



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Методические указания
к выполнению расчетно-графического задания
по дисциплине

«Сенсорные и электронные элементы мехатронных систем»
для студентов специальностей:

7.092501- «Автоматизированное управление технологическими
процессами»

7.092502- «Компьютерно-интегрированные технологические
процессы и производство»
дневной и заочной форм обучения

Севастополь
2007



УДК 621.396.6.038.6

Расчет усилителей информационных сигналов мехатронных систем: Методические указания к выполнению расчетно-графического задания/Сост.: Ю. К. Сопин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007 – 32 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в изучении методов расчета усилителей информационных сигналов мехатронных систем и принципов их имитационного моделирования в среде «CIRCUITMAKER». Рассмотрены инженерные методики расчета электронных усилителей на биполярных транзисторах и интегральных микросхемах. Представлены базовые электрические схемы указанных устройств. Методические указания предназначены для студентов специальностей 7.092501, 7.092502 дневной и заочной форм обучения.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» «26» января 2007 г., протокол № 5.

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

Рецензент:

Копп В.Я., доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные приборные системы»

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Цель расчетно-графического задания.....	4
1.Краткие теоретические сведения.....	5
1.1 Транзисторные усилители.....	5
1.1.1 Усилитель с общим эмиттером.....	5
1.1.2 Усилитель с общим коллектором.....	6
1.1.3 Транзисторный ключ.....	7
1.2 Интегральные операционные усилители.....	8
1.2.1 Инвертирующий усилитель.....	11
1.2.2 Неинвертирующий усилитель.....	11
1.2.3 Дифференциальный усилитель.....	11
1.2.4 Мощные операционные усилители.....	11
2. Расчет усилителей информационных сигналов.....	13
2.1 Расчет усилителя с общим эмиттером.....	13
2.2 Расчет усилителя с общим коллектором.....	17
2.3 Расчет транзисторного ключа.....	20
2.4 Расчет инвертирующего усилителя.....	21
2.5 Расчет неинвертирующего усилителя.....	22
2.6 Расчет дифференциального усилителя.....	23
2.7 Расчет мощных операционных усилителей.....	24
Содержание расчетно-графического задания.....	25
Варианты индивидуальных заданий.....	26
Содержание отчета.....	29
Контрольные вопросы.....	29
Перечень используемых единиц измерения.....	30
Перечень сокращений.....	30
Библиографический список.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Информационные сигналы мехатронных систем (МС) изменяются во времени непрерывно (аналоговые сигналы), либо дискретно (цифровые, импульсные сигналы). Усиление мощности информационных сигналов МС осуществляется с помощью электронных усилителей, построенных на дискретных элементах (**биполярные и полевые транзисторы**) и интегральных микросхемах (**интегральные операционные усилители**). В зависимости от характера информационного сигнала различают **аналоговые** и **импульсные** усилители мощности.

В процессе проектирования электронного усилителя составляется его электрическая принципиальная схема и перечень ее элементов. При составлении данного перечня элементы электрической принципиальной схемы устройства нумеруются с помощью буквенно-цифровой системы обозначений, принятой в соответствии с единой системой конструкторской документации (ЕСКД) [10]:

C – конденсаторы;

D – микросхемы;

DA – аналоговые микросхемы;

DD – цифровые микросхемы.

L – индуктивности;

R – резисторы;

VD – полупроводниковые диоды;

VT – транзисторы.

Нумерация указанных элементов осуществляется в направлении «сверху - вниз» и «слева - направо»: **C1, D2, DA3, DD4, L5, R6, VD7, VT8** и т. п. Нумерация отдельных устройств в составе одной микросхемы (например, **DD4**) имеет вид: **DD4.1; DD4.2; DD4.3; DD4.4** и т.д.

ЦЕЛЬ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Целью расчетно-графического задания является изучение студентами инженерных методик расчета электронных усилителей информационных сигналов, реализованных на биполярных транзисторах и интегральных микросхемах, а также освоение принципов их имитационного моделирования в среде «CIRCUITMAKER».

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Транзисторные усилители

Схемы транзисторных усилителей классифицируются по названию заземленного (общего) электрода используемого транзистора (электроды биполярных и полевых транзисторов соответственно эмиттер, коллектор, база и исток, сток, затвор). Существует три схемы включения биполярных транзисторов: схемы с **общим эмиттером** (ОЭ), с **общим коллектором** (ОК), с **общей базой** (ОБ). В транзисторных усилителях **аналогового** сигнала усилительный элемент – биполярный (полевой) транзистор работает в **активном режиме**, когда электрическое сопротивление участка коллектор – эмиттер (сток – исток) **изменяется** по закону входного сигнала. Усиление мощности **импульсных сигналов** осуществляется с помощью **транзисторного ключа** (ТК). Усилительный элемент ТК работает в **ключевом режиме**, когда электрическое **сопротивление** участка **коллектор – эмиттер** (сток – исток) **изменяется скачком** от минимального (в идеале нулевого) значения – транзистор **насыщен** до максимального (в идеале бесконечного) значения – транзистор **закрит**. Управление сопротивлением ТК осуществляется входным (управляющим) сигналом.

Усилительные свойства биполярного транзистора характеризуются коэффициентами передачи тока эмиттера $\alpha = I_K / I_E$ и тока базы $\beta = I_K / I_B$, где I_K, I_E, I_B – ток коллектора, эмиттера и базы соответственно. Параметры α и β связаны соотношениями: $\alpha = \beta / (1 + \beta)$; $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$.

Основными параметрами усилителей информационных сигналов (УИС) являются коэффициенты усиления по напряжению K_u по току K_i и по мощности K_p :

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} ; K_i = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}} ; K_p = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_u \cdot K_i ,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВХ}}, P_{\text{ВЫХ}}, P_{\text{ВХ}}$ – напряжение, ток и мощность на выходе (на нагрузке) и на входе усилителя соответственно [11].

1.1.1 Усилитель с общим эмиттером

Электрическая схема усилителя с **общим эмиттером** представлена на рисунке 1. В данной схеме входной и выходной сигналы **сдвинуты по фазе** на угол π .

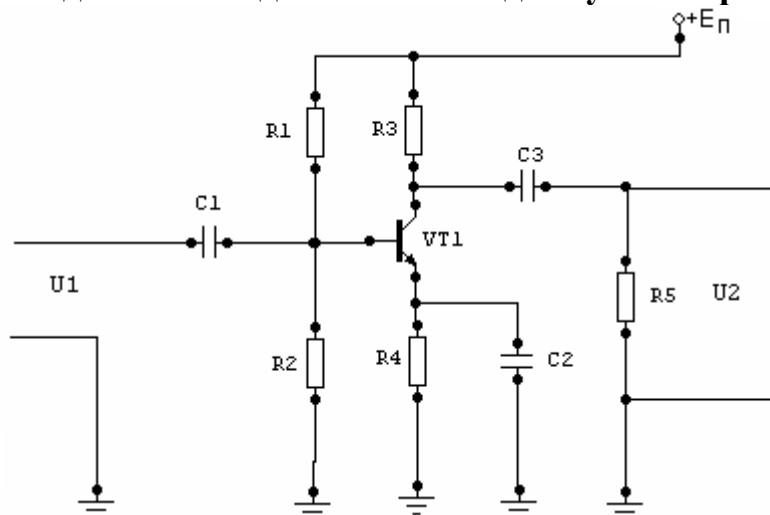


Рисунок 1 – Электрическая схема усилителя с общим эмиттером

Усилитель с общим эмиттером, обеспечивая усиление по **току** и по **напряжению**, обладает **низким входным** сопротивлением и относительно **высоким** выходным сопротивлением. Для обеспечения заданного коэффициента усиления по переменному току резистор $R_э$ в эмиттерной цепи транзистора шунтируется конденсатором $C_э$. На частоте f_c информационного сигнала импеданс эмиттерной цепи $Z_э$ соответствует параллельному соединению резистора $R_э$ и емкостного сопротивления $X_c = 1/j\omega_c C_э$ конденсатора $C_э$.

В режиме **холостого хода** на выходе усилителя с общим эмиттером модуль его коэффициента усиления $|K_u|_{оэ}$ определяется выражением

$$|K_u|_{оэ} = \alpha \cdot (R_k/R_э) \cdot \sqrt{1 + (\omega_c R_э C_э)^2},$$

где $R_k, R_э$ – активное сопротивление в коллекторной и эмиттерной цепи транзистора соответственно; $\omega_c = 2\pi f_c$ – круговая частота информационного сигнала.

При **фиксированном сопротивлении нагрузки** R_n параметр $|K_u|_{оэ}$ зависит от эквивалентного сопротивления нагрузки $R_{н.экв.оэ}$

$$|K_u|_{оэ} = \alpha \cdot (R_{н.экв.оэ}/R_э) \cdot \sqrt{1 + (\omega_c R_э C_э)^2},$$

где $R_{н.экв.оэ} = [(R_k \cdot R_n)/(R_k + R_n)]$.

1.1.2 Усилитель с общим коллектором

Электрическая схема усилителя с **общим коллектором** (**эмиттерный повторитель**) представлена на рисунке 2.

