

В. Ю. Кузнецов
И. Д. Зятиков
В. П. Иваненко

ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

Санкт-Петербург
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**В. Ю. Кузнецов
И. Д. Зятиков
В. П. Иваненко**

ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2022

УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7
Э 452

Рецензент

кандидат технических наук Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна

Н. С. Благодарный

Кузнецов, В. Ю., Зятиков, И. Д., Иваненко, В. П.

Э 452 Электроника: Практикум / Кузнецов В. Ю., Зятиков И. Д., Иваненко В. П. –
СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. – 58 с.

Практикум соответствует программам и учебным планам дисциплины «Электроника» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Практикум содержит предварительные теоретические сведения и примеры решения задач по электронике. Пособие снабжено задачами для самостоятельной работы по каждой теме (текущий контроль).

Практикум предназначен для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения.

УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2022
© Кузнецов В. Ю., Зятиков И. Д.,
Иваненко В. П., 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, СТАБИЛИТРОНЫ, ОПТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ.....	5
1.1. Типовые задачи с решениями.....	8
1.2. Задания для самостоятельного решения.....	10
2. МАЛОМОЩНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	11
2.1. Типовые задачи с решениями.....	12
2.2. Задания и задачи для самостоятельного решения.....	13
3. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ.....	15
3.1. Типовая задача с решением.....	17
3.2. Задания для самостоятельного решения.....	19
4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ.....	20
4.1. Типовая задача с решением.....	20
4.2. Задания и задачи для самостоятельного решения.....	21
5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ.....	23
5.1. Типовая задача с решением.....	25
5.2. Задания для самостоятельного решения.....	29
6. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ.....	32
6.1. Типовые задачи с решениями.....	33
6.2. Задача для самостоятельного решения.....	36
7. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМУЛЫ.....	42
7.1. Типовая задача с решением.....	46
7.2. Задачи для самостоятельного решения.....	48
8. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА.....	50
8.1. Типовые задачи с решениями.....	52
8.2. Задачи для самостоятельного решения.....	56
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	58

ВВЕДЕНИЕ

Электроника представляет собой область науки и техники, охватывающую изучение и применение электронных и ионных явлений, протекающих в вакууме, газах, жидкостях, твердых телах и плазме, а также на их границах. Техническая электроника занимается изучением теории и практики применения электронных и ионных приборов, устройств, систем и установок в различных областях человеческой деятельности – науке, промышленности, связи, сельском хозяйстве, строительстве, транспорте и др.

При расчете конкретных электронных устройств используются различные физические эквивалентные схемы и схемы замещения на основе систем параметров (h-параметров), возникает необходимость в знании характеристик и параметров активных элементов, которые должны быть определены из справочной литературы. По каждой из рассматриваемых тем даны примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельной работы. Приведен список литературы, использованной при составлении пособия, и необходимой для более глубокого изучения курса.

При решении задач рекомендуется: изучить соответствующие данной теме разделы курса лекций и рекомендуемых литературных источников; рассмотреть примеры решения задач; провести самостоятельное решение задач.

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, СТАБИЛИТРОНЫ, ОПТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ

Диод – это полупроводниковый прибор с одним р-п переходом и двумя выводами: анод А и катод К (рис. 1.1).

