



Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана

## Методические указания

Г.А. Орлов, А.К. Токарев

# РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОПЕРАЦИОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

Г.А. Орлов, А.К. Токарев

## Расчет усилителя постоянного тока с операционным усилителем

*Методические указания  
к домашнему заданию по курсам  
«Электронные устройства роботов»  
и «Электронные устройства в мехатронике»*

*Под редакцией Г.А. Орлова*

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

2004

УДК 621.375.1

ББК 32.852.3

О-66

Рецензент *В.А. Коваленко*

**Орлов Г.А., Токарев А.К.**

О-66 Расчет 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.

ISBN 5-7038-2499-0

Методические указания содержат необходимые для выполнения домашнего задания сведения: исходные данные, необходимое содержание задания, краткие теоретические сведения, указания по выполнению и приложение со справочными материалами.

Для студентов специальностей «Роботы и робототехнические системы», «Мехатроника и робототехника».

УДК 621.375.1  
ББК 32.852.3

**Геннадий Аркадьевич Орлов**  
**Анатолий Константинович Токарев**

### **Расчет усилителя постоянного тока с операционным усилителем**

*Методические указания*

Редактор *С.А. Серебрякова*  
Корректор *Г.С. Беляева*  
Компьютерная верстка *Е.В. Зимакова*

Подписано в печать 15.04.2004. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.  
Печ. л. 1,5. Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 100 экз.  
Изд. № 135. Заказ № 757

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

ISBN 5-7038-2499-0

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004

Операционные усилители (ОУ) в интегральном исполнении являются одним из наиболее распространенных элементов, которые используют 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.

### **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. П1 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  $R_{вх\ TЗ}$  – минимальное требуемое значение входного сопротивления усилителя;  $K_{U\ TЗ}$  – требуемое значение коэффициента усиления по напряжению усилителя;  $\delta K_U$  – допустимая погрешность коэффициента усиления,  $\delta K_U = \pm 2\%$ .

В процессе выполнения задания необходимо:

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

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

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;

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

№ варианта	Тип ОУ	$K_{U_{T3}} /$ включение ОУ	$R_{вх}$ , кОм, не менее	$U_{п}$ , В
1	K1401УД2А	6 / инв.	5	±19
2	K1401УД2А	5 / неин.	7	±20
3	K153УД1	10 / инв.	10	±19
4	K153УД1	8 / неин.	10	±20
5	K153УД2	5 / инв.	20	±19
6	K153УД2	6 / неин.	15	±20
7	K153УД5	10 / инв.	20	±19
8	K153УД5	15 / неин.	10	±20
9	K140УД6	20 / инв.	10	±19
10	K140УД6	10 / неин.	20	±20
11	K140УД7	15 / инв.	10	±19
12	K140УД7	20 / неин.	20	±20
13	K140УД8	30 / инв.	20	±19
14	K140УД8	25 / неин.	20	±20
15	K140УД14	50 / инв.	15	±19
16	K140УД14	30 / неин.	20	±20
17	K1401УД2А	10 / инв.	10	±19
18	K1401УД2А	10 / неин.	15	±17
19	K153УД1	20 / инв.	15	±19
20	K153УД1	15 / неин.	15	±20
21	K153УД2	25 / инв.	10	±19
22	K153УД2	20 / неин.	12	±20
23	K153УД5	40 / инв.	10	±19
24	K153УД5	35 / неин.	12	±20
25	K140УД8	50 / инв.	200	±19
26	K140УД6	30 / инв.	20	±19
27	K140УД6	25 / неин.	15	±20
28	K140УД7	10 / инв.	50	±19
29	K140УД7	8 / неин.	40	±20
30	K140УД8	10 / инв.	100	±19
31	K140УД8	8 / неин.	50	±20
32	K140УД14	10 / инв.	60	±19
33	K140УД14	12 / неин.	50	±20

Продолжение

№ варианта	Тип ОУ	$K_{U_{T3}} /$ включение ОУ	$R_{вх}$ , кОм, не менее	$U_{п}$ , В
34	K1401УД2А	20 / инв.	6	±20
35	K1401УД2А	15 / неин.	5	±19
36	K153УД1	30 / инв.	9	±19
37	K153УД1	20 / неин.	6	±20
38	K153УД2	20 / инв.	15	±19
39	K153УД2	15 / неин.	14	±20
40	K153УД5	100 / инв.	5	±19
41	K153УД5	50 / неин.	8	±20
42	K140УД6	80 / инв.	7	±19
43	K140УД6	60 / неин.	5	±20
44	K140УД7	60 / инв.	6	±19
45	K140УД7	40 / неин.	8	±20
46	K140УД8	90 / инв.	10	±19
47	K140УД8	80 / неин.	9	±20
48	K140УД14	100 / инв.	8	±19
49	K140УД14	40 / неин.	5	±20
50	K140УД14	100 / инв.	100	±19

в) ширину полосы пропускания усилителя на уровне 3 дБ с учетом принятой схемы коррекции.

