{вх.тр} = h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot (R_э \parallel R_н) = 1,6 + 61 \left(\frac{5 \cdot 0,3}{5 + 0,3} \right) = 18,9 \text{ кОм},$$

Коэффициент передачи напряжения

$$K_u = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot (R_э \parallel R_н)}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot (R_э \parallel R_н)} = \frac{61 \cdot 0,28}{1,59 + 61 \cdot 0,28} = 0,91.$$

Коэффициент передачи напряжения на холостом ходу будет равен

$$K_{u.xx} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot R_э}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot R_э} = \frac{61 \cdot 5}{1.59 + 61 \cdot 5} = 0.99.$$

Входное сопротивление эмиттерного повторителя

$$R_{вх} = R_{вх.тр} \parallel R_б = \frac{18.9 \cdot 18}{18.9 + 18} = 9.22 \text{ кОм}.$$

Выходное сопротивление

$$R_{вых.тр} = \frac{26 \text{ мВ}}{I_{э,о}} = \frac{26}{1} = 0,026 \text{ кОм}$$

Далее определим номиналы разделительных конденсаторов.
Постоянная времени каскада в области низких частот

$$\tau_{нч} = \frac{1}{2\pi f_H} = \frac{1}{6.28 \cdot 45} = 3.5 \text{ мс}.$$

Постоянная времени каждого конденсатора – в 2 раза больше:

$$\tau_1 = \tau_2 = 7 \text{ мс}.$$

С учетом этих соотношений

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_{вх}} = \frac{7}{9.22} = 0.76 \text{ мкФ}.$$

$$C_1 = \frac{\tau_2}{R_{вых} + R_H} = \frac{7}{0,026 + 0,300} = 21.5 \text{ мкФ}.$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6: «ИСТОКОВЫЙ ПОВТОРИТЕЛЬ»

Повторитель напряжения можно построить на полевом транзисторе любого типа: с управляющим $p-n$ переходом, МДП с встроенным или индуцированным каналом. В любом случае нагрузка подключается в цепь истока, а сток по переменным составляющим тока и напряжения соединен с общей шиной каскада, т. е. вывод стока является общим для входной и выходной цепей усилительного каскада. Поэтому истоковый повторитель называют каскадом с общим стоком (ОС). Схема истокового повторителя на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ переходом и каналом n типа представлена на рисунке 1, а.

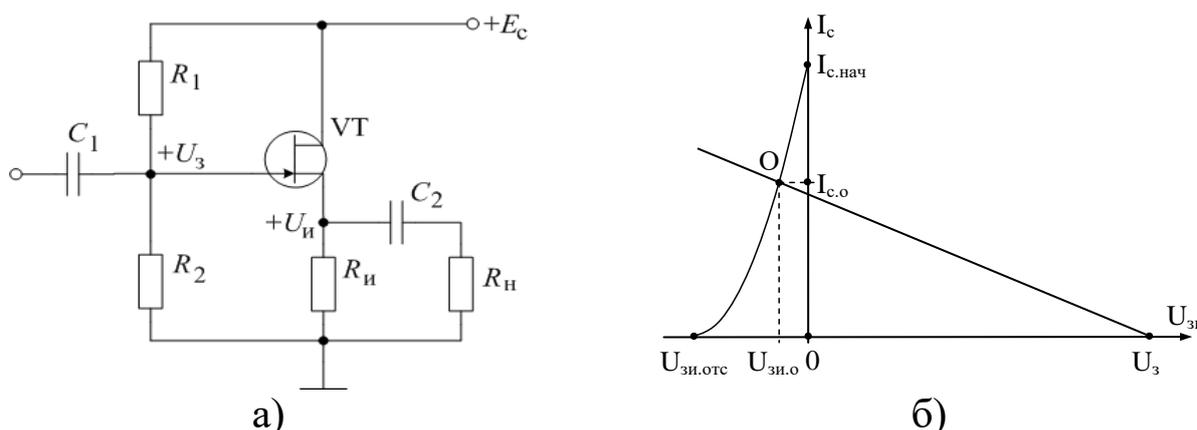


Рис. 1 Истоковый повторитель: а – электрическая принципиальная схема; б – выбор рабочей точки

В этом каскаде сток транзистора подключен непосредственно к шине питания $+E_c$. Режим покоя обеспечивают резисторный делитель $R_1 \div R_2$ в цепи затвора и резистор $R_{и}$ в цепи истока. Входное напряжение подается на затвор через разделительный конденсатор C_1 , а выходное напряжение поступает на нагрузку с истока через разделительный конденсатор C_2 .