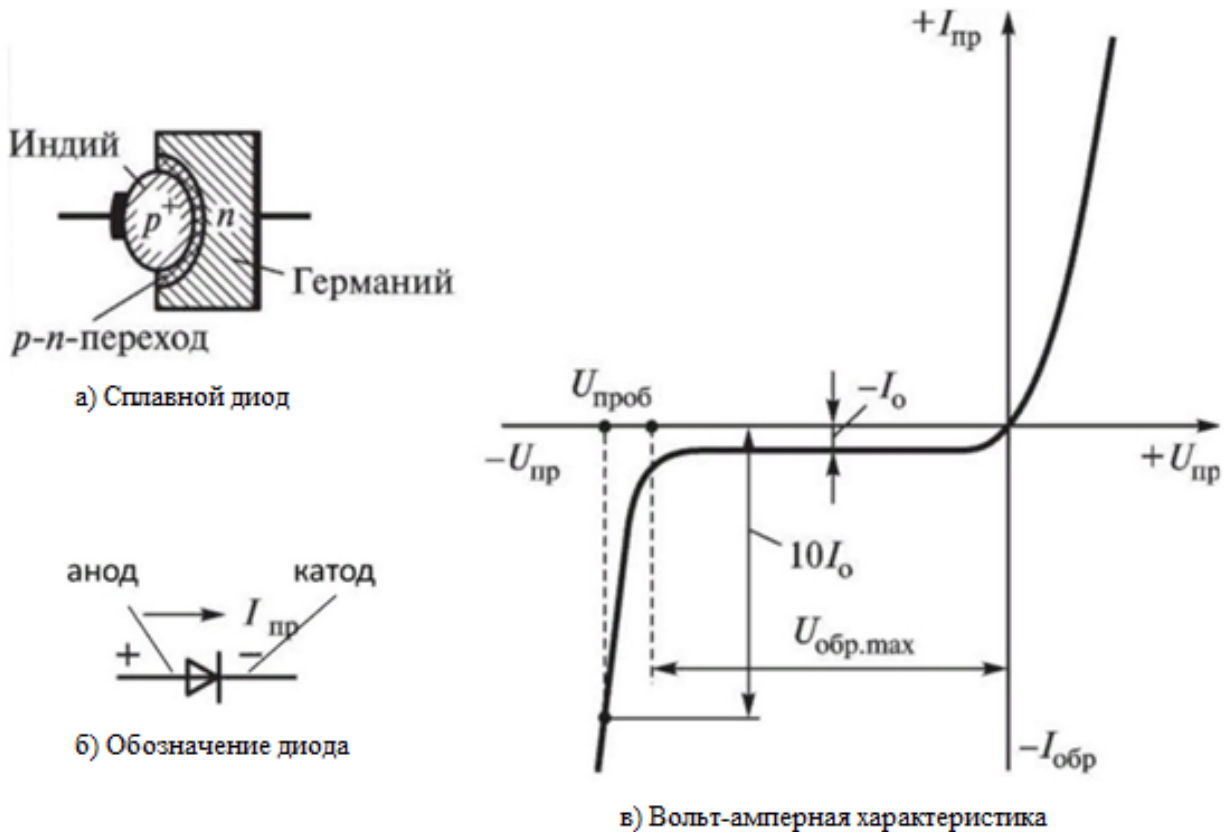


Рис. 1.1. Характеристики и параметры выпрямительных диодов

При включении р-п перехода под прямое напряжение $U_{пр}$ сопротивление р-п перехода $R_{пр}$ снижается, а ток $I_{пр}$ возрастает. При обратном напряжении $U_{обр}$ обратный ток $-I_0$ неосновных носителей заряда оказывается во много сотен или тысяч раз меньше прямого тока. При напряжении $U > U_{обр.мах}$ начинается лавинообразный процесс нарастания обратного тока $I_{обр}$, соответствующий электрическому пробое р-п перехода, переходящий, если не ограничить ток, в необратимый тепловой пробой.

Диод обладает неодинаковой электрической проводимостью в прямом и обратном направлениях его включения. Поэтому полупроводниковые диоды используют в схемах выпрямления переменного тока.

Так как напряжение на полностью открытом диоде не превышает 0,5 ... 0,7 В, то для приближенных расчетов диод рассматривают как вентиль: открыт – закрыт, имеющий вольтамперную характеристику (ВАХ) (рис. 1.2).