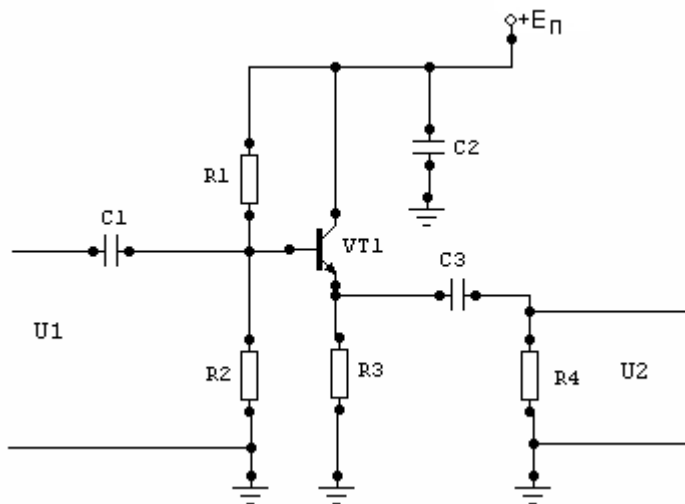


Рисунок 2 – Электрическая схема усилителя с общим коллектором

Данная схема **не изменяет фазу** входного сигнала, обладает **высоким входным** и достаточно **низким выходным** сопротивлением; коэффициент усиления по напряжению **меньше** единицы, а коэффициент усиления по току **больше** единицы. Таким образом, **эмиттерный повторитель**, являясь **усилителем мощности** информационного сигнала, обеспечивает **энергетическое согласование** источника сигнала с нагрузкой.

1.1.3 Транзисторный ключ

Транзисторный ключ – электронный коммутатор электрической цепи – обычно строится на биполярных (полевых) транзисторах по схемам с общим **эмиттером** (исток).

На рисунке 3 представлена электрическая схема ТК, реализованная на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером.

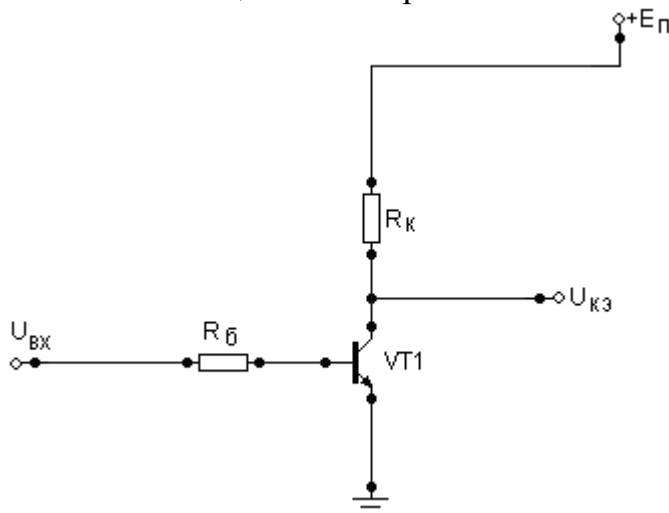


Рисунок 3 - Электрическая схема транзисторного ключа

При отсутствии входного сигнала управления ($U_{BX} = 0$) транзистор VT1 закрыт – **режим отсечки**: ток базы $I_Б = 0$, ток коллектора $I_К = \beta \cdot I_Б = 0$. В этом случае напряжение $U_{КЭ}$ между коллектором и эмиттером транзистора равно напряжению источника питания $E_П$: $U_{КЭ} = E_П - I_К \cdot R_К = E_П$. При наличии сигнала управления, уровень которого превышает **статический потенциал** ϕ_d открытого перехода эмиттер-база ($U_{BX} \gg \phi_d$), транзистор VT1 **насыщается**: коллекторный ток $I_{К.Н} = (E_П - U_{ост}) / R_К$, где $U_{ост}$ – напряжение между коллектором и эмиттером в режиме насыщения.

На рисунке 4 показана эквивалентная схема транзисторного ключа.

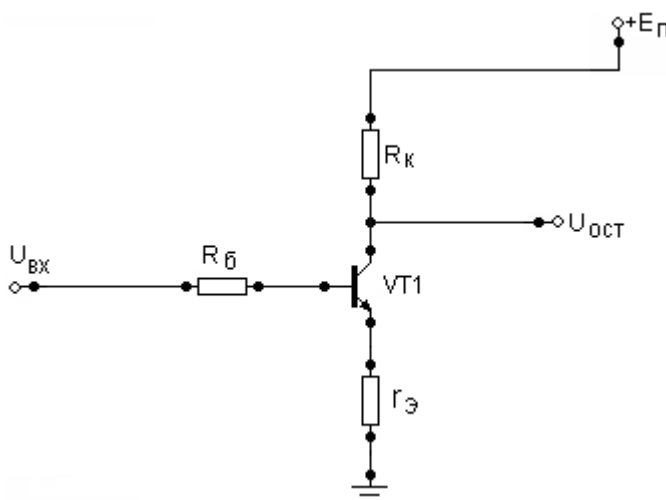


Рисунок 4 - Эквивалентная схема ТК

Резистор r_3 учитывает **сопротивление вывода эмиттера** транзистора VT1 постоянному току; резистор R_6 ограничивает ток базы I_6 и предотвращает пробой эмиттерного перехода транзистора VT1 входным сигналом $U_{вх}$.

Параметр r_3 зависит от **абсолютной температуры** T и эмиттерного тока I_3 :

$$r_3 = \psi_T / I_3,$$

где $\psi_T = (k \cdot T / e) = (RT / F)$ – температурный потенциал; $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23}$, (Дж/К) – постоянная Больцмана; $R = 8,314$, (Дж/моль · К) – универсальная газовая постоянная; $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$, (Кл) – заряд электрона; $F \approx 9,6484 \cdot 10^4$, (Кл/моль) – число Фарадея.

При фиксированных значениях параметров $U_{вх}$, I_6 резистор R_6 определяется из второго закона Кирхгофа

$$U_{вх} = (I_6 \cdot R_6) + \varphi_d + \psi_T;$$

$$R_6 = (U_{вх} - \varphi_d - \psi_T) / I_6.$$

Примечание. У биполярных транзисторов $U_{ост} = 0,1 \dots 1,0$ В; для германиевых транзисторов $\varphi_d = 0,3 \dots 0,4$ В; для кремниевых транзисторов $\varphi_d = 0,6 \dots 0,8$ В [9].

В среде «CIRCUITMAKER» используются модели **кремниевых транзисторов** (принимается $\varphi_d = 0,6 \dots 0,8$ В).

1.2 Интегральные операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ) – это электронный усилитель с **высоким** внутренним коэффициентом усиления K_0 значительно превышающим **единицу**. Развитие полупроводниковой **микросхемотехники** и **интегральной технологии** привело к созданию **интегральных ОУ**, обладающих широкими функциональными возможностями, низким потреблением энергии и высокой надежностью [2, 3, 7, 11].

На рисунке 5 показано графическое обозначение ОУ и схема его подключения к источнику питания.

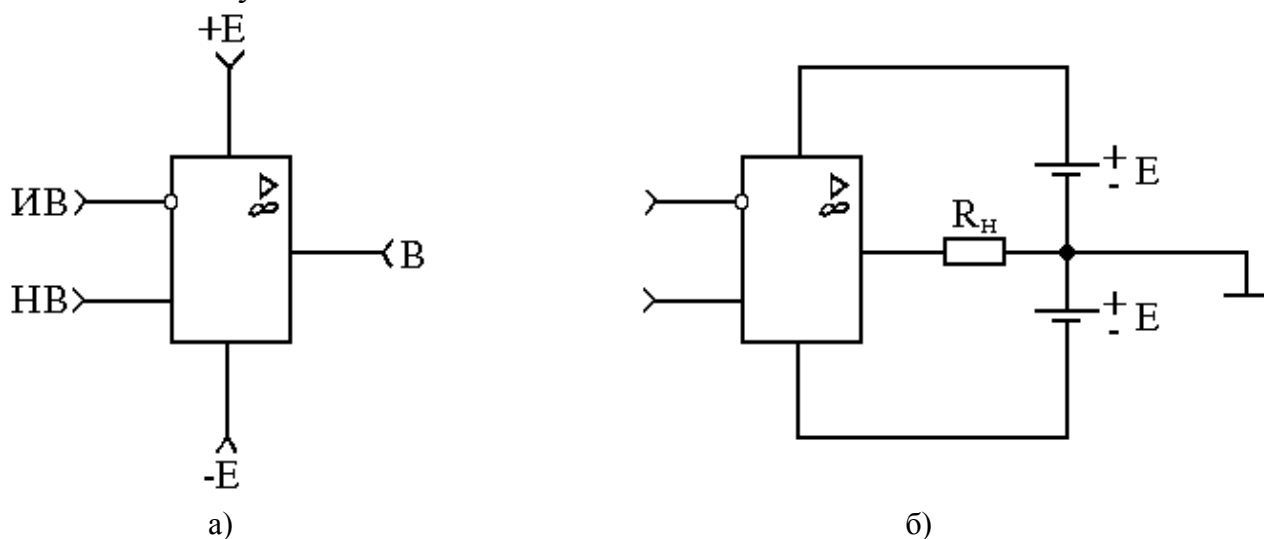


Рисунок 5 – Графическое обозначение ОУ на электрической схеме – а; схема подключения ОУ к источнику питания – б

Вершина треугольника в графическом обозначении ОУ указывает направление информационного сигнала с входа на выход. Знак « ∞ » отражает высокий коэффициент усиления ОУ, стремящийся к **бесконечности**. ОУ имеет 5 основных выводов: **инвертирующий** вход (ИВ), **неинвертирующий** вход (НВ), **выход** (В) и **выводы питания** ($\pm E$), к которым подключается биполярный источник питающего напряжения. ОУ усиливает разность потенциалов E_d между **дифференциальными** входами ИВ и НВ. Если потенциал на входе НВ **положительный** относительно потенциала на входе ИВ ($E_d > 0$), то напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ **положительно** относительно земли. При изменении полярности дифференциального напряжения ($E_d < 0$) напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ становится **отрицательным** по отношению к земле (Рисунок 6, 7).

