

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	2
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	2
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И УСЛОВИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ	4
КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	8
УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ	20
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	21
Вопросы для самостоятельной проверки студентов	22
ПРИЛОЖЕНИЕ	23
<i>Таблица П1</i>	23
<i>Таблица П2</i>	25
<i>Таблица П3</i>	26
ЛИТЕРАТУРА	30

Оглавление

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

ВВЕДЕНИЕ

Операционные усилители в интегральном исполнении являются одним из наиболее распространенных элементов, которые используются для построения аналоговых усилителей напряжения и других маломощных аналоговых устройств. Домашнее задание, рассматриваемое в методическом пособии, посвящено расчету усилителей напряжения постоянного тока с использованием операционных усилителей и имеет целью подготовку студентов, будущих специалистов к созданию современных электронных усилительных устройств и устройств обработки сигналов мехатронных и робототехнических систем. Полученные при выполнении домашнего задания знания могут быть использованы при анализе принципов построения усилительных и преобразовательных каскадов, разработке методов подготовки и проведения экспериментальных исследований электронных устройств, а также в подготовке проектирования таких устройств.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Операционный усилитель (ОУ, *OpAmp*) – усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления по напряжению, предназначенный для реализации различных математических операций и функциональных зависимостей путем введения глубоких отрицательных обратных связей.

Идеальный операционный усилитель – абстрактный усилитель, обладающий следующими характеристиками:

- бесконечно большой дифференциальный коэффициент усиления, $K_U = \infty$;
- бесконечно большое входное дифференциальное сопротивление, $R_{вх\ д} = \infty$;
- нулевое выходное сопротивление, $R_{вых\ ОУ} = 0$;
- нулевой "дрейф нуля";
- бесконечно большая полоса пропускания.

Идеализированный ОУ - операционный усилитель, обладающий бесконечно большим коэффициентом усиления по напряжению в разомкнутом состоянии $K_U = \infty$, у которого входное дифференциальное напряжение $U_{вх\ д} = 0$.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

"Дрейф нуля" – любые изменения выходного напряжения усилителя $U_{\text{вых.0}}$ (напряжение статической погрешности) при отсутствии входного сигнала, т.е. при $E_c = 0$. Это явление характерно для усилителей постоянного тока с непосредственными связями. Причиной "дрейфа нуля" являются изменения положений рабочих точек усилительных каскадов, связанные с изменениями температуры, напряжений источников питания, старением элементов во времени.

Балансировка нуля ОУ – сведение к нулю неизменной составляющей напряжения статической погрешности путем подачи на вход усилителя компенсирующего сигнала при организации цепей балансировки.

Частотная коррекция ОУ – обеспечение устойчивости операционного усилителя при введении отрицательной обратной связи с помощью цепей частотной коррекции.

Инвертирующее включение ОУ – такой вид включения, при котором входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход соединён с общим проводом, при этом выходной сигнал инвертирован относительно входного сигнала, т.е. имеет фазовый сдвиг, равный 180 градусов.

Неинвертирующее включение ОУ – такой вид включения, при котором входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а его инвертирующий вход соединён с общим проводом, при этом выходной сигнал совпадает по фазе с входным сигналом.

Дифференциальное включение ОУ – такой вид включения, при котором входной сигнал подается между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ, а полярность выходного сигнала ОУ совпадает с полярностью сигнала на неинвертирующем входе относительно инвертирующего входа.

Динамический диапазон – отношение максимального выходного (входного) напряжения к минимальному выходному (входному) напряжению.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И УСЛОВИЯ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

В соответствии с номером варианта по исходным данным технического задания, приведенным в таблице, с использованием параметров заданного ОУ, приведенных в [табл. III](#) приложения, и для диапазона температур 233...333 К необходимо выполнить следующее:

1. Выбрать схему и рассчитать однокаскадный усилитель постоянного тока на основе ОУ с заданным включением, обладающий максимально возможным динамическим диапазоном и удовлетворяющий требованиям технического задания. При этом должны выполняться условия: $R_{вх} \geq R_{вх\ TЗ}$; $K_U = K_{U\ TЗ} \pm \delta K_U$, где

$R_{вх}$ – значение входного сопротивления усилителя;

$R_{вх\ TЗ}$ – минимальное требуемое значение входного сопротивления усилителя;

K_U – значение коэффициента усиления по напряжению усилителя;

$K_{U\ TЗ}$ – требуемое значение коэффициента усиления по напряжению усилителя;

δK_U – допустимая погрешность коэффициента усиления, $\delta K_U = \pm 2\%$.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Исходные данные к домашнему заданию
(сопротивление нагрузки для всех вариантов $R_n = 7 \text{ кОм}$)

№ варианта	Тип ОУ	$K_{UT3} /$ включение ОУ	$R_{вх}$, кОм, не менее	U_n , В
1	K1401УД2А	6 / инв.	5	± 22
2	K1401УД2А	5 / неинв.	7	± 20
3	K153УД1	10 / инв.	10	± 22
4	K153УД1	8 / неинв.	10	± 20
5	K153УД2	5 / инв.	20	± 22
6	K153УД2	6 / неинв.	15	± 20
7	K153УД5	10 / инв.	20	± 22
8	K153УД5	15 / неинв.	10	± 20
9	K140УД6	20 / инв.	10	± 22
10	K140УД6	10 / неинв.	20	± 20
11	K140УД7	15 / инв.	10	± 22
12	K140УД7	20 / неинв.	20	± 20
13	K140УД8	30 / инв.	20	± 22
14	K140УД8	25 / неинв.	20	± 20
15	K140УД14	50 / инв.	15	± 22
16	K140УД14	30 / неинв.	20	± 20
17	K1401УД2А	10 / инв.	10	± 22
18	K1401УД2А	10 / неинв.	15	± 21
19	K153УД1	20 / инв.	15	± 22
20	K153УД1	15 / неинв.	15	± 20
21	K153УД2	25 / инв.	10	± 22
22	K153УД2	20 / неинв.	12	± 20
23	K153УД5	40 / инв.	10	± 22
24	K153УД5	35 / неинв.	12	± 20
25	K140УД8	50 / инв.	200	± 22

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

№ варианта	Тип ОУ	$K_{U\text{ ТЗ}} /$ включение ОУ	$R_{\text{вх}}$, кОм, не менее	$U_{\text{п}}$, В
26	К140УД6	30 / инв.	20	± 22
27	К140УД6	25 / неинв	15	± 20
28	К140УД7	10 / инв.	50	± 22
29	К140УД7	8 / неинв.	40	± 20
30	К140УД8	10 / инв.	100	± 22
31	К140УД8	8 / неинв.	50	± 20
32	К140УД14	10 / инв.	60	± 22
33	К140УД14	12 / неинв	50	± 20
34	К1401УД2А	20 / инв.	6	± 20
35	К1401УД2А	15 / неинв	5	± 22
36	К153УД1	30 / инв.	9	± 22
37	К153УД1	20 / неинв	6	± 20
38	К153УД2	20 / инв.	15	± 22
39	К153УД2	15 / неинв	14	± 20
40	К153УД5	100 / инв.	5	± 22
41	К153УД5	50 / неинв	8	± 20
42	К140УД6	80 / инв.	7	± 22
43	К140УД6	60 / неинв	5	± 20
44	К140УД7	60 / инв.	6	± 22
45	К140УД7	40 / неинв	8	± 20
46	К140УД8	90 / инв.	10	± 22
47	К140УД8	80 / неинв	9	± 20
48	К140УД14	100 / инв.	8	± 22
49	К140УД14	40 / неинв	5	± 20
50	К140УД14	100 / инв.	100	± 22