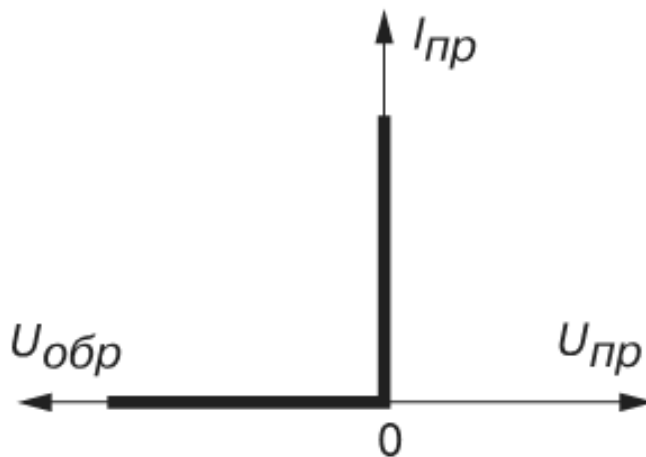


Рис. 1.2. ВАХ идеального диода

Анализ типовых ВАХ диодов показывает, что прямое напряжение $U_{пр}$ на германиевом диоде почти в два раза меньше, чем на кремниевом при одинаковых значениях прямого тока $I_{пр}$, а обратный ток $I_{обр}$ кремниевого диода значительно меньше обратного тока германиевого при одинаковых обратных напряжениях $U_{обр}$. К тому же германиевый диод начинает проводить ток при ничтожно малом прямом напряжении $U_{пр}$, а кремниевый – только при $U_{пр} = 0,4 \dots 0,5$ В.

Исходя из этих свойств, германиевые диоды применяют как в схемах выпрямления переменного тока, так и для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 В), а кремниевые, наиболее распространенные как в схемах выпрямления, так и в схемах устройств, в которых обратный ток недопустим или должен быть ничтожно мал. К тому же, кремниевые диоды сохраняют работоспособность до температуры окружающей среды 125 ... 150 °С, тогда как германиевые могут работать только до 70 °С.

Вольтамперная характеристика, т. е. зависимость тока, протекающего через р-п-переход, от значения и полярности приложенного к нему напряжения U , достаточно хорошо соответствует выражению:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{U}{\varphi_T}} - 1 \right),$$

где I_0 – ток насыщения; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}, \frac{Дж}{К}$ – постоянная Больцмана; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}, Кл$ – заряд электрона; T – абсолютная температура; $\varphi_T = \frac{T}{11600}$ – температурный потенциал электрона, равный при $t = 20$ °С:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q_e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (273 + 20)}{1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 0,025 \text{ В} = 25 \text{ мВ}.$$

При обратном отрицательном напряжении от десятых вольта и выше слагаемым $e^{-U_{\text{обр}}/0,025}$ можно пренебречь по сравнению с единицей, и ток оказывается равным $I = I_{\text{обр}}$, не зависящим от напряжения. При прямом приложенном напряжении в десятые доли вольта и выше можно пренебречь единицей по сравнению со слагаемым $e^{-U_{\text{пр}}/0,025}$ и, следовательно, ВАХ оказывается близкой к экспоненте.

Пусть имеем идеализированный p-n переход при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, о котором известно:

- концентрация донорной примеси – $N_d = 2,5 \cdot 10^{15}$ атомов/см³;
- акцепторной примеси – $N_a = 2 \cdot 10^{18}$ атомов/см³;
- собственная концентрация носителей в кристалле, из которого изготовлен переход – $N_i = 3,5 \cdot 10^{14}$ атомов/см³.

Определим прямой ток $I_{\text{пр}}$ и контактную разность потенциалов U_ϕ при приложенном к зажимам диода напряжении $U_{\text{пр}} = 0,6 \text{ В}$ и токе $I_0 = 1 \text{ мкА}$.

Прямой ток:

$$I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1) = 10^{-6}(e^{0,6/0,025} - 1) \approx 0,054 = 54 \text{ мА}.$$

Контактная разность потенциалов на идеализированном переходе, образованная приграничными зарядами:

$$U_\phi = \varphi_T \ln \frac{N_d N_a}{N_i^2} = 0,025 \ln \frac{2,5 \cdot 10^{15} \cdot 2 \cdot 10^{18}}{(3,5 \cdot 10^{14})^2} \approx \\ \approx 0,025 \ln(4,08 \cdot 10^4) = 0,265 \text{ мВ}.$$

Разность напряжений $\Delta U = U_{\text{пр}} - U_\phi = 0,335$ объясняется падением напряжения на сопротивлениях n- и p-областей полупроводника.

Полупроводниковые диоды имеют вентильные свойства, которые используются для выпрямления переменного тока.

1) Сопротивление диода постоянному току определяется по формуле:

$$R_0 = U_a / I_a,$$

где U_a – анодное напряжение в прямом направлении, В; I_a – анодный ток в прямом направлении, А.