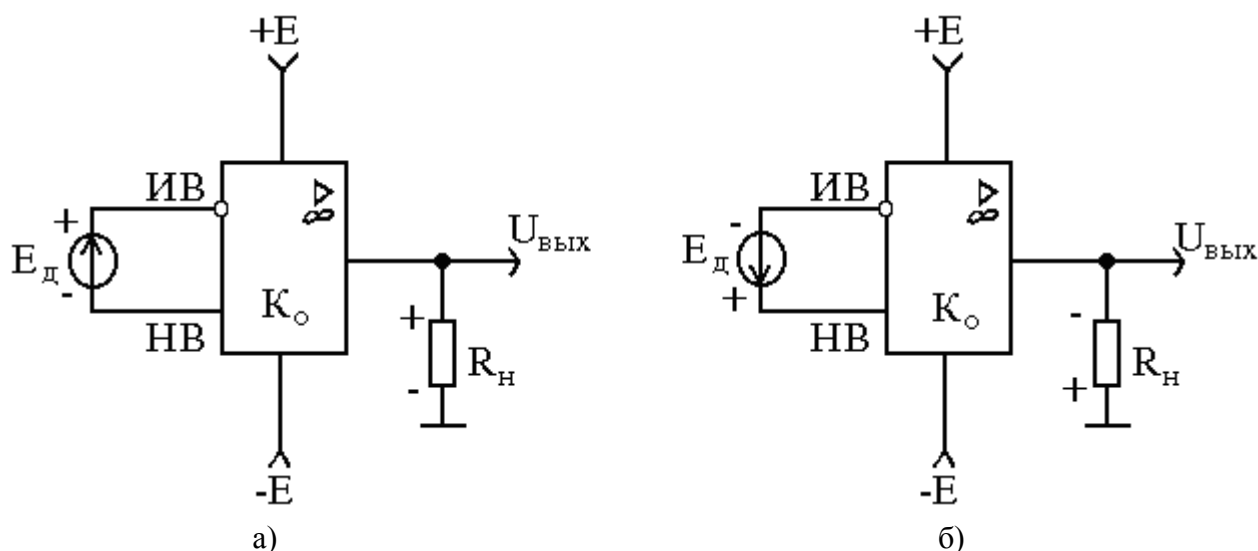


Рисунок 6 – Схемы подключения симметричного источника сигнала к дифференциальным входам ОУ

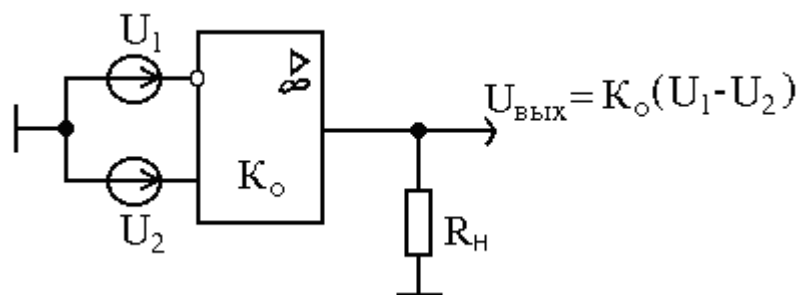


Рисунок 7 – Схема подключения несимметричных источников сигнала к дифференциальным входам ОУ

Выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}$ формируется на резисторе R_H (внешняя нагрузка ОУ) относительно **заземленной** средней точки источника питания

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_0 \cdot E_d = (U_2 - U_1) \cdot K_0 ;$$

$$E_d = (U_2 - U_1) = U_{\text{ВЫХ}} / K_0 \Big|_{K_0 \rightarrow \infty} \rightarrow 0 ;$$

$$(U_2 - U_1) \rightarrow 0; U_2 \rightarrow U_1 .$$

Таким образом, дифференциальные входы ОУ **эквипотенциальны** – свойство

операционного усилителя.

В зависимости от входа ОУ, используемого для подключения источника информационного сигнала относительно заземленного общего провода различают **три** схемы включения ОУ в линейном (усилительном) режиме: **инвертирующий ОУ**; **неинвертирующий ОУ**; **дифференциальный ОУ**.

Базовые схемы включения ОУ представлены на рисунке 8 [2, 3, 7, 11].

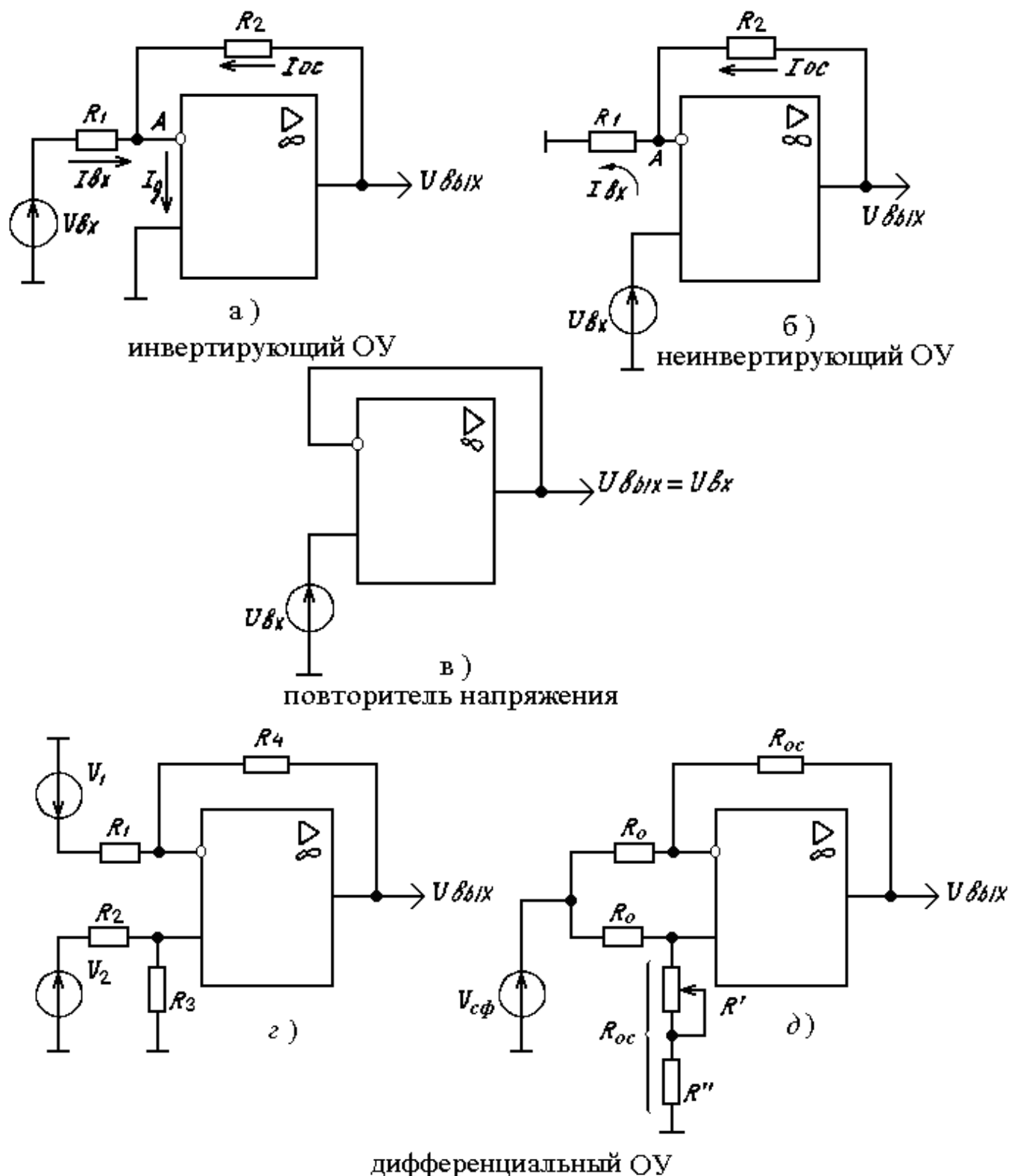


Рисунок 8 – Базовые схемы включения ОУ

1.2.1 Инвертирующий усилитель

В инвертирующем усилителе (Рисунок 8, а) входное напряжение $U_{\text{вх}}$, сформированное генератором, поступает на инвертирующий вход ОУ, а неинвертирующий вход имеет потенциал земли (в общем случае неинвертирующий вход подключается к земле через резистор). Отрицательная обратная связь по напряжению формируется резистором R_2 . Статический коэффициент усиления инвертирующего усилителя $K_{\text{иу}} = (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) = -(R_2/R_1)$, где знак минус указывает, что напряжения $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$ сдвинуты по фазе на угол π (противоположны по знаку). Резистор R_1 определяет входное сопротивление инвертирующего ОУ.