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

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 ОУ. При этом, как и в первом случае, необходимо выполнить задания пп. 2.1, 2.2, 2.3, аналогичные заданиям пп. 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:  $K_U$ ,  $\delta K_U$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ ;

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

4) 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 согласно 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  $R_I$  и  $R_{ос}$  нужно округлить до ближайших значений ряда E96 (ГОСТ 28884-90), сопротивление остальных резисторов – до значений ряда E24 (ГОСТ 28884-90).

Схемы вычерчивают карандашом; 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, предназначенный для построения различных устройств посредством организации на его основе глубокой отрицательной связи. Для этого ОУ должен быть выполнен по схеме с гальванической связью между каскадами, 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 коэффициентом усиления  $K_{Uд} = \infty$ , нулевым дрейфом нуля, бесконечно большим входным сопротивлением  $R_{вхд} = \infty$ , нулевым выходным сопротивлением  $R_{выхОУ} = 0$  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  $180^\circ$ . Применительно к идеализированному ОУ схема с инвертирующим включением имеет вид, представленный на рис. 1, а. В данной схеме действует параллельная отрицательная обратная связь по напряжению, для которой основным является уравнение  $I_c = I_{вх} + I_{ос}$ . Учитывая, что при  $K_{Uд} = \infty$   $U_{вхд} = 0$ , можно получить выражения для основных технических показателей такого усилительного каскада:

$$K_{Uинв} = R_{ос} / R_I; R_{вхинв} = R_I; R_{выхинв} = 0. \quad (1)$$

При введении в схему симметрирующего резистора  $R_{сим}$  (схема на рис. 1, б) и учете конечных значений  $K_{Uд}$ ,  $R_{вхд}$  и  $R_{выхОУ}$  выражения для основных технических показателей приобретают вид

$$K_{Uинв} = \frac{R_{ос} / R_I}{1 + \frac{R_{ос}}{K_U K_{вх} K_{вых}} \left( \frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{ос}} + \frac{1}{R_{вх} + R_{сим}} \right)},$$

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

$$R_{н}^* = R_{н} \parallel \left[ R_{ос} + R_I \parallel (R_{вхд} + R_{сим}) \right];$$

$$R_{вхинв} = R_I + \left[ R_{ос} \parallel (R_{вхд} + R_{сим}) \parallel \frac{R_{ос}}{K_U K_{вх} K_{вых}} \right];$$

$$R_{\text{ВЫХ ИНВ}} \cong R_{\text{ВЫХ}} \frac{K_{U \text{ ИНВ}}}{K_U} \parallel [R_{\text{ОС}} + RI \parallel (R_{\text{ВХ Д}} + R_{\text{СИМ}})].$$

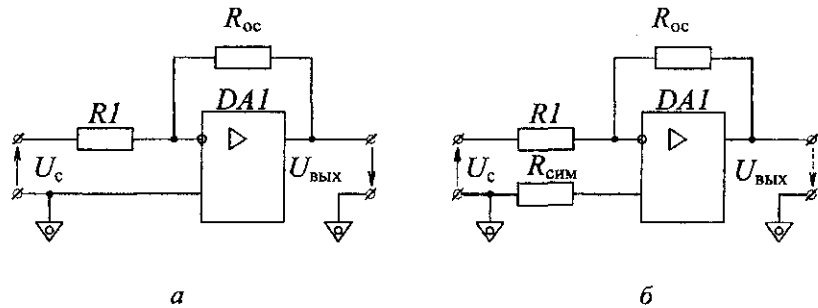


Рис. 1

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

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

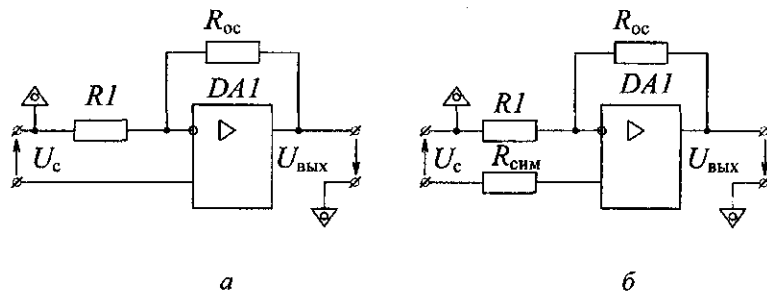


Рис. 2

При введении в схему симметрирующего резистора  $R_{\text{СИМ}}$  (схема на рис. 2, б) и учете конечных значений  $K_{U \text{ Д}}$ ,  $R_{\text{ВХ Д}}$  и  $R_{\text{ВЫХ (ОУ)}}$  выражения для основных технических показателей приобретают вид

$$K_{U \text{ НЕИН}} = \frac{1 + R_{\text{ОС}}/RI^*}{1 + \frac{1 + R_{\text{ОС}}/RI^*}{K_U K_{\text{ВХ}} K_{\text{ВЫХ}}}},$$