2) Дифференциальное сопротивление диода:

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a,$$

где ΔU_a – изменение прямого анодного напряжения, В; ΔI_a – изменение прямого анодного тока, А.

3) Мощность потерь на аноде диода:

$$P_a = I_a \cdot U_a.$$

1.1. Типовые задачи с решениями

Пример 1.1

Обратный ток полупроводникового диода $I_0 = 1$ мкА при температуре $T = 300$ К. Определить сопротивление диода постоянному току R_0 и его дифференциальное сопротивление r_d при прямом напряжении $U = 150$ мВ.

Решение

Определим ток диода I по формуле $I = I_0(e^{U/\varphi_T} - 1)$, где φ_T – тепловой потенциал, $\varphi_T = \frac{kT}{q}$, k – постоянная Больцмана, $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, q_e – заряд электрона, $q_e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$$\varphi_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600} = \frac{300}{11600} \approx 25,86.$$

$$I = 1 \cdot 10^{-6} \left(e^{150 \cdot \frac{10^{-3}}{25,86} \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \approx 326,5 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Сопротивление диода постоянному току:

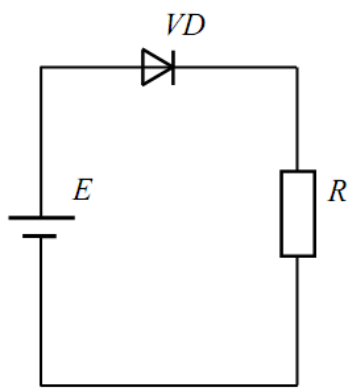
$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{(150 \cdot 10^{-3})}{(326,5 \cdot 10^{-6})} \approx 460 \text{ Ом.}$$

Дифференциальное сопротивление диода:

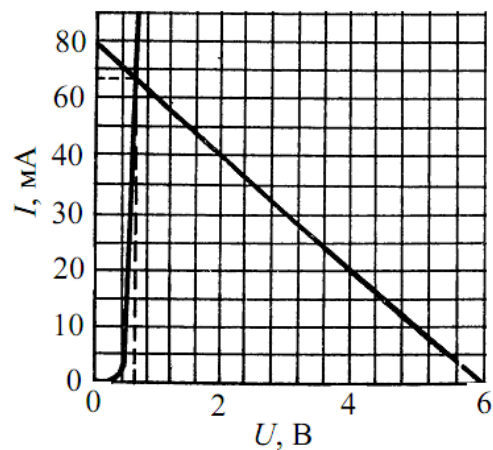
$$r_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\varphi_T}{I + I_0} = \frac{25,86 \cdot 10^{-3}}{326,5 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6}} \approx 79,32 \text{ Ом.}$$

Пример 1.2

Определить ток I , текущий в схеме (рис. 1.3а), и напряжение на диоде U_d . Известна вольтамперная характеристика диода (рис. 1.3б), $E = 6$ В; $R = 75$ Ом.



а)



б)

Рис. 1.3. Исходные данные: а – схема включения диода; б – графоаналитический метод определения тока через диод и напряжения на нем

Решение

Искомые параметры определяются из решения системы уравнений (по II закону Кирхгофа):

$$\begin{cases} E = U_d + IR; \\ I = f(U_d); \end{cases}'$$

где первое уравнение системы – уравнение нагрузочной прямой; второе – вольтамперная характеристика диода.

Для решения задачи используем графоаналитический метод. Построим нагрузочную прямую по двум точкам (точкам ее пересечения с осями координат). Напряжение холостого хода U_{xx} – это точка пересечения нагрузочной прямой с осью абсцисс ($I = 0$), $U_{xx} = E = 6$ В. Ток короткого замыкания $I_{кз}$ – точка пересечения прямой с осью ординат ($U_d = 0$), $I_{кз} = E/R = 6/75 = 80$ мА.

Определяемые значения тока I и напряжения U_d лежат на пересечении вольтамперной характеристики и нагрузочной прямой:

$$I = 67 \text{ мА}; U = 6 \text{ мВ.}$$

1.2. Задания для самостоятельного решения

1. Ток, текущий в идеальном p-n переходе при большом обратном напряжении и 300 К, равен $2 \cdot 10^{-7}$ А. Определить ток при прямом напряжении 0,1 В.