1.2.2 Неинвертирующий усилитель

В неинвертирующем усилителе (Рисунок 8, б) входной сигнал $U_{\text{вх}}$ поступает на неинвертирующий вход ОУ, а его инвертирующий вход соединяется с землей через резистор R_1 . Статический коэффициент усиления неинвертирующего усилителя $K_{\text{иу}} = (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) = 1 + (R_2/R_1)$. Частным случаем неинвертирующего ОУ является повторитель напряжения (ПН) – неинвертирующий усилитель с единичным коэффициентом усиления. При выполнении условий $R_2 = 0, R_1 \rightarrow \infty$ отношение $(R_2/R_1) = 0$, а коэффициентом усиления $K_{\text{иу}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow 1$ (Рисунок 8, в). Входное сопротивление ПН определяется входным сопротивлением микросхемы ОУ по неинвертирующему входу $R_{\text{вх}}^+$ ($R_{\text{вх}}^+ = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом}$); выходное сопротивление ПН $r_{\text{вых}}^{\text{ПН}}$ зависит от нагрузочной способности выходного каскада ОУ ($r_{\text{вых}}^{\text{ПН}} = 0,5 \dots 1 \text{ кОм}$).

1.2.3 Дифференциальный усилитель

Схема дифференциального усилителя (ДУ) объединяет в себе свойства рассмотренных выше схем (Рисунок 8, г, д). На дифференциальные входы ОУ через ограничивающие резисторы R_1, R_2 поступают напряжения U_1 и U_2 . Выходное напряжение ДУ $U_{\text{вых.д}}$ состоит из двух составляющих: $U_{\text{вых.д}} = K_{\text{д}} \cdot (U_2 - U_1) + U_{\text{см}}$, где $K_{\text{д}}$ – дифференциальный коэффициент усиления; $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения на выходе ДУ при отсутствии входного сигнала ($E_{\text{д}} = U_2 - U_1 = 0$). Для компенсации напряжения смещения в схеме ДУ (Рисунок 8, г, д) необходимо обеспечить следующие соотношения элементов: $R_1 = R_2 = R_0$; $R_3 = R_4 = R_{\text{ос}}$ $K_{\text{д}} = R_{\text{ос}}/R_0$. При отсутствии напряжения смещения ($U_{\text{см}} = 0$) и противофазных сигналах на входе ДУ ($U_2 = -U_1$) коэффициент $K_{\text{д}}$ увеличивается в два раза: $U_{\text{вых.д}} = 2K_{\text{д}} \cdot U_2 = 2K_{\text{д}} \cdot U_1$. При синфазных сигналах ($|U_2| = |U_1| = U_{\text{сф}}$) напряжение $U_{\text{вых.д}} = K_{\text{д}} \cdot (U_2 - U_1) = 0$.

Таким образом, дифференциальный усилитель усиливает противофазные сигналы и подавляет синфазные сигналы.

1.2.4 Мощные операционные усилители

Интегральные ОУ имеют ограниченную нагрузочную способность: макси-

мальный выходной ток $I_{\text{ВЫХ}}^{\text{ou}} = (3...5) \text{ мА}$. Для увеличения нагрузочной способности ОУ применяют внешние усилители мощности, построенные на **комплементарных парах биполярных и полевых** транзисторов. Эмиттерный повторитель на биполярных транзисторах VT1, VT2 разной проводимости (**комплементарная пара**) усиливает выходной ток $I_{\text{ВЫХ}}^{\text{ou}}$ операционного усилителя DA1 (Рисунок 9, а). Для получения больших токов нагрузки ($I_{\text{H}} \geq 1...10 \text{ А}$) на выходе ОУ используют эмиттерные повторители по **схеме Дарлингтона** (Рисунок 9, б) [1, 5, 6].

При идентичных параметрах выходных транзисторов ток нагрузки усилителя мощности $I_{\text{H}} \approx \beta_0 \cdot I_{\text{ВЫХ}}^{\text{ou}}$; в схеме Дарлингтона ток $I_{\text{H}} \approx \beta_0^2 \cdot I_{\text{ВЫХ}}^{\text{ou}}$, где $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$ – коэффициенты передачи тока базы транзисторов VT1, VT2, VT3, VT4 соответственно.

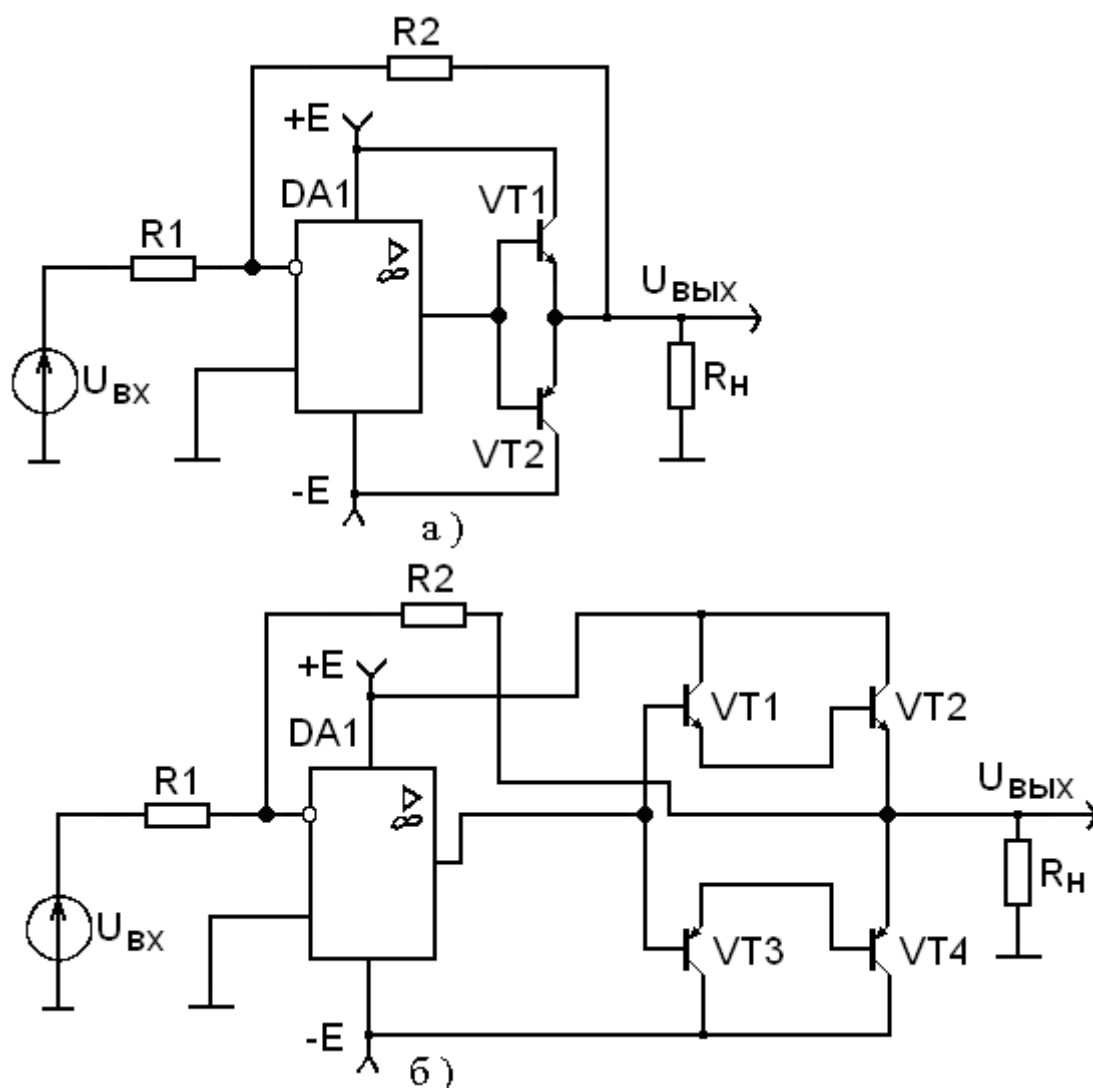


Рисунок 9 – Мощные операционные усилители:

- а) – ОУ с комплементарным эмиттерным повторителем;
- б) – ОУ с эмиттерным повторителем Дарлингтона.

Аналогичным образом увеличивается нагрузочная способность неинвертирующего и дифференциального усилителей.

2. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Для расчета транзисторных усилителей обычно используется графоаналитический метод. Ниже рассматривается аналитический приближенный метод расчета УИС, который дает удовлетворительные для практики результаты на частотах информационного сигнала до **100 кГц**. [11]. Расчет УИС на базе ОУ сводится к определению внешних элементов микросхемы, обеспечивающих заданные технические характеристики. В процессе расчета и моделирования УИС значения пассивных элементов принципиальной электрической схемы (резисторов, конденсаторов) округляются в соответствии с ГОСТ [8,10]

Расчет УИС проводится в направлении от **нагрузки к источнику** входного сигнала [2, 9, 11].

2.1 РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Исходными данными для расчета усилителя с общим эмиттером (Рисунок 1) являются следующие параметры:

- активное сопротивление нагрузки R_n ;
- активная мощность нагрузки P_n ;
- напряжение питания E_n ;
- ток эмиттера транзистора в статическом режиме $I_э$;
- коэффициент передачи тока базы β транзистора;
- Коэффициент усиления по напряжению K_u ;
- рабочая частота (частотный диапазон) информационного сигнала f_c

Методика расчета

1. Расчет амплитуды выходного напряжения и тока нагрузки

Амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{m.n.}$ определяется по величине параметров P_n и R_n : $U_{m.n.} = \sqrt{2P_n \cdot R_n}$.

Амплитуда тока нагрузки $I_{m.n.} = U_{m.n.}/R_n$.