где  $RI^* = RI \parallel 2R_{\text{ВХ СФ}} \parallel (R_{\text{ВХ Д}} + R_{\text{СИМ}} \parallel 2R_{\text{ВХ СФ}})$ ;

$$2R_{\text{ВХ СФ}} = 0,5 R_{\text{ВХ Д}} 10^{(K_{\text{ОС Ф}} [\text{дБ}]/20)};$$

$$K_{\text{ВХ}} = \frac{R_{\text{ВХ Д}}}{R_{\text{ВХ Д}} + R_{\text{СИМ}}}; K_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{М}}^*}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}^*};$$

$$R_{\text{Н}}^* = R_{\text{Н}} \parallel [R_{\text{ОС}} + RI \parallel (R_{\text{ВХ Д}} + R_{\text{СИМ}})];$$

$$R_{\text{ВХ НЕИН}} = R_{\text{СИМ}} + \left\{ R_{\text{ВХ Д}} \left( \frac{K_U K_{\text{ВЫХ}}}{1 + R_{\text{ОС}}/RI^*} + 1 \right) \parallel 2R_{\text{ВХ СФ}} \right\};$$

$$R_{\text{ВЫХ НЕИН}} \cong \frac{R_{\text{ВЫХ}} K_{U \text{ НЕИН}}}{K_U} \parallel [R_{\text{ОС}} + RI \parallel (R_{\text{ВХ Д}} + R_{\text{СИМ}})].$$

Так как ОУ неидеален в отношении дрейфа нуля (напряжения статической погрешности), требуется учитывать воздействие параметров статической погрешности ОУ:

- 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  $\Delta T$ , наличия симметрирования входов ОУ и сопротивления 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 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  $R^- = R_{oc} RI / (R_{oc} + RI)$ . Для симметрирования входов в схемы включены резисторы  $R_{сим} = R^+ = R^- = R_{oc} RI / (R_{oc} + RI)$ . При наличии симметрирования входов значения неизменной  $U_{вых0 н}$  и дрейфовой  $U_{вых0 др}$  составляющих напряжения статической погрешности могут быть рассчитаны по формулам

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

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

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

Для упрощенной оценки динамического диапазона введем понятие условного динамического диапазона  $D_{усл} = U_{вых max} / U_{вых0}$ . Максимальное значение  $U_{вых0}$  может быть уменьшено за счет компенсации неизменной составляющей  $U_{вых0 н}$  при балансировке ОУ. После проведения балансировки напряжение статической погрешности будет содержать только дрейфовую составляющую, и значе-

ние динамического диапазона увеличится:  $D_{усл б} = U_{вых max} / U_{вых0 др}$ . Составляющая  $U_{вых0}$  может быть также уменьшена за счет минимизации сопротивления  $R_{oc}$ . Пределы уменьшения  $R_{oc}$  определяются конкретной схемой усилительного каскада и требованиями технического задания. Как правило, при применении неинвертирующего включения удается добиться большего снижения  $R_{oc}$ .

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 балансировки некоторых ОУ. Когда специальные выводы отсутствуют, используют стандартные схемы 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  $R_{сим}$  условно разбит на два резистора  $R2$  и  $R3$ , причем должно выполняться  $R_{сим} = R2 + R3$  и  $R2 \gg R3$ . Резисторы  $R3$  и  $R4$  образуют делитель напряжения  $U_{бал}^*$ , поступающего с движка потенциометра  $R5$ . При среднем положении движка потенциометра это напряжение равно нулю, а в крайних положениях оно максимально и равно соответственно  $\pm U_{пит}$ . В большинстве случаев  $U_{бал max} = \pm 15$  В. Для того чтобы входной ток  $I_{вх}$  ОУ не влиял на работу делителя напряжения, ток  $I_{бал}$ , протекающий через резисторы  $R3$ ,  $R4$ , должен быть много больше тока  $I_{вх}$ , т. е.  $I_{бал} \gg I_{вх}$ . Максимальную абсолютную величину напряжения балансировки на выходе делителя  $U_{бал max}$  следует выбирать из условия:  $U_{бал max} = (5 \dots 10) U_{см}$ . Исходя из этих условий рассчиты-