2. Диод имеет обратный ток насыщения $I_0 = 10$ мкА. Напряжение, приложенное к диоду, равно 0,5 В. Найти отношение прямого тока к обратному при 300 К.

3. Германиевый полупроводниковый диод, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 25$ мкА, работает при прямом смещении 0,1 В и 300 К. Определить сопротивление диода постоянному и переменному току (дифференциальное).

4. Для идеального p-n перехода определить при каком напряжении обратный ток будет достигать 90 % значения обратного тока насыщения при 300 К;

5. Для идеального p-n перехода определить отношение тока при прямом напряжении 0,05 В к току при том же значении обратного тока.

6. В идеальном p-n переходе обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-14}$ А при 300 К и $I_0 = 10^{-19}$ А при 398 К. Определить напряжения на p-n переходе в обоих случаях, если прямой ток равен 1 мА.

7. Определить во сколько раз увеличивается обратный ток насыщения сплавного p-n перехода, если для Ge диода температура увеличивается от 20 °С до 80 °С.

8. Определить во сколько раз увеличивается обратный ток насыщения сплавного p-n перехода, если для Si диода температура увеличивается от 20 °С до 150 °С.

9. Обратный ток насыщения полупроводникового диода $I_0 = 10^{-6}$ А при 300 К. Определить сопротивление диода постоянному и переменному току при прямом напряжении 0,15 В.

10. При изменении прямого напряжения на 0,1 В прямой ток Ge диода изменяется на 10 мкА, а при изменении обратного напряжения на 10 В обратный ток изменяется на 40 мкА. Определить дифференциальные сопротивления диода при прямом и обратном напряжениях.

11. Определить, во сколько раз изменится сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление диода Д305 при изменении прямого напряжения от 0,4 до 0,6 В при 20 °С.

12. Определить, во сколько раз изменится сопротивление постоянному току и дифференциальное сопротивление диода Д305 при изменении температуры от 20 до 125 °С.

13. Определить ток идеализированного диода, текущий в цепи, если $E = 5$ В, $R = 1$ кОм, обратный ток насыщения $I_0 = 10^{-12}$ А при 300 К.

2. МАЛОМОЩНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Выпрямленное напряжение для однополупериодного выпрямителя (рис. 2.2):

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi},$$

где U_{2m} – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора; для двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (рис. 2.1) и мостовой схемы (рис. 2.3):

$$U_0 = \frac{2U'_{2m}}{\pi},$$

где U'_{2m} – половина амплитуды напряжения вторичной обмотки трансформатора.

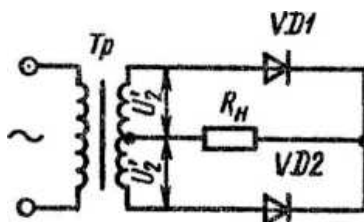


Рис. 2.1. Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

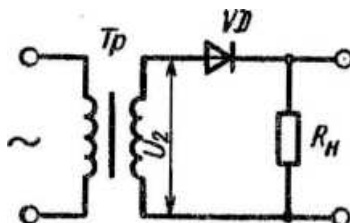


Рис. 2.2. Схема однополупериодного выпрямителя

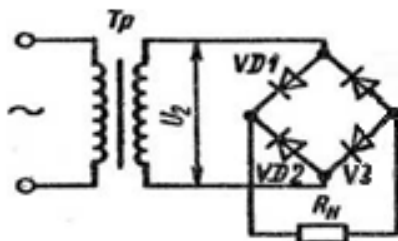


Рис. 2.3. Двухполупериодная мостовая схема выпрямителя

Наибольшее обратное напряжение, приложенное к диоду:

- для однополупериодного выпрямителя и мостовой схемы:

$$U_{\text{обр}} = U_{2m};$$

- для двухполупериодного выпрямителя со средней точкой:

$$U_{\text{обр}} = 2U'_{2m};$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения:

$$k_n = \frac{U_{1m}}{U_0},$$

где U_{1m} – амплитуда первой гармоники напряжения на нагрузке.