2. Выбор транзисторов

Выбор транзисторов осуществляется в соответствии с **индивидуальным заданием** по следующим параметрам: **тип проводимости** (npn; pnp); **статический коэффициент передачи тока базы β** ; **предельное значение тока коллектора $I_{k.max}$** ; **предельное значение напряжения коллектор-эмиттер $U_{к.э.max}$** .

На **низких** частотах параметр β для схемы с общим эмиттером в справочной литературе обычно обозначается $h_{21э}$. У **дискретных** транзисторов коэффициент β имеет следующие значения: мощные транзисторы (максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторе $P_{k.max} \geq 1$ Вт) – $h_{21э.min} \equiv \beta_{min} = 10$; транзисторы малой и средней мощности ($P_{k.max} < 1$ Вт) – $h_{21э} \equiv \beta = 20...300$. У **составных** транзисторов Дарлингтона $\beta = 300...3000$.

3. Расчет емкости разделительного конденсатора на выходе усилителя

Совместно с сопротивлением нагрузки $R_H = R5$ разделительный конденсатор $C3$ образует RC-цепь, которая не пропускает в нагрузку **постоянный** потенциал коллектора, подавляет **низкие** частоты и пропускает **высокие** частоты. Величина разделительного конденсатора $C3$ рассчитывается на **нижней** частоте информационного сигнала $f_{н.с}$: $C_{3рссч} \geq (2\pi f_{н.с} \cdot R_H)^{-1}$.

Для уменьшения ослабления уровня входного сигнала расчетное значение емкости $C_{3рссч}$ увеличиваются в 10-100 раз.

4. Расчет тока коллектора

При заданном значении тока эмиттера $I_э$ ток коллектора I_k определяется по формуле: $I_k = \alpha \cdot I_э$.

5. Расчет сопротивления в коллекторной цепи и его мощности

Для уменьшения искажений усиливаемого сигнала потенциал коллектора транзистора относительно земли в статическом режиме U_{k0} (при отсутствии входного сигнала), выбирается из условия: $U_{k0} \approx 0,5 \cdot E_{п}$, где $E_{п}$ – напряжение питания схемы.

Определяется сопротивление $R_k = R3$ в цепи коллектора:

$$R3 = U_{k0} / I_k = 0,5 E_{п} / I_k.$$

Определяется мощность P_3 , рассеиваемая на сопротивлении $R3$: $P_3 = R3 \cdot I_k^2$.

6. Расчет эквивалентного сопротивления нагрузки на переменном токе

При достаточно **большой** емкости разделительного конденсатора $C3$ эквивалентное сопротивление нагрузки на переменном токе $R_{н.экв.0э}$ соответствует **параллельному** соединению сопротивления нагрузки $R_H = R5$ и сопротивления $R_k = R3$:

$$R_{н.экв.0э} = [(R_k \cdot R_H) / (R_k + R_H)].$$

7. Расчет сопротивления в эмиттерной цепи и его мощности

Сопротивление в цепи эмиттера $R_э = R4$ обеспечивает температурную стабилизацию режима транзистора **по постоянному току**. При фиксированном токе эмиттера $I_э$ сопротивление $R_э$ определяется по закону Ома:

$$R_э = R4 = U_э / I_э,$$

где $U_э$ – падение напряжения на сопротивлении $R_э$, созданное током $I_э$ в статическом режиме. Для уменьшения влияния температуры на параметры усилителя потенциал $U_э$ относительно земли задается в диапазоне: $U_э = (1...2)$ В.

Определяется мощность P_4 , рассеиваемая на сопротивлении $R4$: $P_4 = R4 \cdot I_э^2$.

Примечание. Если величина тока эмиттера **не задана**, то параметр $I_э$ **выбирается** в диапазоне: $I_э = (0,5...1,0)$ мА.

8. Расчет входного сопротивления транзистора со стороны базы

Входное сопротивление со стороны базы h_{11} соответствует входному сопротивлению транзистора **без учета шунтирующего действия** резистивного делителя $R1, R2$ в цепи базы: $h_{11} = (\beta + 1) \cdot R_э$.

9. Расчет резистивного делителя в цепи базы транзистора

Резистивный делитель $R1, R2$, формирует потенциал базы $U_б$ относительно земли. Уровень данного потенциала не должен зависеть от тока эмиттера $I_э$, протекающего по резистору $R_э$. Последний является **датчиком температуры**. Если **ток делителя** $I_д$ значительно **превышает** ток базы $I_б$, то потенциал $U_б$ определяется напряжением питания $E_п$ и соотношением резисторов $R1, R2$. Поскольку коэффициент $\beta \gg 1$, а ток $I_э = (\beta + 1) \cdot I_б$, то потенциал $U_б$ базы не зависит от тока $I_б$ при условии:

$$I_д = I_э = E_п / (R1 + R2).$$

Потенциал базы $U_б$ определяется по второму закону Кирхгофа:

$$U_б = U_э + \varphi_d,$$

где φ_d – **статический потенциал** эмиттерного рп - перехода.

Резисторы $R1, R2$ рассчитываются по закону Ома:

$$R2 = (U_э + \varphi_d) / I_э; R1 = (E_п - U_б) / I_э.$$

Определяются мощности P_1, P_2 , рассеиваемые на сопротивлениях $R1, R2$:

$$P_1 = R1 \cdot I_д^2; P_2 = R2 \cdot I_д^2.$$

Примечание. Для германиевых транзисторов $\varphi_d = (0,3...0,4)$ В; для кремневых транзисторов $\varphi_d = (0,6...0,8)$ В [9].

В среде «CIRCUITMAKER» принимается $\varphi_d = 0.6...0.8$ В.

10. Расчет эквивалентного сопротивления базового делителя

При усилении сигналов переменного тока с частотой ω_c шина источника питания $E_п$ **заземлена** через внутренний конденсатор фильтра $C_ф$ (на рисунке 1 не показан), т.к. емкостное сопротивление $X_{C_ф} = (2\pi f_c C_ф)^{-1} \rightarrow 0$. Следовательно, **по переменному току** резисторы $R1, R2$ соединены **параллельно**. Эквивалентное сопротивление делителя $R_{д.экв.} = R1 \cdot R2 / (R1 + R2)$.

11. Расчет активного входного сопротивления усилителя

На **низких частотах**, несоизмеримых с быстродействием выбранного транзистора, входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{0э}$ является чисто **активным** и соответствует **параллельному** соединению сопротивлений h_{11} и $R_{д.экв.}$:

$$R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}} = h_{11} \cdot R_{\text{Д.ЭКВ.}} / (h_{11} + R_{\text{Д.ЭКВ.}}).$$

Примечание. В области высоких частот, соизмеримых с быстродействием выбранного транзистора, начинают влиять **межэлектродные емкости**: входное сопротивление (импеданс) транзистора является **комплексной величиной**

12. Расчет емкости разделительного конденсатора на входе усилителя

Разделительный конденсатор C_1 отделяет постоянный потенциал базы U_6 от источника информационного сигнала, подавляет **низкие** частоты и пропускает **высокие** частоты. Величина емкости C_1 рассчитывается на нижней частоте $f_{\text{н.с}}$ информационного сигнала по формуле:

$$C_{1\text{рссч}} \geq (2\pi f_{\text{н.с.}} \cdot R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}})^{-1}.$$

Для уменьшения ослабления входного сигнала на **низких** частотах расчетное значение емкости $C_{1\text{рссч}}$ увеличивается в 10-100 раз.

13. Расчет коэффициента усиления

Определяется емкость шунтирующего конденсатора C_3 в цепи эмиттера для заданного значения модуля коэффициента усиления $|K_u|_{\text{ОЭ}}$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_c R_3} \sqrt{\left(\frac{R_3 \cdot |K_u|_{\text{ОЭ}}}{\alpha \cdot R_{\text{Н.ЭКВ.ОЭ}}} \right)^2 - 1} \approx (|K_u|_{\text{ОЭ}} / 2\pi f_c \alpha R_{\text{Н.ЭКВ.ОЭ}}).$$

Определяется модуль коэффициента усиления $|K_u|_{\text{ОЭ}}$ для расчетного значения емкости C_3

$$|K_u|_{\text{ОЭ}} = \alpha \cdot (R_{\text{Н.ЭКВ.ОЭ}} / R_3) \cdot \sqrt{1 + (2\pi f_c R_3 C_3)^2}.$$

14. Расчет амплитуды входного напряжения и тока

Номинальная амплитуда входного напряжения $U_{\text{м.ВХ.НОМ.}} = U_{\text{мн.}} / |K_u|_{\text{ОЭ}}$

Амплитуда входного тока $I_{\text{м.ВХ.}} = U_{\text{м.ВХ.НОМ.}} / R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}}.$

15. Расчет коэффициента усиления по току и по мощности

Коэффициент усиления по току $K_i^{\text{ОЭ}} = I_{\text{м.н.}} / I_{\text{м.ВХ.}}$

Коэффициент усиления по мощности $K_p^{\text{ОЭ}} = K_i^{\text{ОЭ}} \cdot |K_u|_{\text{ОЭ}}.$

16. Расчет номинальной мощности входного сигнала

Номинальная входная мощность $P_{\text{ВХ.НОМ.}}$ определяется из тождества:

$$P_{\text{ВХ.НОМ.}} = P_{\text{н}} / K_p^{\text{ОЭ}} = (U_{\text{м.ВХ.НОМ.}})^2 / 2R_{\text{ВХ}}^{\text{ОЭ}}.$$

2.2 РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ С ОБЩИМ КОЛЛЕКТОРОМ

Исходными данными для расчета усилителя с общим коллектором (Рисунок 2) являются следующие параметры:

- активное сопротивление нагрузки R_H ;
- активная мощность нагрузки P_H ;
- напряжение питания E_P ;
- коэффициент передачи тока базы β транзистора;
- рабочая частота (частотный диапазон) информационного сигнала f_c .