вают цепь балансировки. Обычно расчет начинают с выбора сопротивления переменного резистора  $R5$ . Задают ток, протекающий через него, в пределах  $1 \dots 5$  мА, и определяют сопротивление  $R5$ . Далее задают на порядок меньший ток  $I_{\text{бал}}$ , выбирают значение  $U_{\text{бал max}}$  и вычисляют сопротивления  $R3$  и  $R4$  в соответствии с уравнением

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

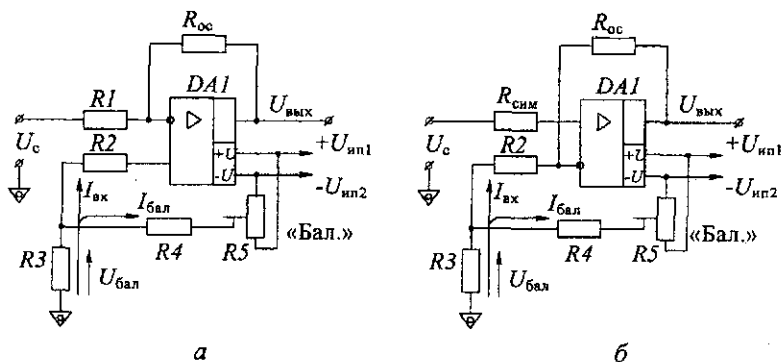


Рис. 3

Затем проверяют выполнение неравенств  $R2 \gg R3$  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  $R1$ , 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 связи (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 глуби-

ной ООС, отражаемой в требуемом коэффициенте усиления по напряжению  $K_{U(\text{oc})}$  проектируемого усилительного каскада и приводятся в ТУ или справочниках. Если данные корректирующих цепей приводятся в виде таблицы для дискретных значений  $K_{U(\text{oc})}$ , а требуемое значение коэффициента находится в промежутке между такими дискретными значениями, необходимо применять коррекцию для меньшего значения  $K_{U(\text{oc})}$  из таблицы. Примеры корректирующих цепей некоторых ОУ приведены в табл. ПЗ приложения. Некоторые ОУ имеют 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  $20 \lg K_{U(\text{oc})}$  до пересечения с правой ветвью АЧХ ОУ. В результате будет получена асимптотическая логарифмическая АЧХ усилительного каскада (рис. 4).

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, нужно устанавливать шунтирующие конденсаторы  $C^*$  емкостью  $(0,1 \dots 0,15)$  мкФ.

Для построения стабилизированных источников питания в простейших случаях можно использовать схемы параметрических стабилизаторов напряжения с использованием стабилитронов. Ва-



риант 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 резисторы, сопротивление которых рассчитывается в соответствии с известной формулой [4]

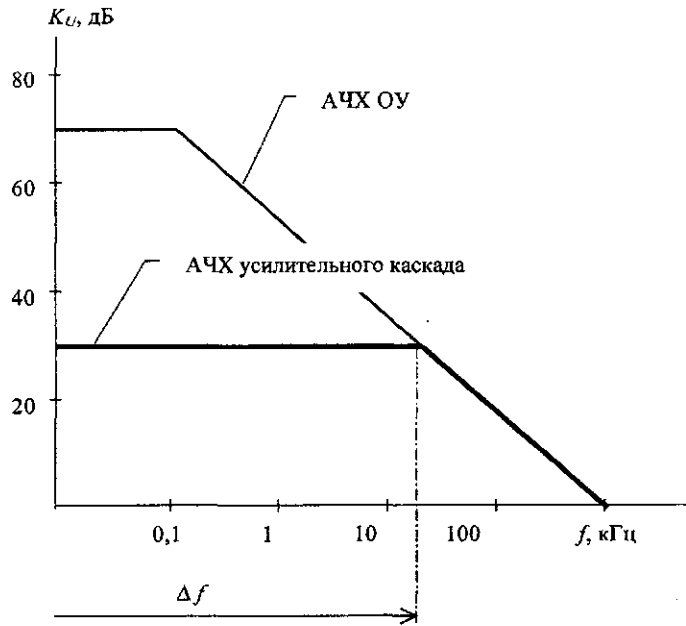


Рис. 4

$$R1(2) \leq (U_{п \text{ min}} - U_{ст}) / (I_{ст \text{ min}} + I_{п \text{ max}}),$$

где  $U_{п \text{ min}}$  – минимальное значение напряжения на входе параметрического стабилизатора;  $U_{ст}$  – напряжение стабилизации выбранного стабилитрона;  $I_{ст \text{ min}}$  – выбранное минимальное значение тока через стабилитрон;  $I_{п \text{ max}}$  – максимальный ток, потребляемый ОУ от параметрического стабилизатора.