Коэффициент сглаживания:

$$q = \frac{k_{\text{п вх}}}{k_{\text{п вых}}},$$

где $k_{\text{п вх}}$, $k_{\text{п вых}}$ – коэффициенты пульсаций на входе и выходе сглаживающего фильтра.

При решении задач следует помнить, что основными параметрами полупроводниковых диодов являются допустимый ток $I_{\text{доп}}$, на который рассчитан данный диод, и обратное напряжение $U_{\text{обр}}$, выдерживаемое диодом без пробоя в непроводящий период. Обычно при составлении реальной схемы выпрямителя задаются значением мощности потребителя P_0 , Вт, получающего питание от данного выпрямителя, и выпрямленным напряжением U_0 , В, при котором работает потребитель постоянного тока. При выборе диода, следовательно, должно соблюдаться условие $U_{\text{обр}} \geq U_b$.

Определим ток потребителя $I_0 = P_0/U_0$. Сравнивая ток потребителя с допустимым током диода $I_{\text{доп}}$, выбирают диоды для схем выпрямителя.

Следует учесть, что для однополупериодного выпрямителя надо соблюдать условие $I_{\text{доп}} \geq I_0$. Напряжение, действующее на диод в непроводящий период U_b , определяют $U_b = \pi U_0 = 3,14 U_0$.

Для двухполупериодной схемы выпрямления тока следует соблюдать условие $I_{\text{доп}} \geq 0,5 I_0$; $U_b = \pi U_0 = 3,14 U_0$.

Для мостовой схемы выпрямления тока следует соблюдать условие $I_{\text{доп}} \geq 0,5 I_0$; $U_b = 2\pi U_0/2 = 1,57 U_0$.

2.1. Типовые задачи с решениями

Пример 2.1

В схеме однополупериодного выпрямителя (см. рис. 2.2) через диод проходит выпрямленный ток $I_0 = 75$ мА. Определить сопротивление нагрузки R_n , если амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m} = 200$ В.

Решение

Выпрямленное напряжение на нагрузке:

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi}.$$

Сопротивление нагрузки:

$$R_H = \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_{2m}}{\pi \cdot I_0} = \frac{220}{3,14 \cdot 75 \cdot 10^{-3}} = 850 \text{ Ом}.$$

Пример 2.2

Амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора двухполупериодной схемы выпрямителя (рис. 2.1) $U'_{2m} = 210 \text{ В}$. Определить выпрямленный ток, проходящий через каждый диод I_0 , если сопротивление нагрузки $R_H = 510 \text{ Ом}$.

Решение

Выпрямленное напряжение для выпрямителя со средней точкой (рис. 2.1):

$$U_0 = \frac{2U'_{2m}}{\pi}$$

Ток, проходящий через диод:

$$I_0 = \frac{U_0}{2R_H} = \frac{U'_{2m}}{\pi R_H} = \frac{210}{3,14 \cdot 510} = 131 \text{ мА}.$$

2.2. Задания и задачи для самостоятельного решения

1. В схеме однополупериодного выпрямителя (см. рис. 2.2) на нагрузке $R_H = 510 \text{ Ом}$ постоянное напряжение $U_0 = 100 \text{ В}$. Правильно ли выбран диод Д205, для которого максимальное обратное напряжение $U_{обр} = 400 \text{ В}$, а наибольший выпрямленный ток $I_0 = 400 \text{ мА}$?

Ответ: правильно.

2. Для схемы однополупериодного выпрямителя (см. рис. 2.2) определить выпрямленное напряжение U_0 , если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора $U_{1m} = 220 \text{ В}$, коэффициент трансформации $n = 1,43$.

Ответ: 100 В.

3. Для схемы однополупериодного выпрямителя (см. рис. 2.2) определить постоянное напряжение на нагрузке, если на вторичной обмотке трансформатора $U_{2m} = 250 \text{ В}$.

Ответ: $U_0 = 80 \text{ В}$.

4. В схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.1) через нагрузку проходит постоянный ток $I_0 = 600 \text{ мА}$. Можно ли в схеме использовать диоды типа Д229В, у которых наибольший средний прямой ток не более 400 мА?