Методика расчета

1. Расчет амплитуды выходного напряжения и тока нагрузки

Амплитуда выходного напряжения $U_{м.н.}$ и ток нагрузки усилителя $I_{м.н.}$ определяется в соответствии с разделом 2.1, п.1.

2. Выбор транзисторов

Выбор транзисторов осуществляется в соответствии с разделом 2.1, п.2.

3. Расчет емкости разделительного конденсатора на выходе усилителя

Расчет емкости разделительного конденсатора на выходе осуществляется в соответствии с разделом 2.1, п.3: $C_{зрссч} \geq (2\pi f_{н.с.} \cdot R_H)^{-1}$.

4. Расчет резистора в цепи эмиттера и его мощности

Для исключения искажений информационного сигнала потенциал эмиттера $U_{э.0}$ и ток эмиттера $I_{э.0}$ в статическом режиме (при отсутствии входного сигнала) выбираются из условия: $U_{э.0} = 0,5E_P$, $I_{э.0} = (2,5...3,0) \cdot I_{м.н.}$.

Резистор в цепи эмиттера $R_э = R_3 = U_{э.0}/I_{э.0} = 0,5E_P/I_{э.0}$. Мощность P_3 , рассеиваемая на сопротивлении R_3 : $P_3 = R_3 \cdot I_{э.0}^2$.

5. Расчет эквивалентного сопротивления эмиттерной цепи

При достаточно **большой** емкости разделительного конденсатора C_3 эквивалентное сопротивление эмиттерной цепи $R_{э.э.кв.}^{ок}$ соответствует **параллельному** соединению сопротивлений $R_э = R_3$ и $R_H = R_4$: $R_{э.э.кв.}^{ок} = [(R_э \cdot R_H)/(R_э + R_H)]$.

6. Расчет входного сопротивления транзистора

Для схемы с общим коллектором входное сопротивление транзистора $h_{11}^{ок}$ определяется **без учета шунтирующего действия** резистивного делителя R_1, R_2 со стороны базы: $h_{11}^{ок} = (\beta + 1) \cdot R_{э.э.кв.}^{ок}$.

7. Расчет тока базы в статическом режиме

При известном значении параметров $I_{э.0}$ и β транзистора статический ток базы $I_{б.0} = I_{э.0}/(\beta + 1)$.

8. Расчет резистивного делителя в цепи базы транзистора

Резистивный делитель R1, R2, формирует потенциал базы $U_{\text{б}}$ относительно земли. Элементы делителя выбираются таким образом, чтобы минимизировать **шунтирование** входного сопротивления $h_{11}^{\text{ок}}$. По первому закону Кирхгофа в **базовом узле** ток $I_{\text{д}}$ растекается: по резистору R2 течет ток $I_{2.0}$, а по резистору R1 – ток $I_{1.0} = I_{2.0} + I_{\text{б.0}}$. Для уменьшения шунтирующего действия делителя R1, R2 величина тока $I_{2.0}$ выбирается из условия: $I_{2.0} \geq (10...20) \cdot I_{\text{б.0}}$.

Расчет сопротивлений делителя R1, R2:

- расчет потенциала базы в статическом режиме: $U_{\text{б.0}} = U_{\text{э.0}} + \varphi_{\text{д}} = I_{2.0} \cdot R2$.
- расчет сопротивления R2 делителя: $U_{\text{б.0}}/I_{2.0}$.
- расчет сопротивления R1 делителя: $R1 = (E_{\text{п}} - U_{\text{б.0}})/(I_{\text{б.0}} + I_{2.0})$.
- расчет мощностей P_1, P_2 резисторов делителя: $P_1 = R1 \cdot I_{1.0}^2$, $P_2 = R2 \cdot I_{2.0}^2$.

Примечание. Для германиевых транзисторов $\varphi_{\text{д}} = (0,3...0,4)$ В; для кремневых транзисторов $\varphi_{\text{д}} = (0,6...0,8)$ В. В среде «CIRCUITMAKER» принимается $\varphi_{\text{д}} = 0.6...0.8$ В.

9. Расчет эквивалентного сопротивления делителя в цепи базы

При достаточно большой емкости фильтра C2 эквивалентное сопротивление $R_{12.\text{экв.}}$ базового делителя **на переменном токе** соответствует параллельному соединению его элементов: $R_{12.\text{экв.}} = R1 \cdot R2 / (R1 + R2)$.

10. Расчет активного входного сопротивления усилителя

На **низких частотах**, несоизмеримых с быстродействием выбранного транзистора, входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}}^{\text{ок}}$ является чисто **активным** и соответствует **параллельному** соединению сопротивлений $h_{11}^{\text{ок}}$ и $R_{12.\text{экв.}}$:

$$R_{\text{вх}}^{\text{ок}} = R_{12.\text{экв.}} \cdot h_{11}^{\text{ок}} / (R_{12.\text{экв.}} + h_{11}^{\text{ок}}).$$

11. Расчет емкости разделительного конденсатора на входе усилителя

Расчет емкости разделительного конденсатора на входе осуществляется в соответствии с разделом 2.1, п.12: $C_{1\text{рссч}} \geq (2\pi f_{\text{н.с.}} \cdot R_{\text{вх}}^{\text{ок}})^{-1}$.

12. Расчет коэффициента усиления по напряжению

Модуль коэффициента усиления по напряжению $|K_{\text{у}}^{\text{ок}}|$ зависит от коэффициента α транзистора, а также от соотношения эквивалентных сопротивлений участка коллектор-эмиттер $R_{\text{к.экв.}}^{\text{ок}}$ и цепи эмиттера $R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}}$: $|K_{\text{у}}^{\text{ок}}| = \alpha \cdot R_{\text{к.экв.}}^{\text{ок}} / R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}}$.

Входной и выходной сигналы ЭП формируются относительно **коллектора**, имеющего на **переменном токе нулевой** потенциал. Следовательно, эквивалентное

сопротивление эмиттерной цепи $R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}}$ подключено параллельно динамическому сопротивлению участка коллектор – эмиттер транзистора $r_{\text{к.э}}$:

$$R_{\text{к.э.кв.}}^{\text{ок}} = r_{\text{к.э}} \cdot R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}} / (r_{\text{к.э}} + R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}});$$

$$r_{\text{к.э}} = [(1 - \alpha) \cdot (1 + \beta) \cdot (E_{\text{п}} / \phi_{\text{д}}) - 1] \cdot (R_{\text{э.экв.}}^{\text{ок}} / \alpha).$$

13. Расчет амплитуды входного напряжения и тока

Номинальная амплитуда входного напряжения $U_{\text{м.вх.ном.}} = U_{\text{м.н.}} / |K_{\text{u}}^{\text{ок}}|$

Амплитуда входного тока $I_{\text{м.вх.}} = U_{\text{м.вх.ном.}} / R_{\text{вх}}^{\text{ок}}$.

14. Расчет коэффициента усиления по току и по мощности

Коэффициент усиления по току $K_{\text{i}}^{\text{ок}} = I_{\text{м.н.}} / I_{\text{м.вх.}}$.

Коэффициент усиления по мощности $K_{\text{p}}^{\text{ок}} = K_{\text{i}}^{\text{ок}} \cdot K_{\text{u}}^{\text{ок}}$.

15. Расчет номинальной мощности входного сигнала

Номинальная мощность информационного сигнала на входе усилителя $P_{\text{вх.ном.}}$ определяется из тождества: $P_{\text{вх.ном.}} = P_{\text{н}} / K_{\text{p}}^{\text{ок}} = (U_{\text{м.вх.ном.}})^2 / 2R_{\text{вх}}^{\text{ок}}$.

РАСЧЕТ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

Исходными данными для расчета транзисторного ключа (Рисунок 3, 4) являются следующие параметры:

- напряжение питания E_{π} ;
- абсолютная температура окружающей среды T ;
- коэффициент передачи тока базы транзистора β ;
- ток эмиттера транзистора I_{ε} ;
- активное сопротивление коллекторной нагрузки R_k ;
- остаточное напряжение на коллекторе транзистора $U_{\text{ост}}$.

Методика расчета

1. Выбор транзистора: (см. раздел 2.1, п. 2) .
2. Расчет тока коллектора (тока нагрузки): $I_{\pi} = I_k = (E_{\pi} - U_{\text{ост}})/R_k$.
3. Расчет тока эмиттера: $I_{\varepsilon} = I_k/\alpha = I_k \cdot (1 + \beta)/\beta$.
4. Расчет тока базы (тока управления): $I_{\delta} = I_k/\beta$.
5. Расчет температурного потенциала: $\psi_T = (k \cdot T/e) = (RT/F)$.
6. Расчет активного сопротивления эмиттерного вывода: $r_{\varepsilon} = \psi_T/I_{\varepsilon}$.
7. Расчет ограничивающего резистора в цепи базы: $R_{\delta} = (U_{\text{вх}} - \varphi_d - \psi_T)/I_{\delta}$.
8. Расчет мощности ограничивающего резистора в цепи базы: $P_{R_{\delta}} = I_{\delta}^2 \cdot R_{\delta}$.
9. Расчет входного сопротивления транзисторного ключа: $R_{\text{вх}}^{\text{ТК}} = R_{\delta} + (\beta + 1) \cdot r_{\varepsilon}$.