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.

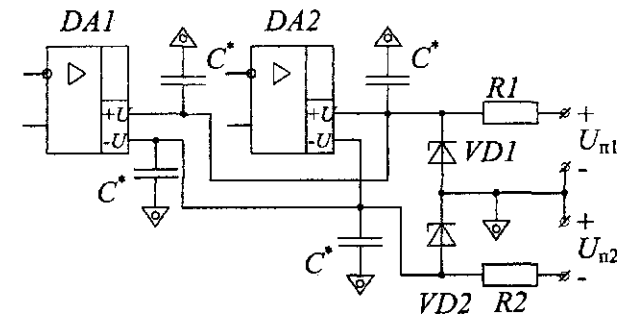


Рис. 5

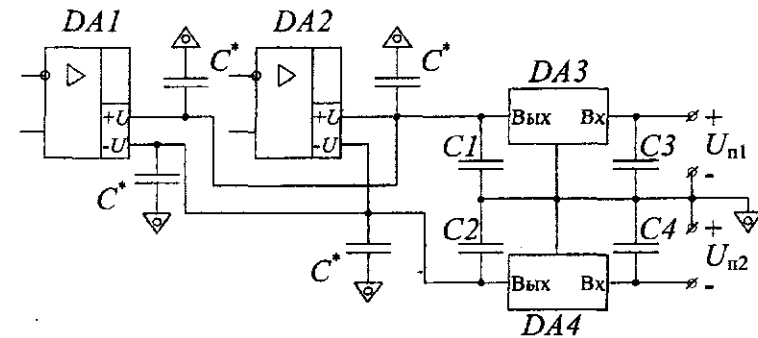


Рис. 6

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

## 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  $R_{вх} \geq R_{вх\ T3}$ ;  $K_U = K_{U\ T3} \pm \delta K_U$ , 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  $RI = R_{вх\ инв} \geq R_{вх\ T3}$  и  $R_{oc(min)} = RI_{\min} K_{U\ T3}$ , откуда получим

$$RI = R_{вх\ T3} \text{ и } R_{oc} = R_{oc(min)} = R_{вх\ T3} K_{U\ T3}.$$

В каскаде на идеализированном ОУ с неинвертирующим включением (см. схему на рис. 2, б) выполняются соотношения (2), поэтому при таком включении минимизация сопротивления  $R_{oc}$  возможна в большей степени, так как  $R_{вх\ неин}$  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  $R_n^* = R_n \parallel (R_{oc} + RI)$ . Предельное уменьшение сопротивления  $R_{oc}$  определяется минимально допустимым значением сопротивления нагрузки ОУ  $R_{n\ min}$  — параметром ОУ. Положим

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

где  $k_{зап}$  — коэффициент запаса;  $k_{зап} = 1,05 \dots 1,1$ .

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

$$(1 + R_{oc(min)} / RI) = K_{U\ T3}. \quad (4)$$

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 сопротивлений  $R_{сим}$ . Далее расчет ведут в соответствии с условиями выполнения домашнего задания.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Таблица П1

Усредненные параметры интегральных операционных усилителей

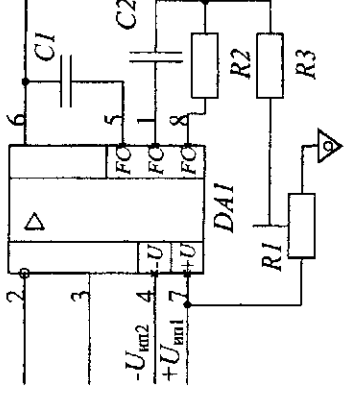
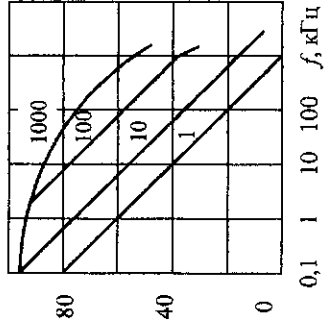
Параметр	Тип операционного усилителя							
	К1401УД2А	К153УД1	К153УД2	К153УД5	К140УД6	К140УД7	К140УД8	К140УД14
$U_{см}$ , мВ, не более	5	5	5	2,5	5	4	20	2
$\Delta U_{см}/\Delta T$ , мкВ/°С	30	30	20	5	20	6	20	5
$I_{вх}$ , нА, не более	150	600	500	125	30	200	0,15	2
$\Delta I_{вх}/\Delta T$ , нА/°С	2,0	1,5	0,2	0,15	0,3	0,3	0,3	0,02
$\Delta I_{вх}$ , нА, не более	30	250	200	35	10	50	0,02	0,5
$\Delta(\Delta I_{вх})/\Delta T$ , нА/°С	0,4	1,7	2	0,5	0,1	0,4	0,3	0,5
$K_{U\ Д}$ , не менее	50 000	20 000	20 000	125 000	70 000	50 000	25 000	25 000
$K_{ос\ сф}$ , дБ, не менее	70	65	70	94	80	70	70	85