Ответ: можно.

5. Определить частоту пульсации первой гармоники напряжения на нагрузке двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.1), если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту $f_c = 400$ Гц?

Ответ: $f_v = 800$ Гц.

6. Для схемы двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.1) определить выпрямленное напряжение на нагрузке U_0 , если действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_2 = 120$ В.

Ответ: $U_0 = 108$ В.

7. В схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.3) обратное напряжение, действующее на каждый диод, $U_{обр} = 471,2$ В. Определить выпрямленное напряжение на нагрузке U_0 .

Ответ: $U_0 = 150$ В.

8. Определить амплитуду переменного напряжения на нагрузке в схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.3), если выпрямленный ток, проходящий через каждый диод, $I_0 = 70$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 39$ Ом.

Ответ: $U_{nm} = 86$ В.

9. Частота колебаний пульсации выпрямленного напряжения в схеме двухполупериодного выпрямителя (см. рис. 2.1) $f_c = 2$ кГц. Какова частота питающей сети?

Ответ: $f_H = 1$ кГц.

10. Определить выпрямленное напряжение U_0 на нагрузке двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя (рис. 2.3), если амплитуда напряжения первичной обмотки трансформатора $U_{1m} = 150$ В, а коэффициент трансформации трансформатора $n = 2$.

Ответ: $U_0 = 191$ В.

11. В двухполупериодной мостовой схеме выпрямителя (рис. 2.3) обратное напряжение на диодах $U_{обр} = 235,5$ В. Определить ток, проходящий через каждый диод, если сопротивление нагрузки $R_H = 390$ Ом.

Ответ: $I_0 = 142$ мА.

12. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя (рис. 2.3), если через каждый диод идет ток $I_0 = 150$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 430$ Ом.

Ответ: $U_2 = 71,6$ В.

13. Для двухполупериодной мостовой схемы выпрямителя (рис. 2.3) определить обратное напряжение на диодах, если через каждый диод идет ток $I_0 = 250$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 680$ Ом.

Ответ: $U_{обр} = 533,8$ В.

3. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ

Сглаживающий фильтр

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания $q = \frac{k_{\text{ВХ}}}{k_{\text{ВЫХ}}}$, где $k_{\text{ВХ}}$ – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т. е. для схемы выпрямителя без фильтра), а $k_{\text{ВЫХ}}$ – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т. е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Емкостной фильтр

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{Н}}$ (рис.3.1).

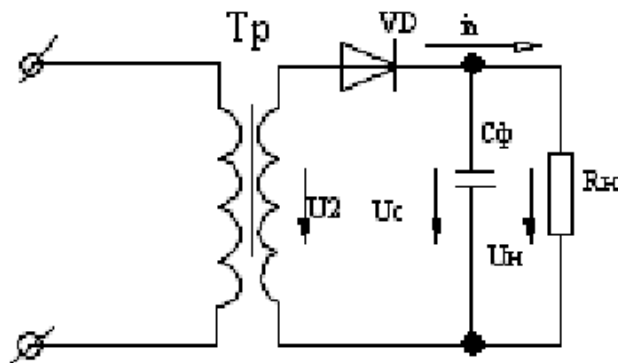


Рис. 3.1. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

Коэффициент сглаживания емкостного фильтра:

$$q_c = 2\pi f_1 t R_{\text{Н}} C_{\text{Ф}},$$

где t – число пульсаций выпрямленного напряжения.

Индуктивный фильтр

Они состоят из дросселя $L_{\text{Ф}}$, который включают последовательно с нагрузкой $R_{\text{Н}}$ (рис. 3.2).