Примечание. Уровень входного напряжения $U_{\text{вх}}$ должен обеспечить насыщение транзистора: $U_{\text{мах.б.э.}} > U_{\text{вх}} > \varphi_d$, где $U_{\text{мах.б.э.}}$ – максимальное напряжение между базой и эмиттером транзистора. У биполярных транзисторов: $\varphi_d = (0,3...0,4)\text{В}$ – германий, $\varphi_d = (0,6...0,8)\text{В}$ – кремний, $U_{\text{мах.б.э.}} \approx 5\text{В}$ [9, 11].

В среде «CIRCUITMAKER» принимается $\varphi_d = 0.6...0.8\text{В}$. При расчете ТК обычно выбирают напряжение $U_{\text{вх}} = (1...3)\text{В}$.

2.4 РАСЧЕТ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

Исходными данными для расчета инвертирующего операционного усилителя (Рисунок 8, а) являются следующие параметры:

- активное сопротивление нагрузки усилителя R_n ;
- амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{m.n.}$
- активное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{иу}$;
- коэффициент усиления по напряжению $K_u^{иу}$.

Методика расчета

1. Расчет амплитуды тока нагрузки

Амплитуда тока нагрузки $I_{m.n.} = U_{m.n.} / R_n$.

2. Расчет сопротивления отрицательной обратной связи

Входное сопротивление инвертирующего усилителя $R_{вх}^{иу} = R_1$. При заданных значениях параметров $K_u^{иу}$ и R_1 сопротивление отрицательной обратной связи $R_{ос} = R_2$ определяется из выражения для модуля коэффициента усиления по напряжению $|K_u^{иу}| = |(U_{вых} / U_{вх})| = (R_2 / R_1)$, $R_2 = |K_u^{иу}| \cdot R_1$.

3. Расчет амплитуды входного напряжения

Амплитуда входного сигнала $U_{m.вх.} = U_{m.n.} / |K_u^{иу}|$.

4. Расчет амплитуды входного тока

Амплитуда входного тока $I_{m.вх.} = U_{m.вх.} / R_1$.

5. Расчет коэффициента усиления по току

Модуль коэффициента усиления по току $|K_i^{иу}| = I_{m.n.} / I_{m.вх.}$.

6. Расчет коэффициента усиления по мощности

Модуль коэффициента усиления по мощности $K_p = |K_u^{иу}| \cdot |K_i^{иу}|$.

2.5 РАСЧЕТ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ

Исходными данными для расчета неинвертирующего операционного усилителя (Рисунок 8, б) являются следующие параметры:

- активное сопротивление нагрузки усилителя R_H ;
- амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$
- активное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{ну}$;
- коэффициент усиления по напряжению $K_u^{ну}$.

Методика расчета

Если заданный коэффициент усиления по напряжению $|K_u^{ну}| > 1$, то при фиксированном значении параметра $R_{вх}^{ну} = R1$ сопротивление обратной связи $R_{ос} = R2$ определяется из выражений: $|K_u^{ну}| = (U_{вых}/U_{вх}) = 1 + (R2/R1)$, $R2 = (|K_u^{ну}| - 1) \cdot R1$.

Если параметр $|K_u^{ну}| = 1$, то неинвертирующий ОУ вырождается в **повторитель напряжения** (ПН): сопротивление $R1$ в схеме отсутствует ($R1 \rightarrow \infty$), сопротивление $R2 = 0$ – короткое замыкание между выходом ОУ и его инвертирующим входом (Рисунок 8, в).

Входное сопротивление ПН соответствует сопротивлению утечки интегральной микросхемы ОУ по неинвертирующему входу $R_{вх}^{пн} = R_{вх}^+ = (10^9 \dots 10^{12}) \text{ Ом}$ [1, 4, 6, 11].

Примечание. Для **компенсации напряжения смещения** на выходе ПН при отсутствии входного сигнала между выходом и инвертирующим входом ОУ включают **резистор обратной связи** $R_{ос} = R2 = r_{i.c}$, где $r_{i.c}$ – внутреннее сопротивление источника информационного сигнала.

Дальнейший расчет неинвертирующего ОУ осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.4, п.п. 1, 3...6.

2.6 РАСЧЕТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Исходные данные для расчета дифференциального усилителя (Рисунок 8, г, д):

- активное сопротивление нагрузки усилителя R_H ;
- амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$
- дифференциальное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{д\gamma}$;
- коэффициент усиления по напряжению $K_u^{д\gamma}$.

Методика расчета

1. Расчет сопротивления отрицательной обратной связи

Для фиксированного значения коэффициента усиления $K_u^{д\gamma}$ в дифференциальном усилителе необходимо скомпенсировать напряжение смещения $U_{см}$. Условие $U_{см} = 0$ обеспечивается при определенных соотношениях элементов схемы (Рисунок 8, г):

$$R_1 = R_2 = R_0; \quad R_3 = R_4 = R_{oc} \quad K_u^{д\gamma} = R_{oc} / R_0.$$

Поскольку дифференциальные входы ОУ эквипотенциальны, сопротивления R_1, R_2 соединены **параллельно**. При условии $R_1 = R_2$ дифференциальное входное сопротивление $R_{вх}^{д\gamma} = R_0 = 0,5R_1 = 0,5R_2$. Следовательно, $R_1 = R_2 = 2R_{вх}^{д\gamma}$.

Сопротивление обратной связи $R_{oc} = R_4$ определяет модуль коэффициента усиления $|K_u^{д\gamma}| = R_4 / 2R_{вх}^{д\gamma}$, $R_4 = 2R_{вх}^{д\gamma} \cdot |K_u^{д\gamma}|$.

2. Расчет сопротивления, балансирующего напряжение смещения

Для заданного значения коэффициента усиления $K_u^{д\gamma}$ баланс напряжения смещения ($U_{см} = 0$) обеспечивается при условии: $R_3 = R_4 = 2R_{вх}^{д\gamma} \cdot |K_u^{д\gamma}|$. Точный баланс напряжения $U_{см}$ осуществляется путем замены резистора R_3 резистивным делителем R', R'' , содержащим переменный резистор R' (Рисунок 8, д).

Значения резисторов R', R'' выбираются таким образом, чтобы в **среднем** положении движка **переменного** резистора R' выполнялось условие баланса:

$$(R'' + 0,5 \cdot R') = 2R_{вх}^{д\gamma} \cdot |K_u^{д\gamma}| = R_{oc}.$$

Дальнейший расчет дифференциального усилителя

осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.4, п.п. 1, 3...6.

2.7 РАСЧЕТ МОЩНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Исходные данные для расчета (Рисунок 9 а, б):

- активное сопротивление нагрузки усилителя R_H ;
- амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$.
- активное входное сопротивление усилителя $R_{вх}$;
- коэффициент усиления по напряжению K_u .

Методика расчета

1. Расчет амплитуды тока нагрузки

Амплитуда тока нагрузки $I_{м.н.} = U_{м.н.} / R_H$.

2. Расчет коэффициента усиления тока эмиттерного повторителя

Коэффициент усиления тока β_0 определяется по заданной величине тока нагрузки: $\beta_0 \approx I_{м.н.} / I_{вых}^{ou}$, где $I_{вых}^{ou} = 3...5 \text{ мА}$.

3. Выбор транзисторов эмиттерного повторителя

Выбор транзисторов внешнего эмиттерного повторителя осуществляется в соответствии с разделом 2.1, п. 2.

4. Расчет сопротивления отрицательной обратной связи

В зависимости от используемой схемы включения ОУ при известном входном сопротивлении $R_{вх}$ сопротивление отрицательной обратной связи R_{oc} определяется в соответствии с методиками, изложенными в разделах 2.4...2.6:

$$\text{инвертирующий ОУ } R_{oc} = |K_u^{ny}| \cdot R_{вх};$$

$$\text{неинвертирующий ОУ } R_{oc} = (|K_u^{ny}| - 1) \cdot R_{вх};$$

$$\text{дифференциальный ОУ } R_{oc} = 2R_{вх}^{du} \cdot |K_u^{du}|.$$

5. Расчет амплитуды входного напряжения

Для различных схем включения ОУ амплитуда входного сигнала $U_{м.вх.}$ определяется из соотношений:

$$U_{м.вх.} = U_{м.н.} / |K_u^{ny}| - \text{инвертирующий ОУ};$$

$$U_{м.вх.} = U_{м.н.} / |K_u^{ny}| - \text{неинвертирующий ОУ};$$

$$U_{м.вх.} = U_{м.н.} / |K_u^{du}| - \text{дифференциальный ОУ}.$$

6. Расчет амплитуды входного тока

Амплитуда входного тока $I_{м.вх.} = U_{м.вх.} / R_{вх}$.

7. Расчет коэффициента усиления по току

Модуль коэффициента усиления по току $|K_i^{ny}| = I_{м.н.} / I_{м.вх.}$.

8. Расчет коэффициента усиления по мощности

Модуль коэффициента усиления по мощности $K_p = |K_u^{ny}| \cdot |K_i^{ny}|$.

СОДЕРЖАНИЕ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

1. Рассчитать схемы транзисторных усилителей мощности в соответствии с индивидуальным заданием (Таблица 1-3)

1.1 Схема с общим эмиттером (Рисунок 1).

1.2 Схема с общим коллектором (Рисунок 2).

1.3 Транзисторный ключ – схема с общим эмиттером (Рисунок 3).