Параметр	Тип операционного усилителя									
	К1401УД2А	К153УД1	К153УД2	К153УД5	К140УД6	К140УД7	К140УД8	К140УД14		
$R_{вх\ до}$ кОм, не менее	200	100	300	1000	2000	400	10000	3000		
$f$ , МГц, не менее	1	1	1	0,1	1	0,8	0,5	1		
$R_{вых\ от}$ , Ом, не более	200	200	50	150	200	200	200	200		
$\pm U_{итп}$ , В	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$		
$\pm U_{вх\ макс}$ , В	$\pm 13$	$\pm 5$	$\pm 15$	$\pm 5$	$\pm 15$	$\pm 12$	$\pm 10$	$\pm 15$		
$\pm U_{вых\ макс}$ , В	$\pm 12$	$\pm 10$	$\pm 11$	$\pm 10$	$\pm 11$	$\pm 11,5$	$\pm 10$	$\pm 10$		
$\pm U_{вх\ оф\ макс}$ , В	$\pm U_{итп} - 2$	$\pm 8$	$\pm 12$	$\pm 13,5$	$\pm 15$	$\pm 12$	$\pm 12$	$\pm 12$		
$I_{пот}$ , мА, не более	3	6	3	2	2,8	3	3	0,6		
$R_{я\ плп}$ , кОм	2	2	2	2	2	2	2	2		

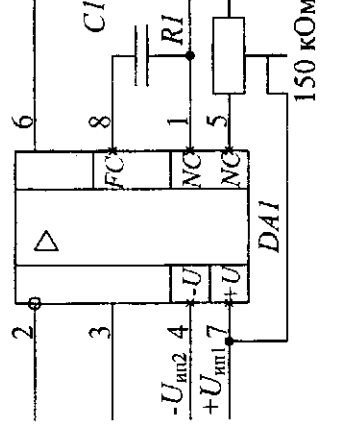
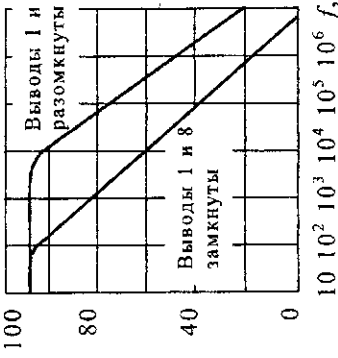
Шкалы номинальных величин сопротивлений резисторов (ГОСТ 28884-90)

Ряд	$\delta R$ , %	Номинальная величина сопротивления, Ом; кОм; МОм; ГОм
E6	$\pm 20$	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8; 10,0
E12	$\pm 10$	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
E24	$\pm 5$	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
E96	$\pm 1$	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

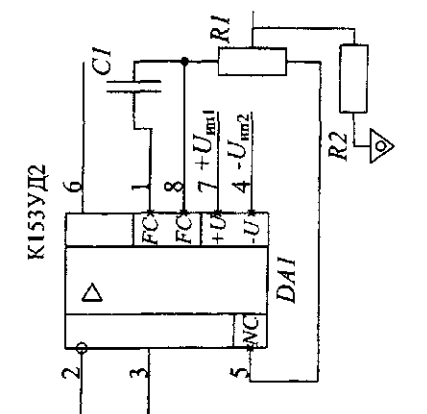
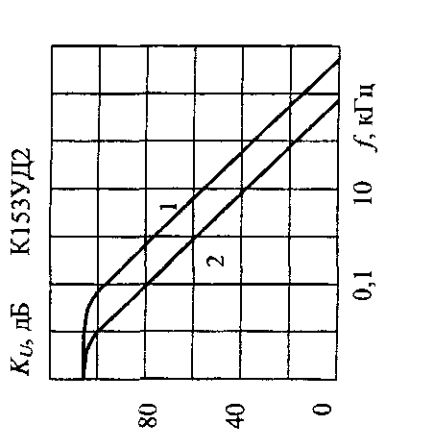
Частотные характеристики и цепи коррекции ОУ