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

В процессе выполнения задания необходимо:

1) рассчитать элементы прямой цепи и цепи обратной связи усилителя. Полученные значения сопротивлений этих резисторов округлить с точностью до 1% (см. [табл. П2 приложения](#));

2) определить необходимые элементы и рассчитать (выбрать) цепи балансировки и коррекции ОУ;

3) для полученной схемы найти:

а) напряжения статической погрешности в условиях применения балансировки и без нее;

б) максимальный динамический диапазон усилителя при наличии и отсутствии балансировки;

в) ширину полосы пропускания усилителя на уровне 3 дБ с учетом принятой схемы частотной коррекции и частотной характеристики заданного ОУ (см. [табл. П3 приложения](#));

г) точные значения основных технических показателей K_U , δK_U , $R_{вх}$, $R_{вых}$.

2. Выбрать схему и рассчитать однокаскадный усилитель постоянного тока на основе ОУ для тех же условий и в соответствии с теми же исходными данными, но используя противоположное включение операционного усилителя. При этом, как и в первом случае, необходимо выполнить пункты 2.1, 2.2, 2.3, аналогичные пунктам 1.1, 1.2, 1.3.

3. По результатам расчета пп.1 и 2 разработать схему двухкаскадного усилителя, у которого первым каскадом будет служить усилитель, рассчитанный в п.1, а вторым - в п. 2. Для полученного двухкаскадного усилителя необходимо:

1) рассчитать напряжение статической погрешности на выходе усилителя в условиях применения балансировки (в первом каскаде) и определить максимальный динамический диапазон;

2) найти точные значения основных технических показателей разработанного усилителя: K_U , δK_U , $R_{вх}$, $R_{вых}$.

3) определить ширину полосы пропускания на уровне 3 дБ с учетом принятых цепей частотной коррекции;

4) определить необходимые элементы и рассчитать (выбрать) цепи питания двухкаскадного усилителя на основе ОУ с учетом относительных отклонений напряжения источника питания $\delta U_{п} = \pm 10\%$;

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

5) начертить в соответствии с ГОСТ 2.702-75 “Правила выполнения электрических схем” полную принципиальную электрическую схему полученного усилителя, включая цепи балансировки, коррекции и питания. Привести перечень элементов схемы в соответствии с ГОСТ 10318-74 и ГОСТ 2519-67.

4. Оформить домашнее задание по нижеприведенным требованиям.

Домашнее задание нужно оформлять на листах формата А4 без рамки. Титульный лист следует выполнять в соответствии с образцами, представленными на стенде.

Текст домашнего задания рекомендуется разбивать на разделы и подразделы. Вначале должны быть записаны условия домашнего задания, исходные данные и основные параметры используемого ОУ; затем приведены материалы расчета и схемы в последовательности, соответствующей пп. 1-3. При оформлении материалов расчета следует применять пояснительный текст, приводить формулы в общем виде, затем - с числовыми значениями и, наконец, записывать окончательный результат. Значения сопротивления резисторов R_1 и R_{oc} округлить до ближайших значений ряда E96 (ГОСТ 28884-90), сопротивление остальных резисторов – до значений ряда E24 (ГОСТ 28884-90).

Схемы вычерчиваются с соблюдением стандарта; условные обозначения элементов выполняют в соответствии с ГОСТ 2.721-74, ГОСТ 2.728-74, ГОСТ 2.730-73, ГОСТ 2.747-68 (см. [1, 2]).

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Операционный усилитель представляет собой усилитель постоянного тока с гальванической связью между каскадами, предназначенный для построения различных устройств путем организации на его основе глубокой отрицательной связи. Для этого ОУ должен иметь инвертирующий вход, обладать достаточно высоким коэффициентом усиления по напряжению и малым дрейфом нуля (напряжением статической погрешности), иметь высокое входное сопротивление, низкое выходное сопротивление и широкую полосу пропускания. Идеальным будем называть ОУ, обладающий бесконечно большим диф-

Оглавление

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

ференциальным коэффициентом усиления $K_U = \infty$, нулевым дрейфом нуля, бесконечно большим входным дифференциальным сопротивлением $R_{вх\ д} = \infty$, нулевым выходным сопротивлением $R_{вых\ ОУ} = 0$ и бесконечно большой шириной полосы пропускания.

При усилении несимметричного входного сигнала усилительный каскад может быть построен по схемам с инвертирующим и неинвертирующим включениями.

При инвертирующем включении общий провод источника входного сигнала соединен с неинвертирующим входом ОУ и фаза выходного сигнала отличается от фазы входного сигнала на 180° . Применительно к идеализированному ОУ схема с инвертирующим включением имеет вид, представленный на рис. 1а. В данной схеме действует параллельная отрицательная обратная связь по напряжению, для которой во входной цепи суммируются токи и основным уравнением является уравнение $I_c = I_{вх} + I_{ос}$. Здесь I_c – ток, потребляемый от источника входного сигнала; $I_{вх}$ – входной ток операционного усилителя; $I_{ос}$ – ток в цепи обратной связи. Учитывая, что при $K_U = \infty$ входное дифференциальное напряжение $U_{вх\ д} = 0$ В, можно получить выражения для основных технических показателей такого усилительного каскада:

$$K_{U\ инв} = R_{ос} / R1; \quad R_{вх\ инв} = R1; \quad R_{вых\ инв} = 0. \quad (1)$$

При введении в схему симметрирующего резистора $R_{сим}$ (схема на рис. 1, б) и учете конечных значений K_U , $R_{вх\ д}$ и $R_{вых\ ОУ}$ выражения для основных технических показателей приобретают вид

$$K_{U\ инв} = \frac{R_{ос} / R1}{1 + \frac{R_{ос}}{K_U K_{вх} K_{вых}} \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R_{ос}} + \frac{1}{R_{вх\ д} + R_{сим}} \right)}$$

где $K_{вх} = \frac{R_{вх\ д}}{R_{вх\ д} + R_{сим}}; K_{вых} = \frac{R_H^*}{R_{вых} + R_H^*}; R_H^* = R_H \parallel [R_{ос} + R1 \parallel (R_{вх\ д} + R_{сим})];$

$$R_{вх\ инв} = R1 + \left[R_{ос} \parallel (R_{вх\ д} + R_{сим}) \parallel \frac{R_{ос}}{K_U K_{вх} K_{вых}} \right];$$