2. Рассчитать базовые схемы включения операционных усилителей в соответствии с индивидуальным заданием (Таблица 4-7)

2.1 Инвертирующий ОУ (Рисунок 8, а).

2.2 Неинвертирующий ОУ (Рисунок 8, б).

2.3 Дифференциальный ОУ (Рисунок 8, г, д).

2.4 ОУ с мощным выходом (Рисунок 9 а, б).

3. Промоделировать схемы усилителей информационных сигналов в среде «CIRCUITMAKER». Определить экспериментальные (промоделированные) значения элементов принципиальной схемы (сопротивления R_m , емкости C_m) и параметров усилителя (коэффициенты усиления по напряжению $K_{u.m}$, току $K_{i.m}$ и мощности $K_{p.m}$).

Сравнить результаты **моделирования** (эксперимента) с **теоретическими** (расчетными) значениями сопротивлений R_T , емкостей C_T и соответствующих коэффициентов усиления $K_{u.T}$, $K_{i.T}$, $K_{p.T}$.

Рассчитать относительные погрешности эксперимента по сравнению с теорией, используя следующие формулы:

$$\delta_R = \frac{R_m - R_T}{R_T} \cdot 100\%; \quad \delta_C = \frac{C_m - C_T}{C_T} \cdot 100\%;$$

$$\delta_{K_u} = \frac{K_{u.m} - K_{u.T}}{K_{u.T}} \cdot 100\%; \quad \delta_{K_i} = \frac{K_{i.m} - K_{i.T}}{K_{i.T}} \cdot 100\%; \quad \delta_{K_p} = \frac{K_{p.m} - K_{p.T}}{K_{p.T}} \cdot 100\%,$$

где $\delta_R, \delta_C, \delta_{K_u}, \delta_{K_i}, \delta_{K_p}$ – относительные погрешности экспериментальных значений сопротивлений, емкостей, коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности соответственно.

ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Таблица 1– Технические характеристики усилителя с общим эмиттером

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Проводимость транзистора	«рпр» – нечетный; «прп» – четный. Номер варианта (нечет/чет) выбирается по последней цифре зачетной книжки.
2	Напряжение питания $E_{п}, (В) \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Мощность нагрузки $P_{н}, Вт \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Сопротивление нагрузки $R_{н}, кОм$	Три последних значащих цифры зачетной книжки
5	Частота входного сигнала $f_{с}, кГц$	Три последних значащих цифры зачетной книжки
6	Статический ток эмиттера $I_{э}, мА \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
7	Коэффициент передачи тока базы (β)	Три последних значащих цифры зачетной книжки
8	Коэффициент усиления по напряжению (K_u)	Две последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 2 – Технические характеристики усилителя с общим коллектором

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Проводимость транзистора	«рпр» – нечетный; «прп» – четный. Номер варианта (нечет/чет) выбирается по последней цифре зачетной книжки.
2	Напряжение питания, $E_{п}, В \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Активная мощность нагрузки $P_{н}, Вт \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Сопротивление нагрузки, $R_{н}, Ом$	Три последних значащих цифры зачетной книжки
5	Частота входного сигнала, $f_{с}, кГц$	Три последних значащих цифры зачетной книжки
6	Коэффициент передачи тока базы (β)	Три последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 3 – Технические характеристики транзисторного ключа

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Проводимость транзистора	«рпр» – нечетный; «прп» – четный. Номер варианта (нечет/чет) выбирается по последней цифре зачетной книжки.
2	Напряжение питания, $E_{\text{п}}, \text{В} \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Остаточное напряжение на коллекторе транзистора $U_{\text{ост.}}, \text{В} \cdot 10^{-2}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Температура транзистора, $T, ^\circ\text{C}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
5	Статический ток эмиттера, $I_{\text{э}}, \text{мА} \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
6	Коэффициент передачи тока базы (β)	Три последних значащих цифры зачетной книжки
7	Сопротивление нагрузки $R_{\text{к}}, \text{Ом}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 4 – Технические характеристики инвертирующего ОУ

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}}^{\text{иу}}, \text{кОм}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
2	Сопротивление нагрузки усилителя $R_{\text{н}}, \text{кОм}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{\text{м.н.}}, \text{В} \cdot 10^{-1}$	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{иу}}$	Три последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 5 – Технические характеристики неинвертирующего ОУ

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{ну}$, кОм	Две последних значащих цифры зачетной книжки
2	Сопротивление нагрузки усилителя R_n , кОм	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$, В · 10 ⁻¹	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Коэффициент усиления по напряжению $K_u^{ну}$	Три последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 6 – Технические характеристики дифференциального ОУ

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Дифференциальное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{ду}$, кОм	Две последних значащих цифры зачетной книжки
2	Сопротивление нагрузки усилителя R_n , кОм	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$, В · 10 ⁻¹	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Коэффициент усиления по напряжению $K_u^{ду}$	Три последних значащих цифры зачетной книжки

Таблица 7 – Технические характеристики ОУ с мощным выходом

№	Характеристические параметры	Вариант в соответствии с кодом
1	Активное сопротивление нагрузки усилителя R_n , Ом	Три последних значащих цифры зачетной книжки
2	Амплитуда напряжения на нагрузке усилителя $U_{м.н.}$, В · 10 ⁻¹	Две последних значащих цифры зачетной книжки
3	Активное входное сопротивление усилителя $R_{вх}$, кОм	Две последних значащих цифры зачетной книжки
4	Коэффициент усиления по напряжению K_u	Три последних значащих цифры зачетной книжки

Примечание. При наличии «нулевых» значений цифр кода следует обратиться к преподавателю.

Содержание отчета

В отчете о расчетно-графическом задании должны быть представлены следующие материалы:

- электрические схемы усилителей информационных сигналов и методики их расчета;
- результаты моделирования усилителей в среде «CIRCUITMAKER» – электрические схемы устройств с измерительными приборами и осциллограммами в контрольных точках;
- расчет относительных погрешностей результатов моделирования по сравнению с теорией.

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуются транзисторные усилители мощности?
2. В чем общность и принципиальные различия транзисторных усилителей с общим эмиттером и коллектором?
3. Какими параметрами характеризуется ключевой режим транзистора?
4. Чем определяется входное и выходное сопротивление транзисторного усилителя?
5. Как изменить коэффициент усиления транзисторного усилителя?
6. Какими свойствами обладают входы операционного усилителя?
7. Какими параметрами характеризуется инвертирующий усилитель?
8. Какими параметрами характеризуется неинвертирующий усилитель?
9. Какими параметрами характеризуется дифференциальный усилитель?
10. Чем определяется нагрузочная способность операционного усилителя?

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ

Размерность единиц измерения соответствует системе СИ [4, 6]

№	Параметр	Условное обозначение	Единицы измерения в системе СИ
1	Электродвижущая сила	E	вольт (В)
2	Электрическое напряжение	U	вольт (В)
3	Электрический ток	I	ампер (А)
4	Электрическая мощность	P	ватт (Вт)
5	Активное электрическое сопротивление	R, r	Ом (Ом)
6	Электрическая емкость	C	фарад (Ф)
7	Реактивное емкостное сопротивление	X_c	Ом, (Ом)
8	Электрический импеданс	Z	Ом, (Ом)
9	Круговая частота	ω	секунда ⁻¹ (1/с)
10	Циклическая частота	f	герц, (Гц)
11	Коэффициент передачи тока базы	β	-
12	Коэффициент передачи тока эмиттера	α	-
13	Коэффициент усиления по напряжению	K_u	-
14	Коэффициент усиления по току	K_i	-
15	Коэффициент усиления по мощности	K_p	-

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

В – выход;

ДУ – дифференциальный усилитель;

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ИВ – инвертирующий вход;

МС – мехатронная система;

НВ – неинвертирующий вход;

ОБ – общая база;

ОК – общий коллектор;

ОУ – операционный усилитель;

ОЭ – общий эмиттер;

ПН – повторитель напряжения;

ТК – транзисторный ключ;

УИС – усилитель информационных сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия/М. Гук.-С.-Петербург, «Питер», 2000.- 816 с.
- 2 Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах./ В.С. Гутников. - Л.: Энергоатомиздат, 1988.-304 с.
- 3 Кофлин Р. Операционные усилители и линейные интегральные схемы/Р. Кофлин, Ф. Дрискол.- М.: Мир, 1979.- 360 с.
- 4 Кухлинг Х. Справочник по физике/ Х. Кухлинг.-М.: Мир, 1982.-520 с.
- 5 Новиков Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC/Ю.В. Новиков, О. А. Калашников, С.Э. Гуляев.-М.: «ЭКОМ», 2000.- 222 с.
- 6 Пашков Е. В., Осинский Ю. А., Четверкин А. А. Электропневмоавтоматика в производственных процессах: Учебное пособие/ Е. В. Пашков, Ю. А. Осинский, А. А. Четверкин.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1997.-368 с.
- 7 Пейтон А., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях./ А. Пейтон, В. Волш.- М.: Бином, 1994-352 с.
- 8 Справочник: Резисторы/Под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. - М.: Радио и связь, 1987.- 352 с.
- 9 Степаненко И.И. Основы теории транзисторов и транзисторных схем/ И.И. Степаненко. - М.: Энергия, 1973.- 608 с.
- 10 Усатенко С.Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник/С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. - М.: Издательство стандартов, 1989.- 325 с.
- 11 Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Т. 1/ П. Хоровиц, У. Хилл.-М.: Мир, 1984.-598 с.

Заказ № _____ от « » _____ 2007 г. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