

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна  
Должность: проректор по учебной работе  
Дата подписания: 02.02.2021 05:12:36  
Уникальный программный ключ:  
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»

(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 02 » февраля 2017 г.



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ Часть 2

Методические указания к выполнению практических работ для студентов  
направления подготовки 09.03.01 по дисциплине  
"Электротехника, электроника и схемотехника"

Курск 2017

УДК 681.3.049.77

Составители: В.И. Иванов, С.Н.Гвоздева

Рецензент

Кандидат технических наук *Халин Ю.А.*

**Проектирование аналоговых устройств. Часть 2:** методические указания к выполнению практических работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Иванов, С.Н.Гвоздева. – Курск, 2017. – 16 с.

Содержат материал, необходимый для формирования у студентов знаний основ аналоговой схемотехники и привития навыков разработки и проектирования аналоговых устройств на транзисторах и интегральных схемах.

Методические указания соответствуют Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, учебному плану направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, одобренному Ученым советом университета (протокол № 7 «29» февраля 2016 г.).

Предназначены для студентов направления подготовки 09.03.01 очной и заочной формы обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *6.12.17*. Формат 60\*84 1/16.

Усл. печ.л. *0,2*. Уч.-изд.л. *0,6* Тираж 100 экз. Заказ *2411*, Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Оглавление

1.5. Эмиттерный повторитель .....	4
1.6. Истоковый повторитель .....	8
1.7. Операционный усилитель .....	11
1.8. Активные фильтры .....	14

## 1.5. Эмиттерный повторитель

Повторителями принято называть усилители с коэффициентом усиления, близким к единице, не меняющие полярность входного сигнала и обладающие высоким входным и низким выходным сопротивлением по сравнению с другими 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 одним источником напряжения питания приведена на рисунке 1.15, а.

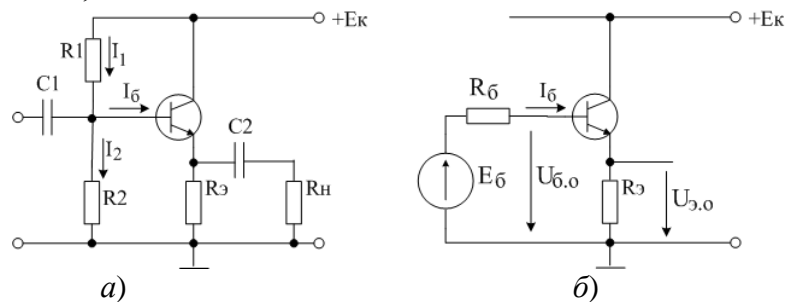


Рис. 1.15. Эмиттерный повторитель: а – электрическая принципиальная схема; б – эквивалентная схема

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

$$I_{б.о} = \frac{I_{э.о}}{h_{21э} + 1}.$$

Сопротивления резисторного делителя  $R_1, R_2$  находим по схеме замещения (рис. 1.15, 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

$$R_6 = 0,3 \cdot h_{21э} \cdot R_э$$

находим ЭДС эквивалентного источника в цепи базы

$$E_6 = U_{б.о} + I_{б.о} \cdot R_6 = U_{э.о} + U_{бэ.о} + I_{б.о} \cdot R_6.$$

при этом  $U_{бэ.о} = 0,6$  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

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

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

Коэффициент передачи напряжения

$$K_u = \frac{\Delta U_3}{\Delta U_6} = \frac{\Delta I_3 \cdot (R_3 \parallel R_H)}{\Delta I_6 \cdot R_{\text{вх.тр}}} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot (R_3 \parallel R_H)}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot (R_3 \parallel R_H)}$$

Коэффициент передачи напряжения на холостом ходу будет равен

$$K_{u.хх} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot R_3}{h_{11э} + (h_{21э} + 1) \cdot R_3}$$

При этом входное сопротивление эмиттерного повторителя

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх.тр}} \parallel R_6$$

Для расчета емкостей разделительных конденсаторов эмиттерного повторителя воспользуемся следующими формулами.