Оглавление

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

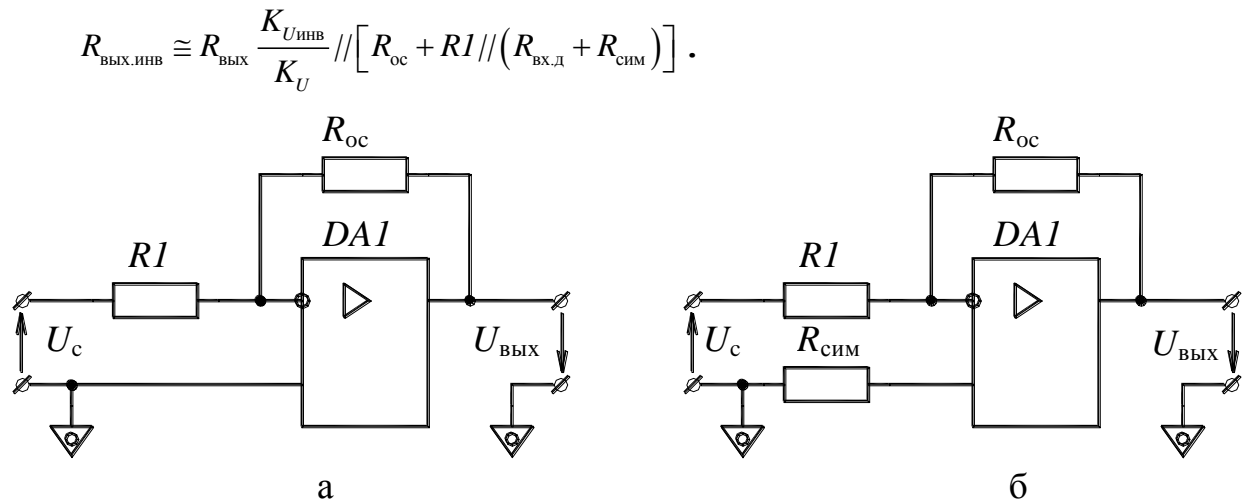


Рис. 1.

При неинвертирующем включении сигнал от источника входного сигнала поступает на неинвертирующий вход ОУ и фаза выходного сигнала совпадает с фазой входного сигнала. Схема с неинвертирующим включением идеализированным ОУ имеет вид, представленный на рис. 2 а. В данной схеме действует последовательная отрицательная обратная связь по напряжению, для которой основным уравнением является уравнение $U_c = U_{\text{ВХ Д}} + U_{\text{ОС}}$. Учитывая, что при $K_U = \infty$ $U_{\text{ВХ Д}} = 0$ и что для идеализированного ОУ $R_{\text{ВХ Д}} = \infty$, можно получить выражения для основных технических показателей такого усилительного каскада:

$$K_{U_{\text{НЕИН}}} = 1 + R_{\text{ОС}} / R_I; R_{\text{ВХ НЕИН}} = \infty; R_{\text{ВЫХ ИНВ}} = 0. \quad (2)$$

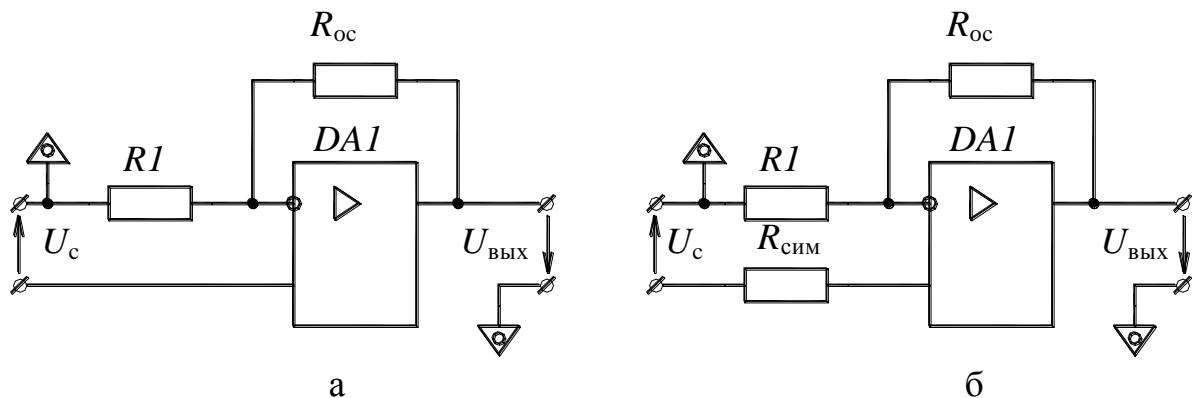


Рис. 2.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

При введении в схему симметрирующего резистора $R_{\text{сим}}$ (схема на рис. 2, б) и учете конечных значений K_U , $R_{\text{вх.д}}$ и $R_{\text{вых.оу}}$ выражения для основных технических показателей приобретают вид

$$K_{U_{\text{нсин}}} = \frac{1 + R_{\text{ос}}/R1^*}{1 + \frac{1 + R_{\text{ос}}/R1^*}{K_U K_{\text{вх}} K_{\text{вых}}}},$$

$$\text{где } R1^* = R1 \parallel 2R_{\text{вх.сф}} \parallel (R_{\text{вх.д}} + R_{\text{сим}} \parallel 2R_{\text{вх.сф}});$$

$$2R_{\text{вх.сф}} = 0,5R_{\text{вх.д}} 10^{(K_{\text{оссф}} [\text{дБ}]/20)};$$

$$K_{\text{вх}} = \frac{R_{\text{вх.д}}}{R_{\text{вх.д}} + R_{\text{сим}}}; K_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{н}}^*}{R_{\text{вых}} + R_{\text{н}}^*};$$

$$R_{\text{н}}^* = R_{\text{н}} \parallel [R_{\text{ос}} + R1 \parallel (R_{\text{вх.д}} + R_{\text{сим}})];$$

$$R_{\text{вх.нсин}} = R_{\text{сим}} + \left\{ \left[R_{\text{вх.д}} \left(\frac{K_U K_{\text{вых}}}{1 + R_{\text{ос}}/R1^*} + 1 \right) \right] \parallel 2R_{\text{вх.сф}} \right\};$$

$$R_{\text{вых.нсин}} \cong \frac{R_{\text{вых}} K_{U_{\text{нсин}}}}{K_U} \parallel [R_{\text{ос}} + R1 \parallel (R_{\text{вх.д}} + R_{\text{сим}})],$$

где K_U , $R_{\text{вх.д}}$ и $R_{\text{вых.оу}}$ – параметры выбранного ОУ.

Так как ОУ неидеален в отношении дрейфа нуля (напряжения статической погрешности), требуется учитывать воздействие параметров статической погрешности ОУ (см. [табл. III](#) приложения):

- напряжение смещения $U_{\text{см}}$;
- температурного коэффициента напряжения смещения $(\Delta U_{\text{см}}/\Delta T)$;
- входного тока $I_{\text{вх}}$;
- температурного коэффициента входного тока $(\Delta I_{\text{вх}}/\Delta T)$;
- разности входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$;
- температурного коэффициента разности входных токов $(\Delta(\Delta I_{\text{вх}})/\Delta T)$.

Напряжение статической погрешности $U_{\text{вых0}}$ зависит от значений этих параметров ОУ, диапазона температур ΔT , наличия симметрирования входов ОУ и сопротив-

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

ления в цепи обратной связи R_{oc} . Это напряжение имеет неизменную $U_{вых0 н}$ и дрейфовую $U_{вых0 др}$ составляющие:

$$U_{вых0} = U_{вых0 н} + U_{вых0 др}.$$

Первая составляющая, как это следует из ее названия, неизменна, а вторая составляющая зависит от температуры, причем можно считать, что знак ее изменения зависит от увеличения или от уменьшения температуры. Это позволяет оценивать максимальное значение напряжения $U_{вых0 др}$ отдельно для температурных поддиапазонов $\Delta^+T = T_{max} - T_{норм}$ и $\Delta^-T = T_{норм} - T_{min}$, где

T_{max} – максимальная рабочая температура (333 К);

T_{min} – минимальная рабочая температура (233 К);

$T_{норм}$ – нормальная температура (298 К).