При выборе точки покоя необходимо обеспечить два условия: напряжение смещения $U_{зи.о}$ должно соответствовать участку передаточной характеристики с максимально возможной крутизной, т. е. близким к нулю, и сопротивление резистора $R_{и}$ должно быть достаточно большим, а именно $R_{и} \gg R_{н}$. Это позволит повысить коэффициент передачи по напряжению. Для реализации этой цели

необходимо выбрать в режиме покоя точку на передаточной характеристике транзистора с координатами (рис. 1, б):

$$U_{\text{зи.о}} = 0,25 U_{\text{зи.отс}}, I_{\text{с.о}} = \frac{9}{16} I_{\text{с.нач.}}$$

Напряжение на истоке

$$U_{\text{и.о}} = 0,5 E_{\text{с}},$$

отсюда

$$R_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и.о}}}{I_{\text{с.о}}}.$$

Потенциал затвора (рис. 4.16, б) определяется

$$U_{\text{з}} = U_{\text{и.о}} + U_{\text{зи.о}} = U_{\text{и.о}} - |U_{\text{зи.о}}|$$

устанавливается резисторным делителем:

$$U_{\text{з}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_{\text{с}}.$$

Для расчета делителя примем значение общего сопротивления равным 100 кОм

$$R_1 + R_2 = 100 \text{ кОм}$$

После расчета R_2 можно будет рассчитать сопротивление R_1 .

Крутизна передаточной характеристики в рабочей точке истокового повторителя O

$$S = \frac{1,5 I_{\text{с.нач}}}{|U_{\text{зи.отс}}|}, \text{ мА/В.}$$

Коэффициент передачи по напряжению равен

$$K_{\text{u}} = \frac{S(R_{\text{и}} \parallel R_{\text{н}})}{1 + S(R_{\text{и}} \parallel R_{\text{н}})}.$$

Коэффициент передачи максимален в режиме холостого хода

$$K_{\text{u xx}} = \frac{SR_{\text{и}}}{1 + SR_{\text{и}}}.$$

Для расчета емкостей разделительных конденсаторов истокового повторителя необходимо определить постоянную времени каскада в области низких частот

$$\tau_{\text{нч}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}}} \text{ (мс).}$$

Постоянная времени каждого конденсатора – в 2 раза больше:

$$\tau_1 = \tau_2 = 2 \tau_{\text{нч}}.$$

Зная величину постоянной времени каждой из цепи можно определить номинал разделительных конденсаторов

$$\tau_1 = C_1 \cdot (R_1 \parallel R_2),$$

$$\tau_2 = C_2 \cdot \left(\frac{R_{\text{и}}}{1 + S \cdot R_{\text{и}}} + R_{\text{н}} \right).$$

В таблице 1 представлены варианты.

Таблица 1

Варианты задания для расчета эмиттерного повторителя

№	$h_{21э}$	$E_{\text{к}}$ ($E_{\text{с}}$), В	$R_{\text{э}}$, кОм	$I_{\text{э.о.}}$, мА	$R_{\text{н}}$, кОм	$f_{\text{н}}$, Гц	$U_{\text{зи.отс}}$, В	$I_{\text{с.нач}}$, мА
1	50	10	4		0,5	50	-1,6	4,0
2	60	12	6		0,5	40	-2,0	4,8
3	65	15		2,5	0,4	60	-2,4	8,0
4	40	12		2	0,4	45	-2,0	8,0
5	55	15	5		0,3	75	-2,4	8,8
6	60	10		2	0,35	80	-1,6	8,0
7	70	8	4		0,25	70	-2,0	12
8	65	10	5		0,4	30	-1,6	6,4
9	60	12		3	0,35	45	-2,4	9,6
10	50	15	6		0,3	70	-2,0	11,2
11	45	18		3	0,3	50	-2,4	9,6
12	40	12	4		0,3	40	-1,6	8,0
13	55	10		2	0,25	60	-2,0	8,8
14	60	15		3	0,33	45	-2,8	12,8
15	70	12	3		0,4	75	-2,4	9,6
16	50	8		2	0,35	80	-2,0	7,2
17	60	18		3	0,22	60	-1,4	5,6
18	65	15	6		0,27	30	-2,8	12,8
19	40	16		2,5	0,33	45	-2,4	9,6
20	55	12	5		0,35	70	-2,0	8
21	45	14		3,5	0,4	50	-1,6	6,4
22	40	10	4		0,3	40	-2,4	11,2
23	55	8		2	0,5	60	-1,6	4,8
24	60	12	6		0,4	45	-2,0	7,2
25	70	15		2,5	0,25	75	-2,4	12,8
26	60	10	5		0,3	45	-2,4	9,6