<p>Включение</p> <p>К153УД1</p> <p><math>R1 = 150 \text{ кОм}; R3 = 470 \text{ кОм}</math></p> 	<p>Частотные характеристики</p> 	<p>Параметры внешних цепей</p> <table border="1"> <tr> <td><math>K_{Uoc}</math></td> <td><math>C2</math>, пФ</td> <td><math>R2</math>, кОм</td> <td><math>C1</math>, пФ</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Неинвертирующее включение</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>5000</td> <td>1,5</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>500</td> <td>1,5</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>100</td> <td>1,5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>10</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Инвертирующее включение</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2500</td> <td>1,5</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>450</td> <td>1,5</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>100</td> <td>1,5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>10</td> <td>0</td> <td>3</td> </tr> </table>	$K_{Uoc}$	$C2$ , пФ	$R2$ , кОм	$C1$ , пФ	Неинвертирующее включение				1	5000	1,5	200	10	500	1,5	20	100	100	1,5	3	1000	10	0	3	Инвертирующее включение				1	2500	1,5	100	10	450	1,5	18	100	100	1,5	3	1000	10	0	3	<p>Примечание</p> <p>Можно получить <math>F_{cp} = 1 \text{ МГц}</math> при <math>K_{Uoc} = 1-10^3</math></p>
$K_{Uoc}$	$C2$ , пФ	$R2$ , кОм	$C1$ , пФ																																												
Неинвертирующее включение																																															
1	5000	1,5	200																																												
10	500	1,5	20																																												
100	100	1,5	3																																												
1000	10	0	3																																												
Инвертирующее включение																																															
1	2500	1,5	100																																												
10	450	1,5	18																																												
100	100	1,5	3																																												
1000	10	0	3																																												

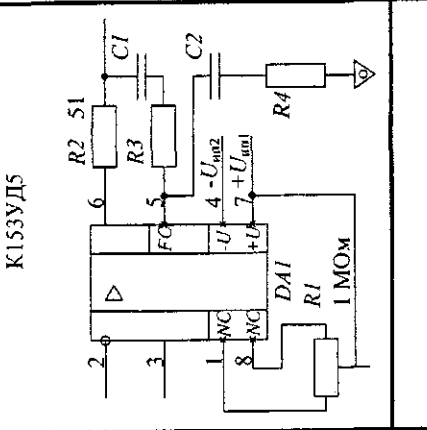
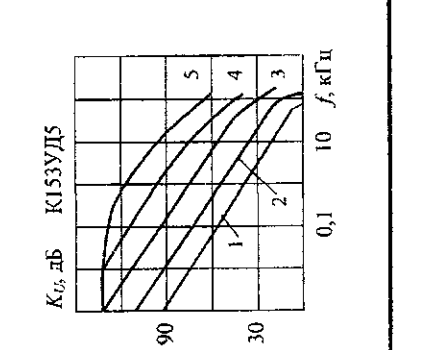
Продолжение табл. ПЗ

<p>Включение</p> <p>К544УД2</p> 	<p>Частотные характеристики</p> 	<p>Параметры внешних цепей</p> <p>При <math>K_{Uoc} \leq 20</math>  <math>C1 = (1 \dots 50) \text{ пФ}</math>          или соединить выходы 1 и 8;          При <math>K_{Uoc} &gt; 20</math>  <math>C1</math> отсутствует</p>	<p>Примечание</p>
--	---	---	-------------------

Продолжение табл. ПЗ

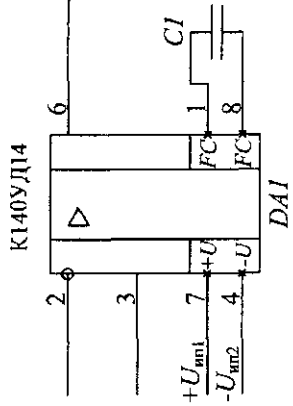
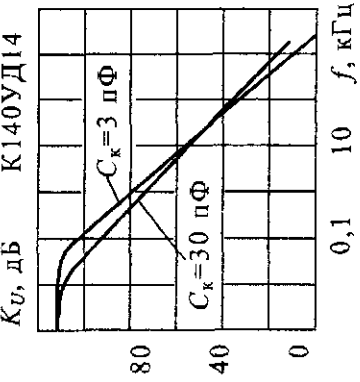
<p>Включение</p> 	<p>Частотные характеристики</p> <p>К153УД2</p> 	<p>Параметры внешних цепей</p> <p><math>C1 = 30</math> пФ / <math>K_{U,oc}</math>          Для <math>K_{U,oc} &gt; 10</math> выбирать  <math>C1 = 3</math> пФ,  <math>R1 = R2 \geq 1</math> МОм          При <math>K_{U,oc} &gt; 10</math>  <math>v \approx 5</math> В/мкс</p>	<p>Примечание</p> <p>При <math>K_{U,oc} &gt; 10</math> скорость нарастания <math>v \approx 5</math> В/мкс</p>
--	--	--	---