Симметрирование входов ОУ сводится к обеспечению равенства $R^- = R^+$, где R^- – сопротивление, приведенное к инвертирующему входу; R^+ – сопротивление, приведенное к неинвертирующему входу. Для схем на рис.1, б и 2, б $R^- = R_{oc} \cdot R1 / (R_{oc} + R1)$. Для симметрирования входов в схемы включены резисторы $R_{сим} = R^+ = R^- = R_{oc} \cdot R1 / (R_{oc} + R1)$. При наличии симметрирования входов значения неизменной $U_{вых0 н}$ и дрейфовой $U_{вых0 др}$ составляющих напряжения статической погрешности могут быть рассчитаны по формулам

$$U_{вых0 н} = R_{oc} \cdot U_{см} / R^- + R_{oc} \cdot \Delta I_{вх} ;$$

$$U_{вых0 др} = R_{oc} \cdot (\Delta U_{см} / \Delta T) \cdot \Delta T / R^- + R_{oc} \cdot (\Delta(\Delta I_{вх}) / \Delta T) \cdot \Delta T.$$

Значение дрейфовой составляющей рассчитывают отдельно для температурных поддиапазонов Δ^+T и Δ^-T , для дальнейших расчетов принимают наибольшую из них. Максимальное значение напряжения статической погрешности $U_{вых0}$ будет равно сумме полученных значений $U_{вых0} = U_{вых0 н} + U_{вых0 др}$. Эта напряжение будет в конечном итоге определять значение [динамического диапазона](#) D_{yc} проектируемого усилителя.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Для упрощенной оценки динамического диапазона введем понятие условного динамического диапазона $D_{\text{усл}} = U_{\text{вых max}}/U_{\text{вых0}}$. Максимальное значение $U_{\text{вых0}}$ может быть уменьшено за счет компенсации неизменной составляющей $U_{\text{вых0}}$ и при [балансировке ОУ](#). После проведения балансировки напряжение статической погрешности будет содержать только дрейфовую составляющую, и значение динамического диапазона увеличится: $D_{\text{усл Бал}} = U_{\text{вых max}}/U_{\text{вых0 др}}$. Составляющая $U_{\text{вых0}}$ может быть уменьшена за счет минимизации сопротивления $R_{\text{ос}}$. Пределы уменьшения $R_{\text{ос}}$ определяются конкретной схемой усилительного каскада и требованиями технического задания. Как правило, при применении неинвертирующего включения удастся добиться большего снижения величины $R_{\text{ос}}$.

Сущность балансировки заключается в подаче на вход ОУ небольшого балансирующего напряжения, регулируемого по абсолютной величине и знаку. Такое напряжение вырабатывается цепью балансировки, в составе которой предусматривается подстроечный переменный резистор. Изменяя с его помощью абсолютную величину и знак напряжения, и контролируя по чувствительному вольтметру выходное напряжение усилителя, сводят напряжение к возможно меньшему значению, в пределе – к нулю.

Вид цепей балансировки зависит от типа используемого ОУ и числа каскадов в составе усилителя. Если каскадов больше одного, цепью балансировки обеспечивается только первый каскад, а сама балансировка проводится по выходному напряжению последнего каскада. Для многих ОУ предусмотрены специальные выводы для подключения элементов цепи балансировки, в технических условиях (ТУ) приводятся конкретные схемы и данные элементов. В [табл. ПЗ](#) приложения приведены схемы для некоторых ОУ. Когда специальные выводы отсутствуют, используют стандартные схемы

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

балансировки (см., например, [3]). Одна из таких схем для инвертирующего включения показана на рис. 3, а, для неинвертирующего включения – на рис. 3, б.

В схеме для [инвертирующего](#) включения резистор $R_{\text{сим}}$ условно разбит на два резистора $R2$ и $R3$, причем должно выполняться $R_{\text{сим}} = R2 + R3$ и $R2 \gg R3$.

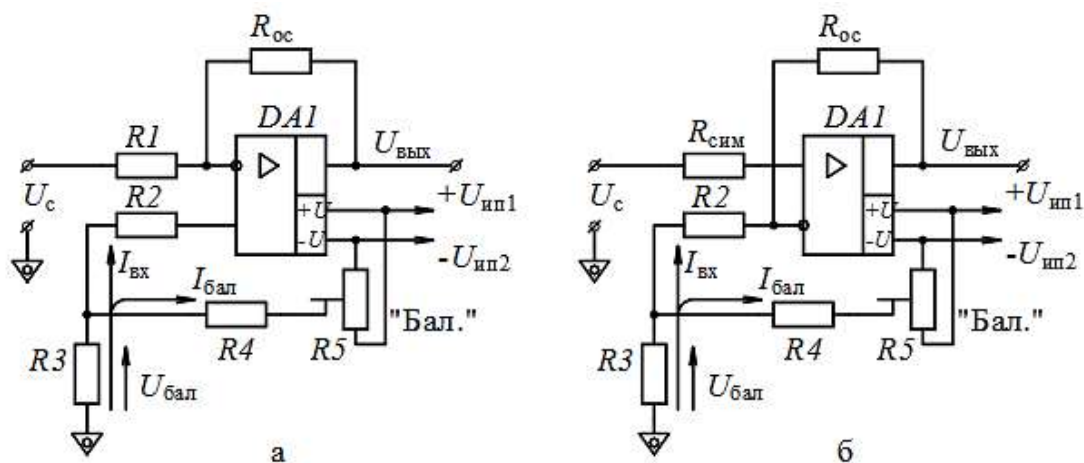


Рис. 3

Резисторы $R3$ и $R4$ образуют делитель напряжения $U_{\text{бал}}^*$, поступающего с движка потенциометра $R5$. При среднем положении движка потенциометра это напряжение равно нулю, а в крайних положениях оно максимально и равно соответственно $\pm U_{\text{пит}}$. В большинстве случаев выполняется $U_{\text{бал}}^*_{\text{max}} = \pm 15 \text{ В}$. Для того чтобы входной ток $I_{\text{вх}}$ ОУ не влиял на работу делителя напряжения, ток $I_{\text{бал}}$, протекающий через резисторы $R3$, $R4$, должен быть много больше тока $I_{\text{вх}}$, т.е. $I_{\text{бал}} \gg I_{\text{вх}}$. Максимальную абсолютную величину напряжения балансировки на выходе делителя $U_{\text{бал max}}$ следует выбирать из условия:

$$U_{\text{бал max}} = (3...5) \frac{U_{\text{вых0 н}}}{1 + R_{\text{oc}} / R1}.$$

Исходя из этих условий рассчитывают цепь [балансировки](#). Обычно расчет начинают с выбора сопротивления переменного резистора $R5$. Задают ток, протекающий через него, в пределах $1...3 \text{ мА}$, и определяют сопротивление $R5$. Далее задают на по-

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

рядок меньший ток $I_{\text{бал}}$, выбирают значение $U_{\text{бал max}}$ и вычисляют сопротивления $R3$ и $R4$ в соответствии с уравнением

$$U_{\text{бал max}} = R3 \cdot U_{\text{бал}}^*_{\text{max}} / (R3 + R4).$$

Затем проверяют выполнение неравенств $R2 \gg R3$, $R4 \gg R3$ и $I_{\text{бал}} \gg I_{\text{вх}}$. Обычно при этом $R_{\text{сим}} = R2 + R3 \approx R2$.