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Резисторный делитель.
2. Крутизну передаточной характеристики и коэффициенты усиления истокового повторителя.
3. Исходя из заданной нижней частоты f_n определить емкости конденсаторов C_1, C_2 .

Пример расчета параметров истокового повторителя для варианта №26 (таблица 1).

Используя данные таблицы 1 определим координаты рабочей точки истокового повторителя (рис. 1, б):

$$U_{зи.о} = 0.25 U_{зи.отс} = 0.25 \cdot 2.4 = 0.6 \text{ В}, I_{с.о} = \frac{9}{16} I_{с.нач} = \frac{9 \cdot 9.6}{16} = 5.4 \text{ мА}.$$

Напряжение на истоке

$$U_{и.о} = 0.5 E_c = 0.5 \cdot 10 = 5 \text{ В}.$$

отсюда

$$R_{и} = \frac{U_{и.о}}{I_{с.о}} = \frac{5}{5.4} = 0.93 \text{ кОм}.$$

Потенциал затвора определяется

$$U_3 = U_{и.о} - |U_{зи.о}| = 5 - 0.6 = 4.4 \text{ В}.$$

устанавливается резисторным делителем:

$$R_2 = \frac{100U_3}{E_c} = \frac{440}{10} = 44 \text{ кОм}. \quad R_1 = 100 - R_2 = 56 \text{ кОм}..$$

Крутизна передаточной характеристики в рабочей точке истокового повторителя O

$$S = \frac{1.5 I_{с.нач}}{|U_{зи.отс}|} = \frac{14.4}{2.4} = 6 \text{ мА / В}.$$

Коэффициент передачи по напряжению равен

$$K_u = \frac{S(R_{и} \parallel R_{н})}{1 + S(R_{и} \parallel R_{н})} = \frac{6 \left(\frac{0.93 \cdot 0.3}{0.93 + 0.3} \right)}{1 + 6 \left(\frac{0.93 \cdot 0.3}{0.93 + 0.3} \right)} = 0.58.$$

Коэффициент усиления максимален в режиме холостого хода

$$K_{u \text{ хх}} = \frac{SR_{и}}{1 + SR_{и}} = \frac{6 \cdot 0.93}{1 + 6 \cdot 0.93} = 0.85.$$

Постоянная времени каскада в области низких частот

$$\tau_{\text{нч}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{н}}} = \frac{1}{6.28 \cdot 45} = 3.5 \text{ мс.}$$

Постоянная времени каждого конденсатора – в 2 раза больше:
 $\tau_1 = \tau_2 = 7 \text{ мс.}$

Номиналы разделительных конденсаторов определяются как

$$C_1 = \frac{\tau_1}{(R_1 \parallel R_2)} = \frac{7}{\frac{56 \cdot 44}{56 + 44}} = 0.28 \text{ мкФ.}$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{\left(\frac{R_{\text{и}}}{1 + S \cdot R_{\text{и}}} + R_{\text{н}} \right)} = \frac{7}{\left(\frac{0.93}{1 + 6 \cdot 0.93} + 0.3 \right)} = 36 \text{ мкФ.}$$

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №7: «ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ»

Операционные усилители относятся к универсальным усилительным элементам, которые в первые годы их создания предназначались для выполнения математических операций над аналоговыми сигналами в аналоговых вычислительных машинах. В настоящее время операционные усилители изготавливаются в виде микросхем, и из специализированных блоков они превратились в универсальные компоненты, занимающие доминирующее положение в аналоговой микроэлектронной аппаратуре.