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

С учетом этих соотношений находим емкости разделительных конденсаторов:

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

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя равно

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

Таблица 1.6

### Варианты задания для расчета эмиттерного повторителя

№	$h_{21э}$	$E_k$ ( $E_c$ ), В	$R_3$ , кОм	$I_{э.о}$ , мА	$R_H$ , кОм	$f_{\text{н}}$ , Гц	$U_{\text{зи.отс}}$ , В	$I_{c.\text{нач}}$ , 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 1.6 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 1.6).*

Используя данные таблицы 1.6 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  $R_1 \div R_2$ :

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

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

Определяем параметр

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

и входное сопротивление транзистора

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

Коэффициент передачи напряжения

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

Коэффициент передачи напряжения на холостом ходу будет равен

$$K_{u.хх} = \frac{(h_{21э} + 1) \cdot R_э}{h_{1э} + (h_{21э} + 1) \cdot R_э} = \frac{61 \cdot 5}{1,59 + 61 \cdot 5} = 0,99.$$

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

$$\tau_{нч} = \frac{1}{2\pi f_n} = \frac{1}{6,28 \cdot 45} = 3,5 \text{ мс}.$$

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

С учетом этих соотношений

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

$$C_1 = \frac{\tau_2}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}} = \frac{7}{0.026 + 0.300} = 21.5 \text{ мкФ}.$$

## 1.6. 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 1.16, *a*.

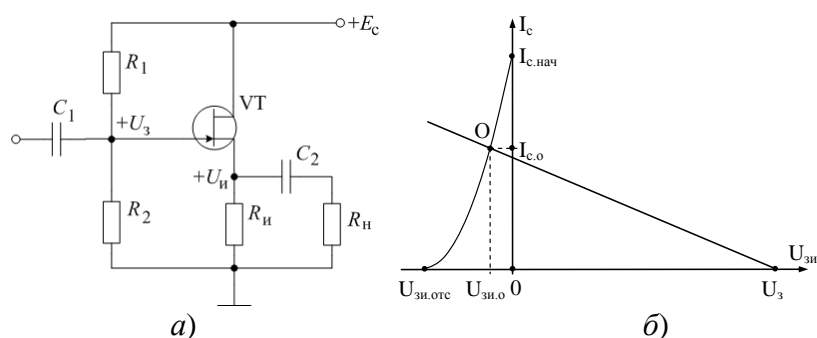


Рис. 1.16. Истоковый повторитель: *a* – электрическая принципиальная схема; *б* – выбор рабочей точки

В этом каскаде сток транзистора подключен непосредственно к шине питания  $+E_c$ . Режим покоя обеспечивают резисторный делитель  $R_1-R_2$  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 максимальной 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. 1.16, *б*):

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

Напряжение на истоке

$$U_{и.о} = 0,5 E_c,$$

отсюда

$$R_{и} = \frac{U_{и.о}}{I_{с.о}}.$$

Потенциал затвора (рис. 1.16, *б*) определяется

$$U_3 = U_{и.о} + U_{зи.о} = U_{и.о} - |U_{зи.о}|$$

устанавливается резисторным делителем:

$$U_3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_c.$$

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  $O$



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

Коэффициент передачи по напряжению равен

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

Коэффициент передачи максимален в режиме холостого хода

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

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

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

Постоянная времени каждого конденсатора – в 2 раза больше:  $\tau_1 = \tau_2 = 2 \tau_{нч}$ .

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

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

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

#### Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1.6.1 рассчитать:

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

Пример расчета параметров истокового повторителя для варианта №26 (таблица 1.6.1).