В схеме для неинвертирующего включения (рис. 3, б) на два резистора условно разбивают резистор $R1$, причем должно выполняться условие $R1 = R2 + R3$ и $R2 \gg R3$. Дальнейший расчет цепи балансировки проводят так же, как и для инвертирующего включения.

Неидеальность ОУ в отношении ширины полосы пропускания приводит к необходимости вводить цепи [частотной коррекции](#) ОУ в состав усилительного каскада, поскольку замыкание цепью отрицательной обратной связью (ООС) некорректированного ОУ, как правило, приводит к его неустойчивости или к значительному ухудшению качества работы усилительного каскада. Сложность цепи коррекции зависит от внутренней схемы ОУ (от числа его основных усилительных каскадов) и от глубины ООС. Для более глубокой ООС приходится вводить более «тяжелую» коррекцию, что приводит к сужению полосы пропускания ОУ в большей степени.

Как правило, цепи частотной коррекции разрабатываются производителями ОУ для каждого его типа и в соответствии с глубиной ООС, отражаемой в требуемом коэффициенте усиления по напряжению $K_{U(\text{оc})}$ проектируемого усилительного каскада и приводятся в ТУ или справочниках. Если данные корректирующих цепей приводятся в виде таблицы для дискретных значений $K_{U(\text{оc})}$, а требуемое значение коэффициента находится в промежутке между такими дискретными значениями, то необходимо применять коррекцию для меньшего значения $K_{U(\text{оc})}$ из таблицы. Примеры корректирующих цепей некоторых ОУ приведены в [табл. ПЗ](#) приложения. Некоторые ОУ имеют

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

внутреннюю схему, позволяющую выполнить цепь коррекции в виде всего лишь одного конденсатора с небольшой емкостью. В этом случае [цепь коррекции](#) может быть введена во внутреннюю схему ОУ, а такой усилитель называют ОУ с внутренней коррекцией.

В любом случае принятой цепи коррекции будет соответствовать определенный вид амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Эту конкретную АЧХ и следует использовать для дальнейшего построения на ее основе АЧХ проектируемого усилительного каскада. Для получения этой характеристики необходимо изобразить АЧХ ОУ для выбранной цепи коррекции в виде логарифмической АЧХ. Затем на поле этой характеристики провести линию параллельно оси частот на уровне $20 \lg K_{U(oc)}$ до пересечения с правой ветвью АЧХ ОУ. В результате будет получена асимптотическая логарифмическая АЧХ усилительного каскада (рис. 4).

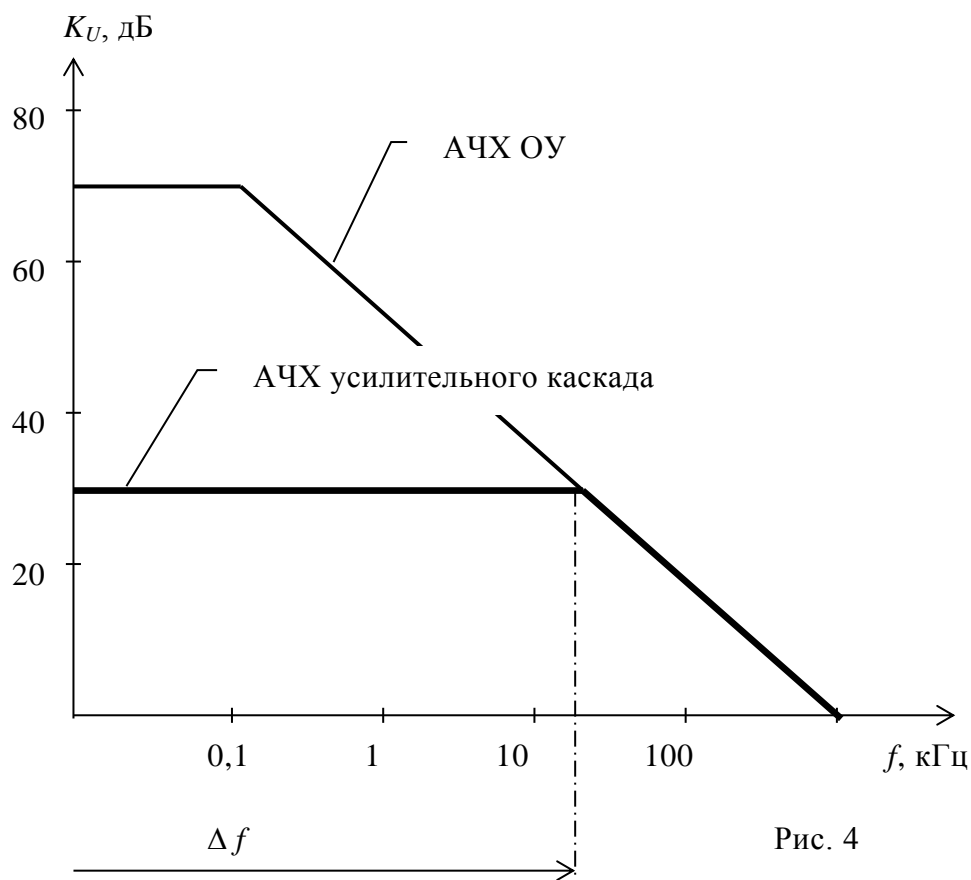


Рис. 4

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

В точке излома реальная логарифмическая АЧХ проходит ниже асимптотической логарифмической АЧХ усилительного каскада на 3 дБ, что позволяет определить ширину полосы пропускания усилителя на уровне 3 дБ по частоте, соответствующей точке излома.

Цепи питания ОУ должны строиться по схемам стабилизаторов напряжения. В многокаскадных усилителях с ОУ последние подключаются к источникам питания параллельно, поэтому необходимо принимать меры по предотвращению паразитных обратных связей. Для этого непосредственно у выводов ОУ, к которым должны подводиться питающие напряжения, должны устанавливаться шунтирующие керамические конденсаторы C^* емкостью (0,1...0,15) мкФ.

Для построения стабилизированных источников питания в простейших случаях можно использовать схемы параметрических стабилизаторов напряжения с использованием стабилитронов. Вариант такой схемы, на которой условно изображены только цепи питания, приведен на рис. 5. Здесь $VD1$, $VD2$ – стабилитроны, напряжение стабилизации $U_{ст}$ которых должно быть равно требуемому напряжению питания ОУ, а $R1$, $R2$ – ограничительные (балластные) резисторы.