Под операционным усилителем понимается высококачественный усилитель постоянного тока с симметричным (дифференциальным) высокоомным входом, несимметричным (однотактным) низкоомным выходом и большим коэффициентом усиления. Один вход называется *неинвертирующим* (Н-входом), другой – *инвертирующим* (И-входом). Операционный усилитель чувствителен к разности напряжений между инвертирующим и неинвертирующим входами (*дифференциальному входному напряжению*) и нечувствителен к изменениям напряжений, подаваемых на оба входа и одинаковых по абсолютной величине и полярности (*синфазному входному напряжению*). Современные операционные усилители работают в диапазоне частот от нуля до десятков мегагерц. На рисунке 1, а приведена схема неинвертирующего усилителя на операционном усилителе.

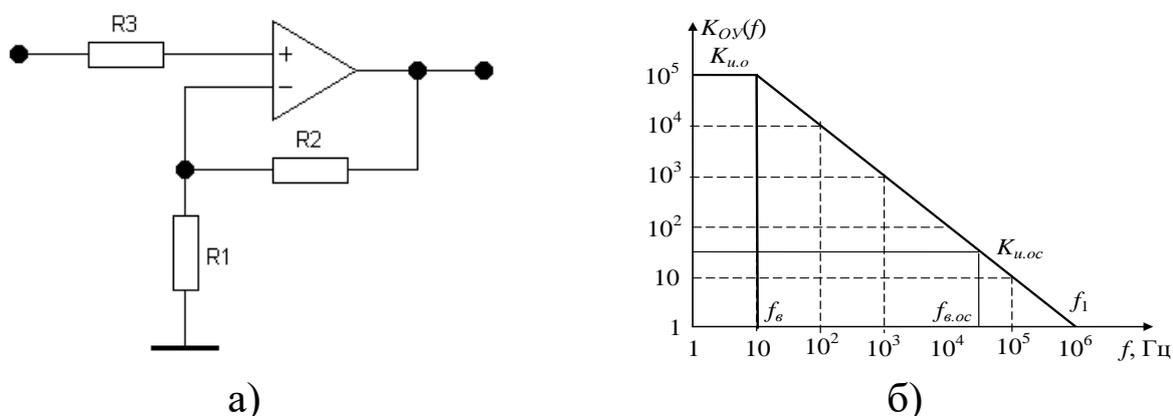


Рис. 1 Неинвертирующий усилитель: а – электрическая схема; б – ЛАЧХ усилителя

Точный коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{u.oc} = \frac{K_{u.oy}}{1 + \gamma K_{u.oy}},$$

где

$$\gamma = \frac{R_1}{R_2 + R_1}.$$

Приближенная формула для расчета коэффициента усиления

$$K_{u.oc} = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_2}{R_1} + 1.$$

Резистор R_2 должен удовлетворять условиям: $R_{вых.oy} \ll R_2 \ll R_{вх.oy}$. При расчете сопротивлений R_1 и R_2 необходимо, чтобы их значения были «круглыми», т.е. без дробей.

Сопротивление $R_3 = R_1 \parallel R_2$.

Величина коэффициента по приближенной формуле слегка завышена по сравнению с точной формулой.

Погрешность на выходе неинвертирующего усилителя определяется суммой трех погрешностей. Разность $\Delta K_{u.oc}$ позволяет определить первую составляющую погрешность усилителя:

$$\Delta U'_{вых} = -\Delta K_{u.oc} \cdot U_{вх} \text{ (мВ)}.$$

Вторая составляющая погрешности из-за смещения нуля операционного усилителя равна

$$\Delta U''_{вых} = K_{u.oc} \cdot U_{см} \text{ (мВ)}.$$

Третья составляющая погрешности обусловлена разностью входных токов

$$\Delta U'''_{вых} = \Delta I_{вх} \cdot R_2 \text{ (мВ)}.$$

Таким образом, максимальная погрешность неинвертирующего усилителя по модулю равна сумме:

$$\Delta U_{вых} = |\Delta U'_{вых}| + \Delta U''_{вых} + \Delta U'''_{вых} \text{ (мВ)}.$$

Полоса пропускания усилителя определяется верхней частотой

$$f_{в.oc} = \frac{f_1}{K_{u.oc}} \text{ (кГц)},$$

$$f_B = \frac{f_1}{K_{u.oy}} \text{ (кГц)}.$$

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Номиналы резисторов.

2. Максимальное значение погрешности на выходе усилителя.
3. Верхние частоты полосы пропускания неинвертирующего усилителя.
4. Построить ЛАЧХ, согласно графику, приведенному на рисунке 1, б.