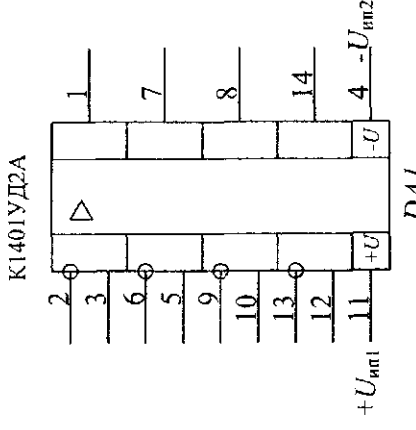
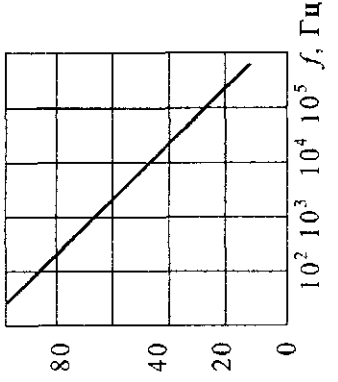
Продолжение табл. ПЗ

<p>Включение</p> <p>К153УД5</p> 	<p>Частотные характеристики</p> <p>К153УД5</p> 	<p>Параметры внешних цепей</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>№</th> <th><math>K_{U,oc}</math></th> <th><math>R3</math>, Ом</th> <th><math>C1</math>, мкФ</th> <th><math>R4</math>, Ом</th> <th><math>C2</math>, мкФ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>39</td> <td>0,02</td> <td>10</td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>270</td> <td><math>10^{-4}</math></td> <td>27</td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>47</td> <td><math>10^{-2}</math></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><math>10^3</math></td> <td>0</td> <td>0</td> <td>470</td> <td><math>10^{-3}</math></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td><math>10^4</math></td> <td>0</td> <td>0</td> <td><math>10^4</math></td> <td><math>5 \cdot 10^{-5}</math></td> </tr> </tbody> </table>	№	$K_{U,oc}$	$R3$ , Ом	$C1$ , мкФ	$R4$ , Ом	$C2$ , мкФ	1	1	39	0,02	10	0,05	2	10	270	$10^{-4}$	27	0,05	3	100	0	0	47	$10^{-2}$	4	$10^3$	0	0	470	$10^{-3}$	5	$10^4$	0	0	$10^4$	$5 \cdot 10^{-5}$	<p>Примечание</p>
№	$K_{U,oc}$	$R3$ , Ом	$C1$ , мкФ	$R4$ , Ом	$C2$ , мкФ																																		
1	1	39	0,02	10	0,05																																		
2	10	270	$10^{-4}$	27	0,05																																		
3	100	0	0	47	$10^{-2}$																																		
4	$10^3$	0	0	470	$10^{-3}$																																		
5	$10^4$	0	0	$10^4$	$5 \cdot 10^{-5}$																																		

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

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
<p>К140УД8</p>	<p><math>K_U</math>, дБ    К140УД8</p>	<p>Внутренняя частотная коррекция</p>	

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
 <p>K140UD14</p>	 <p>K140UD14</p> <p><math>C_k = 30 \text{ пФ}</math></p> <p><math>C_k = 3 \text{ пФ}</math></p>	<p><math>C1 \approx 30 \text{ пФ} / K_{U_{oc}}</math>          Если <math>K_{U_{oc}} \geq 100</math>, то  <math>C1 = 3 \text{ пФ}</math></p>	

Включение	Частотные характеристики	Параметры внешних цепей	Примечание
 <p>K1401UD2A</p>	 <p>K1401UD2A</p>	<p>Внутренняя частотная коррекция, возможна работа от одного источника питания, коэффициент разделения каналов 120 дБ</p>	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справ. / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 448 с.

2. Саптаров В.Е., Максимов Н.А. Системы стандартов в электро-связи и радиоэлектронике. М.: Радио и связь, 1985.

3. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. М.: Радио и связь, 1981. 224 с.

4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1982. 496 с.

5. Интегральные микросхемы: Микросхемы для линейных источников питания и их применение. М.: ДОДЭКА, 1996. 288 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Исходные данные и условия домашнего задания .....	3
Краткие теоретические сведения.....	6
Указания к выполнению домашнего задания.....	16
Приложение .....	17
Список литературы .....	28