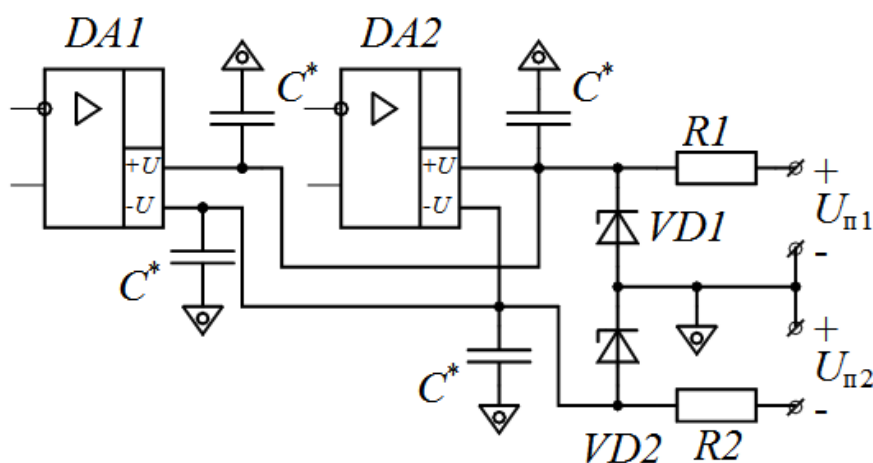


Рис. 5

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Из основного уравнения параметрического стабилизатора напряжения

$$U_{\text{п}} = U_{\text{н}} + (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}) R1 = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}) R1$$

следует

$$I_{\text{ст}} = (U_{\text{п}} - U_{\text{н}}) / R1 - U_{\text{н}} / R_{\text{н}}.$$

При изменениях напряжения источника питания в пределах от $U_{\text{п min}}$ до $U_{\text{п max}}$ и тока нагрузки от $I_{\text{н min}}$ до $I_{\text{н max}}$ сопротивление ограничительного резистора выбирают из соотношения $R1(2) \leq (U_{\text{п min}} - U_{\text{ст}}) / (I_{\text{ст min}} + I_{\text{н max}})$. Здесь $U_{\text{п min}}$ – минимальное значение напряжения на входе параметрического стабилизатора; $U_{\text{п max}}$ – максимальное значение напряжения на входе параметрического стабилизатора; $U_{\text{ст}}$ – напряжение стабилизации выбранного стабилитрона; $I_{\text{ст min}}$ – выбранное минимальное значение тока через стабилитрон; $I_{\text{н max}}$ – максимальный ток, потребляемый ОУ от параметрического стабилизатора.

Значения напряжений $U_{\text{п min}}$, $U_{\text{п max}}$ приводят в техническом задании в явном виде либо вычисляют. Токи $I_{\text{н min}}$ и $I_{\text{н max}}$ вычисляют применительно к конкретной схеме усилителя на основе ОУ как токи, потребляемые усилителем от источников питания при нулевом и максимальном входном (выходном) сигнале соответственно.

Полученное значение сопротивления $R1(2)$ округляют до ближайшего меньшего номинального значения сопротивления из ряда E24. Значение тока стабилитрона $I_{\text{ст min}}$ выбирают по справочным данным на конкретный стабилитрон, ориентируясь на возможно меньшее значение его дифференциального сопротивления при $T = 298 \text{ К}$.

Далее определяют значение максимального тока $I_{\text{ст max}}$ через стабилитрон при наихудших условиях $U_{\text{п}} = U_{\text{п max}}$, $I_{\text{н}} = I_{\text{н min}}$

$$I_{\text{ст max}} = (U_{\text{п max}} - U_{\text{ст}}) / R1 - I_{\text{н min}}.$$

Оно должно быть меньше предельно допустимого максимального тока стабилизации из справочных данных на выбранный стабилитрон.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Для оценки эффективности работы параметрического стабилизатора вычисляют так называемый коэффициент стабилизации [4]

$$K_{\text{ст}} = (R1 + r_{\text{ст}}) U_{\text{н}} / (r_{\text{ст}} U_{\text{п}}),$$

где $r_{\text{ст}}$ – дифференциальное сопротивление стабилитрона при $T = 298 \text{ К}$ и заданном токе стабилизации.

Более совершенная схема стабилизированного источника питания может быть построена с использованием интегральных микросхем стабилизаторов напряжения, которые выбираются в соответствии с необходимыми напряжениями питания и потребляемыми токами. Вариант такой схемы, в которой условно изображены только цепи питания, приведен на рис. 6.

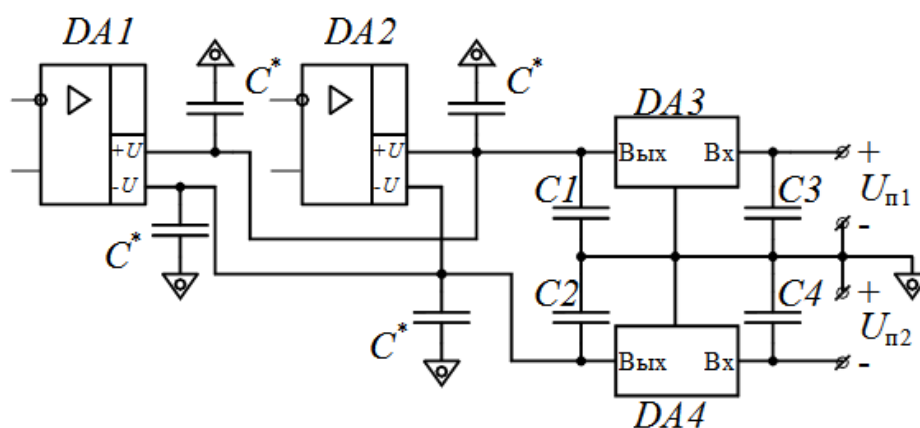


Рис. 6

Здесь $DA3$, $DA4$ – интегральные стабилизаторы напряжения с фиксированным напряжением стабилизации с положительной ($DA3$) и отрицательной ($DA4$) полярностью, $C1...C4$ – шунтирующие керамические конденсаторы, емкостью 1 мкФ , предусмотренные схемой включения интегрального стабилизатора напряжения. С разновидностями таких стабилизаторов можно познакомиться в [5].

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

Домашнее задание необходимо начать с выполнения условия получения максимально возможного динамического диапазона проектируемого усилителя. Как уже отмечалось, помимо выполнения других условий необходимо обеспечить условие $R_{oc} = \min$. Поэтому, при расчете элементов, обеспечивающих получение требуемых значений $R_{вх} \geq R_{вх \text{ ТЗ}}$; $K_U = K_{U \text{ ТЗ}} \pm \delta K_U$, необходимо предусматривать и это условие. В начале расчета полагаем ОУ [идеализированным](#) и затем учитываем его реальные параметры.

В каскаде на идеализированном ОУ с [инвертирующим включением](#) (схема на рис. 1, б) выполняются соотношения (1), поэтому возможность уменьшения сопротивления R_{oc} ограничивается необходимостью выполнения соотношений $RI = R_{вх \text{ инв}} \geq R_{вх \text{ ТЗ}}$ и $R_{oc(\min)} = RI_{\min} \cdot K_{U \text{ ТЗ}}$, откуда получим

$$RI = R_{вх \text{ ТЗ}} \quad \text{и} \quad R_{oc} = R_{oc(\min)} = R_{вх \text{ ТЗ}} \cdot K_{U \text{ ТЗ}}.$$

В каскаде на идеализированном ОУ с [неинвертирующим включением](#) (см. схему на рис. 2, б) выполняются соотношения (2), потому, при таком включении минимизация сопротивления R_{oc} возможна в большей степени, так как $R_{вх \text{ неин}}$ не зависит от R_{oc} . Тем не менее, и при этом включении минимальное значение $R_{oc(\min)}$ также ограничено. Дело в том, что последовательно включенные резисторы R_{oc} и RI создают дополнительную нагрузку для выхода ОУ, так как включены параллельно полезной нагрузке R_n и полное сопротивление нагрузки ОУ R_n^* будет равно $R_n^* = R_n // (R_{oc} + RI)$. Предельное уменьшение сопротивления R_{oc} определяется минимальной допустимой величиной сопротивления нагрузки ОУ $R_{n \text{ min}}$ – параметром ОУ. Положим

$$R_{n \text{ min}}^* = R_n // (R_{oc(\min)} + RI) = k_{\text{зап}} \cdot R_{n \text{ min}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса; $k_{\text{зап}} = 1,1 \dots 1,2$.