Таблица 1

Варианты задания для расчета неинвертирующего усилителя

Вариант	$K_{u.oy}$	f_1 , МГц	U_{cm} , мВ	$\Delta I_{вх}$, нА	$R_{вх}$, МОм	$R_{вых}$, Ом	$K_{u.ос}$	$U_{вх}$, мВ
1	50 000	10	10	20	2,5	400	50	100
2	70 000	1,0	5	10	2,0	150	40	150
3	30 000	0,8	9	50	1,0	500	15	200
4	50 000	1,0	20	25	2,0	600	30	160
5	100 000	15	10	15	5,0	200	25	200
6	100 000	1,0	5	20	2,0	250	40	120
7	50 000	0,5	2	25	3,0	300	20	250
8	125 000	0,3	2,5	20	1,0	600	50	100
9	50 000	0,7	2	10	2,0	100	30	120
10	200 000	0,8	10	15	5,0	200	60	80
11	45 000	1,0	1	50	1,5	300	35	200
12	125 000	2,0	2	20	3,0	750	50	80
13	100 000	1,0	5	35	2,5	800	40	100
14	200 000	1,5	2	20	2,0	375	60	50
15	250 000	1,0	2	10	4,0	600	80	40
16	50 000	10	3	30	1,0	500	25	200
17	100 000	5,0	5	15	2,0	400	45	120
18	125 000	2,0	4	25	5,0	300	50	100
19	150 000	1,0	7	20	3,0	100	75	60
20	80 000	0,8	10	40	1,5	250	20	250
21	40 000	0,5	3	50	5,0	800	40	125
22	50 000	1,5	5	30	2,0	200	35	130
23	200 000	10	2	15	3,0	500	60	40
24	75 000	2,0	3	25	5,0	200	25	80
25	100 000	1,0	5	10	2,0	100	45	60
26	125 000	2,0	4	50	1,5	150	30	100

Пример расчета параметров неинвертирующего усилителя для варианта №26 (таблица 1).

Вначале определим номиналы резисторов, приняв номинал резистора $R_1 = 2$ кОм и используя соотношение

$$K_{u.oc} = \frac{R_2 + R_1}{R_1},$$

$$50 = \frac{R_2 + 2}{2} \Rightarrow R_2 = 98 \text{ кОм.}$$

Коэффициент передачи цепи обратной связи равен

$$\gamma = \frac{1}{K_{u.oc}} = \frac{1}{50} = 0.02.$$

Теперь можно рассчитать точное значение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{u.oc.T} = \frac{K_{u.oy}}{1 + \gamma K_{u.oy}} = \frac{125000}{1 + 0.02 \cdot 125000} = 49.98.$$

Сопротивление на неинвертирующем входе операционного усилителя

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \cdot 98}{2 + 98} = 1.96.$$

Далее рассчитаем составляющие погрешности на выходе неинвертирующего усилителя.

Разность коэффициентов усиления

$$\Delta K_{u.oc} = K_{u.oc} - K_{u.oc.T} = 50 - 49.98 = 0.02.$$

позволяет определить первую составляющую погрешность усилителя:

$$\Delta U'_{\text{ВЫХ}} = -\Delta K_{u.oc} \cdot U_{\text{ВХ}} = 0.02 \cdot 100 = 2 \text{ мВ.}$$

Вторая составляющая погрешности равна

$$\Delta U''_{\text{ВЫХ}} = K_{u.oc} \cdot U_{\text{СМ}} = 50 \cdot 4 = 200 \text{ мВ.}$$

Третья составляющая погрешности

$$\Delta U'''_{\text{ВЫХ}} = \Delta I_{\text{ВХ}} \cdot R_2 = 50 \cdot 98 = 0.005 \text{ мВ.}$$

Таким образом, максимальная погрешность неинвертирующего усилителя определится как

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = |\Delta U'_{\text{ВЫХ}}| + \Delta U''_{\text{ВЫХ}} + \Delta U'''_{\text{ВЫХ}} = 2 + 200 + 0.005 = 202.005 \text{ мВ.}$$

Полоса пропускания усилителя определяется частотами

$$f_{\text{в.ос}} = \frac{f_1}{K_{u.ос}} = \frac{2}{50} = 40 \text{ кГц,}$$

$$f_{\text{в}} = \frac{f_1}{K_{u.oy}} = \frac{2}{125000} = 0.016 \text{ кГц.}$$

Данные параметры позволяют построить ЛАЧХ, приведенную на рисунке 1, б.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №8: «АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ»

Активные фильтры – это усилители, обладающие избирательными частотными свойствами:

- фильтры низких частот (ФНЧ) пропускают колебания с частотами от нулевой до частоты «среза» ω_0 ;
- фильтры высоких частот (ФВЧ) пропускают колебания с частотами выше частоты «среза» ω_0 ;
- полосовые фильтры (ПФ) обеспечивают пропускание сигналов определенных частот;
- заграждающие, или «режекторные», фильтры служат для непропускания колебаний в некоторой полосе частот.