Таблица 1.6.1

#### Варианты задания для расчета истокового повторителя

№	$h_{21э}$	$E_{к}$ ( $E_c$ ), В	$R_{э}$ , кОм	$I_{э.о.}$ , мА	$R_{н}$ , кОм	$f_{н}$ , Гц	$U_{зи.отс}$ , В	$I_{с.нач}$ , 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

Используя данные таблицы 1.6.1, определим координаты рабочей точки истокового повторителя (рис. 1.16, б):

$$U_{\text{зи.о}} = 0.25 U_{\text{зи.отс}} = 0.25 \cdot 2.4 = 0.6 \text{ В,}$$

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

Напряжение на истоке

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

отсюда

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

Потенциал затвора определяется

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

устанавливается резисторным делителем:

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

$$R_1 = 100 - R_2 = 56 \text{ кОм.}$$

Кругизна передаточной характеристики в рабочей точке истокового повторителя O

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

Коэффициент передачи по напряжению равен

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

Коэффициент усиления максимален в режиме холостого хода

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

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

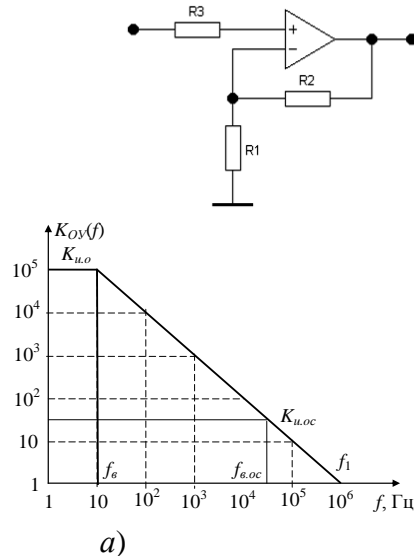
$$C_1 = \frac{\tau_1}{(R_1 \| R_2)} = \frac{7}{\frac{56 \cdot 44}{56 + 44}} = 0.28 \text{ мкФ.}$$

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

## 1.7. 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 (*сифазному входному* напряжению). Современные операционные усилители работают в диапазоне частот от нуля до десятков мегагерц. На рисунке 1.17, а приведена схема неинвертирующего усилителя на операционном усилителе.



а) б)

Рис. 1.17. Неинвертирующий усилитель:

а – электрическая схема; б – ЛАЧХ усилителя

Точный коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

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

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:  $R_{вх.oy} \ll R_2 \ll R_{вх.oy}$ . 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:

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

Вторая составляющая погрешности из-за смещения нуля операционного усилителя равна

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

Третья составляющая погрешности обусловлена разностью входных токов

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

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

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

Полоса пропускания усилителя определяется верхней частотой

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

$$f_{\text{с}} = \frac{f_1}{K_{u.оу}} \text{ (кГц)}.$$

### Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1.7 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 1.17, б.

Таблица 1.7

### Варианты задания для расчета неинвертирующего усилителя

Вариант	$K_{u.оу}$	$f_1$ , МГц	$U_{\text{см}}$ , мВ	$\Delta I_{\text{вх}}$ , нА	$R_{\text{вх}}$ , МОм	$R_{\text{вых}}$ , Ом	$K_{u.ос}$	$U_{\text{вх}}$ , 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 1.7).

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 в цепи неинвертирующего входа 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:

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

Вторая составляющая погрешности равна

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

Третья составляющая погрешности

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

Таким образом, максимальная погрешность неинвертирующего усилителя определится как

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

Полоса пропускания усилителя определяется частотами

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

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

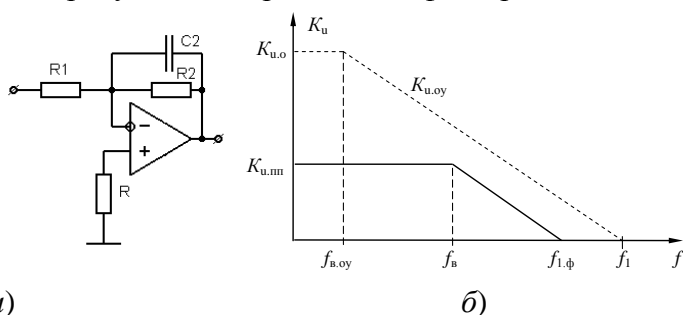
Данные параметры позволяют построить ЛАЧХ, приведенную на рисунке 1.17, б.