Кроме того, сопротивления $R_{oc(\min)}$ и RI связаны между собой уравнением

$$(1 + R_{oc(\min)} / RI) = K_{U \text{ ТЗ}} \quad (4)$$

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Решение системы из двух уравнений (3) и (4) дает требуемые значения $R_{oc} = R_{oc(min)}$ и RI .

Дальнейший расчет каскада для обоих включений ОУ сводится к определению величин сопротивлений $R_{сим}$. Далее расчет ведут в соответствии с условиями выполнения домашнего задания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ выполненного домашнего задания покажет студенту, что точные значения полученных основных технических показателей, таких, как коэффициенты усиления по напряжению $K_{U инв}$, $K_{U неин}$, входные сопротивления $R_{вх инв}$, $R_{вх неин}$ и выходные сопротивления $R_{вых инв}$, $R_{вых неин}$ незначительно отличаются в числовом выражении от аналогичных технических показателей каскадов на идеализированных ОУ. Это позволяет проводить анализ каскадов в первом приближении, пользуясь упрощёнными формулами для определения этих технических показателей.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Вопросы для самостоятельной проверки студентов

1. Что такое инвертирующее включение операционного усилителя? Нарисовать схему включения.
2. Что такое неинвертирующее включение операционного усилителя? Нарисовать схему включения.
3. Что такое идеализированный операционный усилитель? Его основные атрибуты.
4. Как определяется коэффициент усиления по напряжению каскада на идеализированном ОУ в инвертирующем включении?
5. Как определяется коэффициент усиления по напряжению каскада на идеализированном ОУ в неинвертирующем включении?
6. Как определяется входное сопротивление каскада на идеализированном ОУ в инвертирующем включении?
7. Как определяется входное сопротивление каскада на идеализированном ОУ в неинвертирующем включении?
8. Как определяется выходное сопротивление каскада на идеализированном ОУ в инвертирующем включении?
9. Как определяется входное сопротивление каскада на идеализированном ОУ в неинвертирующем включении?
10. Какая из схем включения ОУ является предпочтительной для получения минимальной величины напряжения статической погрешности $U_{\text{ВЫХ0}}$ при одинаковых требованиях технического задания?

Ответы на вопросы для самостоятельной проверки:

4. $K_{U \text{ инв}} = R_{\text{OC}} / R_1$. 5. $K_{U \text{ неин}} = (1 + R_{\text{OC}} / R_1)$. 6. $R_{\text{вх инв}} = R_1$. 7. $R_{\text{вх неин}} = \infty$.
 8. $R_{\text{вых инв}} = 0$. 9. $R_{\text{вых неин}} = 0$.
 10. Неинвертирующее включение.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Усредненные параметры интегральных операционных усилителей

Параметр	Тип операционного усилителя							
	К1401УД2А	К153УД1	К153УД2	К153УД5	К140УД6	К140УД7	К140УД8	К140УД14
$U_{\text{см}}$, мВ, не более	5	5	5	2,5	5	4	20	2
$\Delta U_{\text{см}}/\Delta T$, мкВ/ $^{\circ}\text{C}$	30	30	20	5	20	6	20	5
$I_{\text{вх}}$, нА, не более	150	600	500	125	30	200	0,15	2
$\Delta I_{\text{вх}}/\Delta T$, нА/ $^{\circ}\text{C}$	2,0	1,5	0,2	0,15	0,3	0,3	0,3	0,02
$\Delta I_{\text{вх}}$, нА, не более	30	250	200	35	10	50	0,02	0,5
$\Delta(\Delta I_{\text{вх}})/\Delta T$, нА/ $^{\circ}\text{C}$	0,4	1,7	2	0,5	0,1	0,4	0,3	0,5
K_U , не менее	50000	20000	20000	125000	70000	50000	25000	25000
$R_{\text{вх д}}$, кОм, не менее	200	100	300	1000	2000	400	10000	3000
$R_{\text{вых оу}}$, Ом, не более	200	200	50	150	200	200	200	200

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Окончание табл. П1

Параметр	Тип операционного усилителя							
	К1401УД2А	К153УД1	К153УД2	К153УД5	К140УД6	К140УД7	К140УД8	К140УД14
$\pm U_{\text{ип}}, \text{ В}$	± 15	± 15	± 15	± 15	± 15	± 15	± 15	± 15
$\pm U_{\text{вх max}}, \text{ В}$	± 13	± 5	± 15	± 5	± 15	± 12	± 10	± 15
$\pm U_{\text{вых max}}, \text{ В}$	± 12	± 10	± 11	± 10	± 11	$\pm 11,5$	± 10	± 10
$\pm U_{\text{вх сф max}}, \text{ В}$	$\pm U_{\text{ип}} - 2$	± 8	± 12	$\pm 13,5$	± 15	± 12	± 12	± 12
$I_{\text{пот}}, \text{ мА, не более}$	3	6	3	2	2,8	3	3	0,6
$R_{\text{н min}}, \text{ кОм}$	2	2	2	2	2	2	2	2
$K_{\text{ос сф}}, \text{ дБ, не менее}$	70	65	70	94	80	70	70	85
$f, \text{ МГц, не менее}$	1	1	1	0,1	1	0,8	0,5	1

**Шкалы номинальных величин сопротивлений резисторов
(ГОСТ 28884-90)**

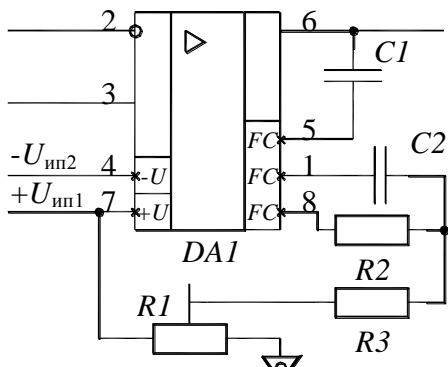
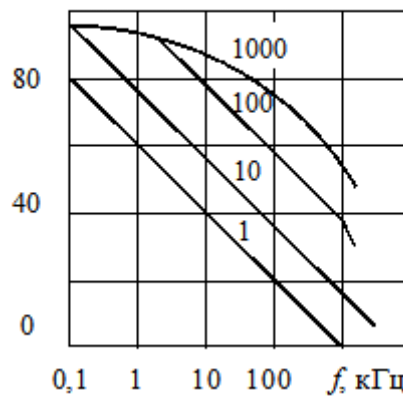
Ряд	δR , %	Номинальная величина сопротивления, Ом; кОм; МОм; ГОм
Е6	± 20	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10,0
Е12	± 10	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,0; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2; 10,0
Е24	± 5	1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1; 10,0
Е96	± 1	100; 102; 105; 107; 110; 113; 115; 118; 121; 124; 127; 130; 133; 137; 140; 143; 147; 150; 154; 158; 162; 165; 169; 174; 178; 182; 187; 191; 196; 200; 205; 210; 215; 221; 226; 232; 237; 243; 249; 255; 261; 267; 274; 280; 287; 294; 301; 309; 316; 324; 332; 340; 348; 357; 365; 374; 383; 392; 402; 412; 422; 432; 442; 453; 464; 475; 487; 499; 511; 523; 536; 549; 562; 576; 590; 604; 619; 634; 649; 665; 681; 698; 715; 732; 750; 768; 787; 806; 825; 845; 866; 887; 909; 931; 953; 976