Активные фильтры строят, как правило, на операционных усилителях с применением RC -цепей. На рисунке 1 представлен фильтр низких частот.

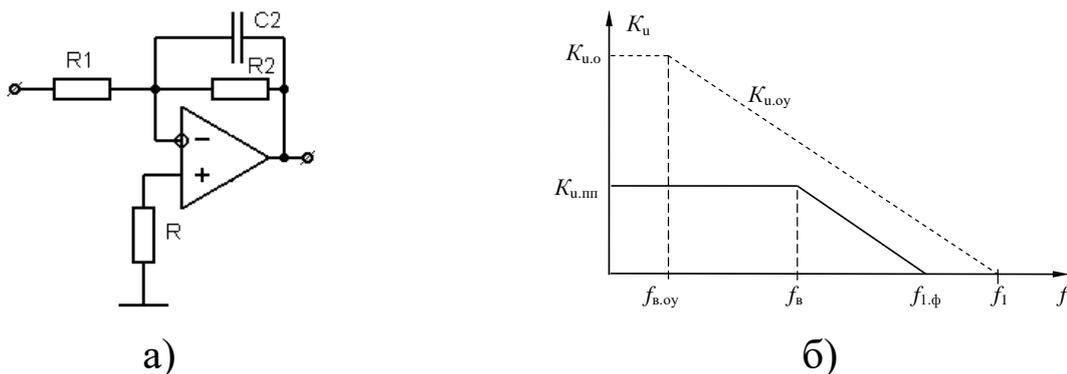


Рис. 1 Фильтр низких частот: а – электрическая схема; б – частотная характеристика фильтра

Частотная характеристика фильтра

$$\dot{K}_u(f) = \frac{K_{u,мп}}{1 + j2\pi f R_2 C_2}.$$

Частота «среза» (верхняя граничная частота)

$$f_B = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}.$$

Коэффициент передачи в полосе пропускания (по модулю)

$$K_{u,мп} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{в.оу} = \frac{f_1}{K_{у.о}}$$

Граничная частота фильтра определяется

$$f_{1.ф} = f_{в} K_{у.мп}$$

На рисунке 2 представлен фильтр высоких частот.

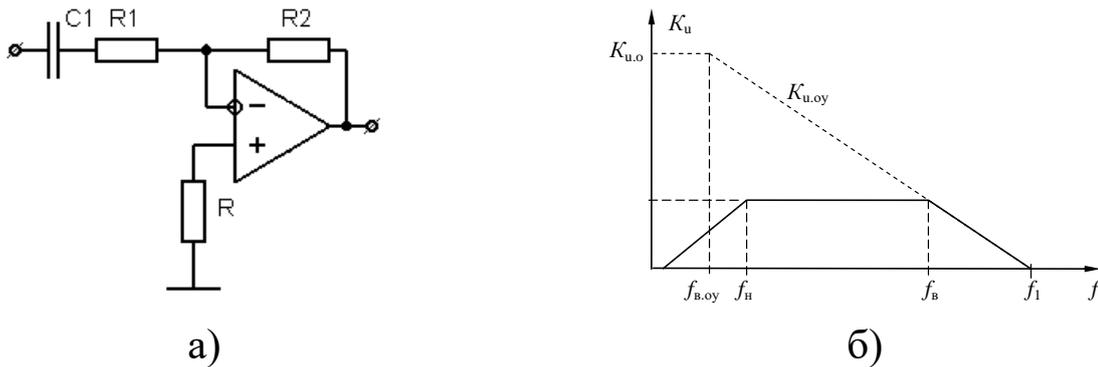


Рис. 2 Фильтр высоких частот: а – электрическая схема; б – частотная характеристика фильтра