## 1.8. Активные фильтры

Активные фильтры – это усилители, обладающие избирательными частотными свойствами:

- фильтры низких частот (ФНЧ) пропускают колебания с частотами от нулевой до частоты «среза»  $\omega_0$ ;
- фильтры высоких частот (ФВЧ) пропускают колебания с частотами выше частоты «среза»  $\omega_0$ ;
- 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 1.18 представлен фильтр низких частот.



а)

б)

Рис. 1.18. 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)

$$f_с = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}.$$

Коэффициент передачи в полосе пропускания (по модулю)

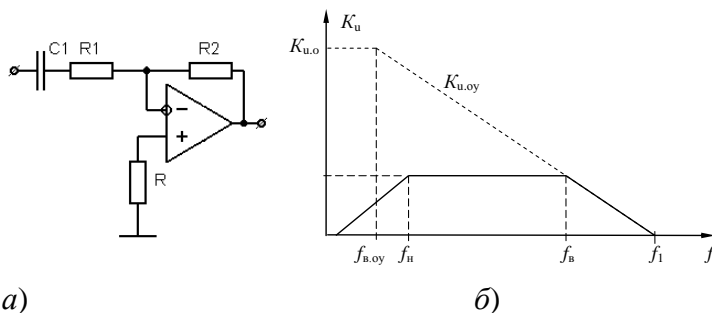
$$K_{u,мп} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{в,оу} = \frac{f_1}{K_{u,о}}.$$

Граничная частота фильтра определяется  $f_{1,φ} = f_в K_{u,мп}$ .

На рисунке 1.19 представлен фильтр высоких частот.



а)

б)

Рис. 1.19. Фильтр высоких частот:

$\lambda$  – электрическая схема;  $\delta$  – частотная характеристика фильтра  
 Частотная характеристика фильтра

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

Частота «среза» (нижняя граничная частота)

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

Коэффициент передачи в полосе пропускания (по модулю)

$$K_{u, \text{мп}} = \frac{R_2}{R_1}$$

Верхняя частота операционного усилителя

$$f_{\text{в.оу}} = \frac{f_1}{K_{u.o}}$$

Граничная частота фильтра определяется

$$f_{\text{г}} = \frac{f_1}{K_{u, \text{мп}}}$$

### Задание для расчетной работы:

Используя данные таблицы 1.8 рассчитать:

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

Таблица 1.8

### Варианты задания для расчета фильтров

№	Параметры ОУ		$K_{\text{мп}}$	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	ФНЧ		ФВЧ	
	$K_{u.o}$	$f_1$ , МГц				$f_{\text{г}}$ , Гц	$f_{\text{н}}$ , 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	

№	Параметры ОУ		$K_{mn}$	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	ФНЧ	ФВЧ
	$K_{u.o}$	$f_1$ , МГц				$f_g$ , Гц	$f_n$ , Гц
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 1.8).

Расчет ФНЧ. Вначале определим номинал резистора

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

Затем используя значение верхней граничной частоты найдем емкость конденсатора

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

Верхняя частота операционного усилителя

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

Граничная частота фильтра равна

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

Полученные данные позволяют построить ЛАЧХ фильтра низких частот, приведенную на рисунке 1.18, б.

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

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

Верхняя частота операционного усилителя

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

Граничная частота фильтра определяется

$$f_g = \frac{f_1}{K_{u.mn}} = \frac{2.5}{10} = 250 \text{ кГц}.$$

Полученные данные позволяют построить ЛАЧХ фильтра высоких частот приведенную на рисунке 1.19, б.

### Библиографический список

1 Проектирование аналоговых и цифровых устройств: Учебное пособие. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 143 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – DOI 10.12737/822 (www.doi.org).

2 Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2004. 790 с.