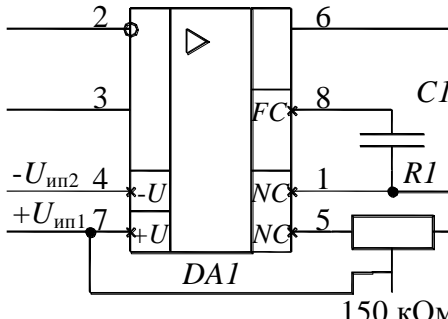
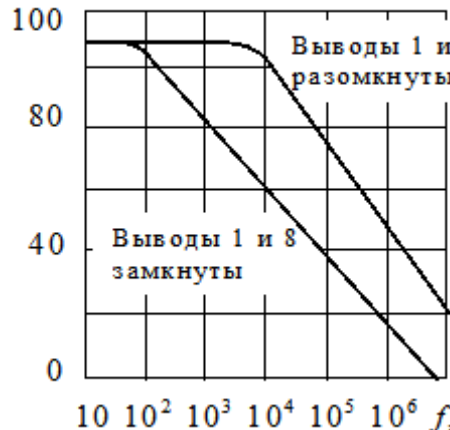
[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Частотные характеристики и цепи коррекции ОУ

Таблица ПЗ

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей				Примечание
<div>К153УД1</div> <div>R1=150 кОм; R3=470 кОм</div> 	<div>K_U, дБ К153УД1</div> 	$K_{U\text{oc}}$	$C2$, пФ	$R2$, кОм	$C1$, пФ	Можно получить $f_{\text{ср}}=1\text{МГц}$ при $K_{U\text{oc}}=1-10^3$
		Неинвертирующее включение				
		1 10 100 1000	5000 500 100 10	1,5 1,5 1,5 0	200 20 3 3	
		Инвертирующее включение				
1 10 100 1000	2500 450 100 10	1,5 1,5 1,5 0	100 18 3 3			

<div>К544УД2</div> 	<div>K_U, дБ К544УД2</div> 	При $K_{U\text{oc}} \leq 20$ $C1 = (1 \dots 50) \text{ пФ}$ или соединить выводы 1 и 8; При $K_{U\text{oc}} > 20$ $C1$ отсутствует				
		Неинвертирующее включение				
		1 10 100 1000	2500 450 100 10	1,5 1,5 1,5 0	100 18 3 3	
		Инвертирующее включение				
1 10 100 1000	2500 450 100 10	1,5 1,5 1,5 0	100 18 3 3			

[Оглавление](#)

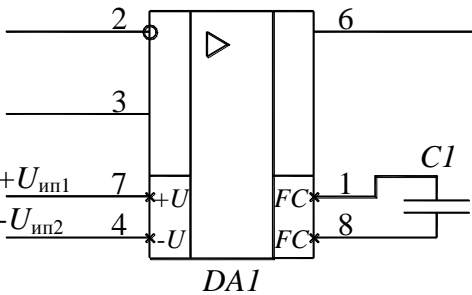
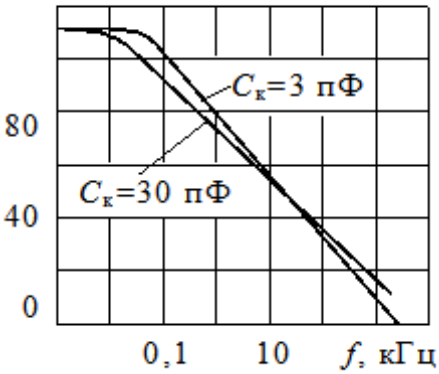
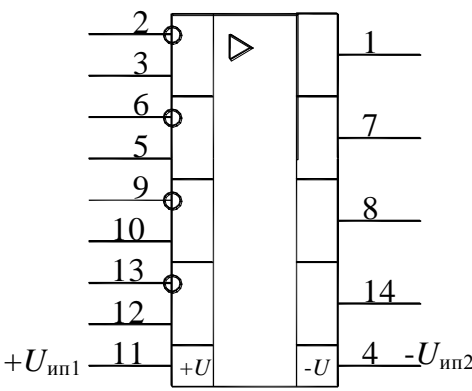
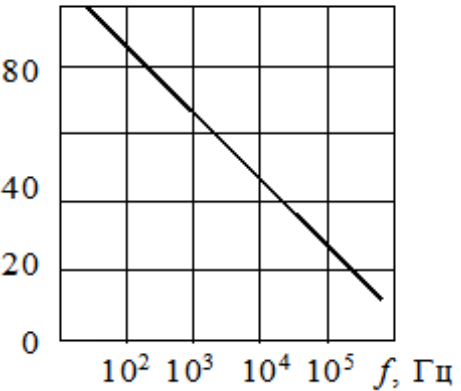
Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.

Продолжение табл.ПЗ

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
<div><p>К153УД2</p></div>			

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
<p>К140УД6, К140УД7</p>	<p>K_U, дБ К140УД6, УД7</p>	<p>Внутренняя частотная коррекция</p> <p>К140УД7 допускает включение $C_k \approx 70$ пФ между выводами 2 – 8, тем самым увеличивая скорость нарастания v до 20 В/мкс в инвертирующем включении</p>	
<p>К140УД8</p>	<p>K_U, дБ К140УД8</p>	<p>Внутренняя частотная коррекция</p>	

Окончание табл. ПЗ

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
<p>К140УД14</p> 	<p>K_U, дБ К140УД14</p> 	<p>$C1 \approx 30 \text{ пФ} / K_{U_{oc}}$ Если $K_{U_{oc}} \geq 100$, то $C1 = 3 \text{ пФ}$</p>	
<p>К1401УД2А</p> 	<p>K_U, дБ К1401УД2А</p> 	<p>Внутренняя частотная коррекция, возможна работа от одного источника питания, коэффициент разделения каналов 120 дБ</p>	

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: Учебник для вузов. -5-е изд., стер. –М.: Высш.шк., 2008.-797 с.: ил.
2. Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчёт усилителя постоянного тока с операционным усилителем: Методические указания к домашнему заданию по курсам «электронные устройства роботов» и «Электронные устройства в мехатронике» / под ред. Г.А. Орлова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 28 с.: ил.

Дополнительная литература

3. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/ Э.Т.Романычева, А.К.Иванова, А.С.Куликов и др. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1989 г. – 448с.
4. А.Г.Алексенко, Е.А.Коломбет, Г.И.Стародуб. Применение прецизионных аналоговых ИС.- М.: Радио и связь, 1981 г. – 224с.

[Оглавление](#)

Орлов Г.А., Токарев А.К. Расчет усилителя постоянного тока на основе операционных усилителей. Методические указания к домашнему заданию.