Частотная характеристика фильтра

$$\dot{K}_u(f) = \frac{K_{у.мп}}{1 + \frac{1}{j2\pi f R_1 C_1}}$$

Частота «среза» (нижняя граничная частота)

$$f_H = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Коэффициент передачи в полосе пропускания (по модулю)

$$K_{у.мп} = \frac{R_2}{R_1}$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{в.оу} = \frac{f_1}{K_{у.о}}$$

Граничная частота фильтра определяется

$$f_B = \frac{f_1}{K_{у.мп}}$$

Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1 рассчитать:

1. Элементы схемы фильтра низких частот R_1 , R_2 , C_2 , верхнюю частоту операционного усилителя $f_{в.оу}$ и граничную частоту фильтра $f_{л.ф}$.
2. Изобразить график ЛАЧХ фильтра низких частот.
3. Элементы схемы фильтра высоких частот R_1 , R_2 , C_1 , верхнюю частоту операционного усилителя $f_{в.оу}$ и верхнюю частоту фильтра $f_{в}$.
4. Изобразить график ЛАЧХ фильтра высоких частот.

Таблица 1

Варианты задания для расчета фильтров

№	Параметры ОУ		K_{mn}	R_1 , кОм	R_2 , кОм	ФНЧ	ФВЧ
	$K_{и.о}$	f_1 , МГц				$f_{в}$, Гц	$f_{н}$, Гц
1	50 000	5	10	10		60	3200
2	70 000	0,7	12,5		100	100	2000
3	30 000	0,9	25	5		80	1200
4	50 000	2	20		80	40	1600
5	100 000	4	20	4		160	4000
6	100 000	2	10		25	120	3200
7	50 000	0,5	20	4		80	1600
8	125 000	2,5	20		100	60	2000
9	50 000	1	25	5		120	3000
10	200 000	2	10		40	80	3200
11	45 000	0,9	10	5		40	2400
12	125 000	5	12,5		125	50	1600
13	100 000	1,0	20	5		100	2000
14	200 000	4	20		160	80	3000
15	250 000	2	10	6		60	3200
16	50 000	4	9		90	40	1600
17	100 000	5,0	15	4		120	4000
18	125 000	2,0	20		80	50	2000
19	150 000	1,5	20	4		160	3200
20	80 000	0,8	25		125	120	2400
21	40 000	1,2	10	4		80	1000
22	50 000	1,5	20		100	40	2000
23	200 000	4	25	5		60	1600
24	75 000	1,5	20		50	100	3200
25	100 000	1,0	25	5		160	2000
26	125 000	2,5	10		100	80	4000

Пример расчета параметров фильтра для варианта №26 (таблица 1).

Расчет ФНЧ. Вначале определим номинал резистора

$$R_1 = \frac{R_2}{K_{u.мп}} = \frac{100}{10} = 10 \text{ кОм.}$$

Затем используя значение верхней граничной частоты найдем емкость конденсатора

$$C_2 = \frac{1}{2\pi R_2 f_B} = \frac{1}{6.28 \cdot 100 \cdot 80} = 0.02 \text{ мкФ.}$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{B.ou} = \frac{f_1}{K_{u.o}} = \frac{2.5}{125000} = 0.02 \text{ МГц.}$$

Граничная частота фильтра равна

$$f_{1.ф} = f_B K_{u.мп} = 80 \cdot 100 = 8 \text{ кГц.}$$

Полученные данные позволяют построить ЛАЧХ фильтра низких частот, приведенную на рисунке 1, б.

Расчет ФВЧ. Вначале используя значение нижней граничной частоты определим емкость конденсатора

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_1 f_H} = \frac{1}{6.28 \cdot 10 \cdot 4000} = 0.004 \text{ мкФ.}$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{B.ou} = \frac{f_1}{K_{u.o}} = \frac{2.5}{125000} = 0.02 \text{ кГц.}$$

Граничная частота фильтра определяется

$$f_B = \frac{f_1}{K_{u.мп}} = \frac{2.5}{10} = 250 \text{ кГц.}$$

Полученные данные позволяют построить ЛАЧХ фильтра высоких частот приведенную на рисунке 2, б.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) этапы выполнения практической работы;
- 4) требуемые в практической работе расчеты и графики.

Библиографический список

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.
2. Угрюмов Е.П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 318 с.
3. Савельев А.Я. Прикладная теория цифровых автоматов: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1987. – 272 с.