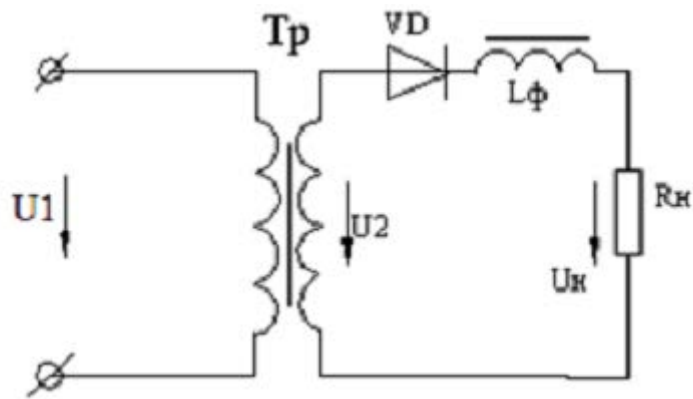


Рис. 3.2. Схема включения индуктивного фильтра

Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне U_2 зависит от постоянной времени, то длительность импульса увеличивается с ростом τ :

$$\tau = \frac{L_\phi}{R_H}$$

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра:

$$q_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_H},$$

где m – число пульсаций выпрямленного напряжения.

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами. К многозвенным фильтрам относятся LC или RC – фильтры, которые обеспечивают большой коэффициент сглаживания пульсаций ρ и включены Г-образно или П-образно (рис. 3.3 и 3.4).

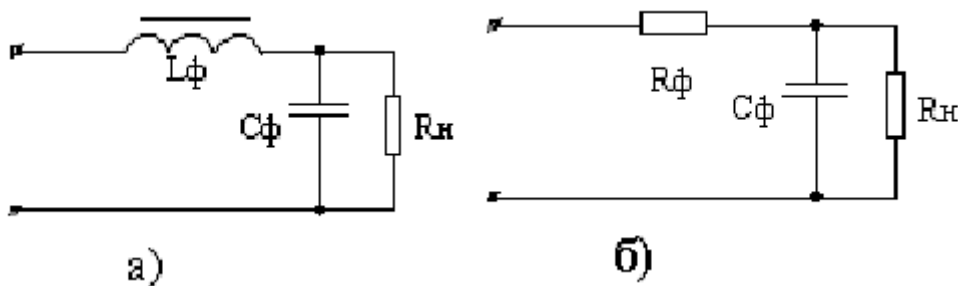


Рис. 3.3. Г-образные LC и RC-фильтры

Коэффициент сглаживания LC-фильтра:

$$q_\Gamma = \omega_{\text{осн}}^2 L_\phi C_\phi.$$

В маломощных усилителях, где сопротивление R_H составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор R_ϕ , что уменьшает массу, габариты и

стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, будет меньше, чем у LC- фильтра:

$$q = (0,5 \div 0,9)\omega_{\text{осн}}R_{\text{ф}}C_{\text{ф}}.$$

В П-образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев:

$$q_{\text{П}} = q_{\text{с}} \cdot q_{\text{г}}.$$

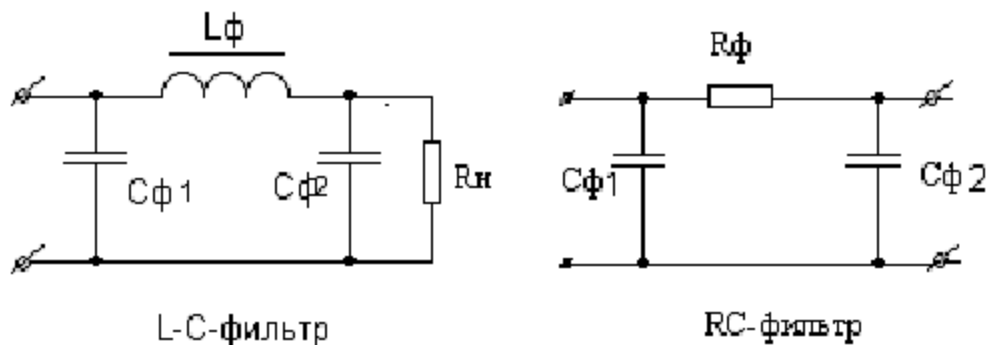


Рис. 3.4. П-образные LC и RC-фильтры

3.1. Типовая задача с решением

Пример 3.1

Рассчитать и выбрать простой сглаживающий фильтр (индуктивный или емкостный) в выпрямителе (рис. 3.5) для получения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки $k_{\text{вых}} = 0,01$ при двух значениях сопротивления нагрузки: $R_{\text{н}} = 10 \text{ Ом}$ и $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$. Частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$.

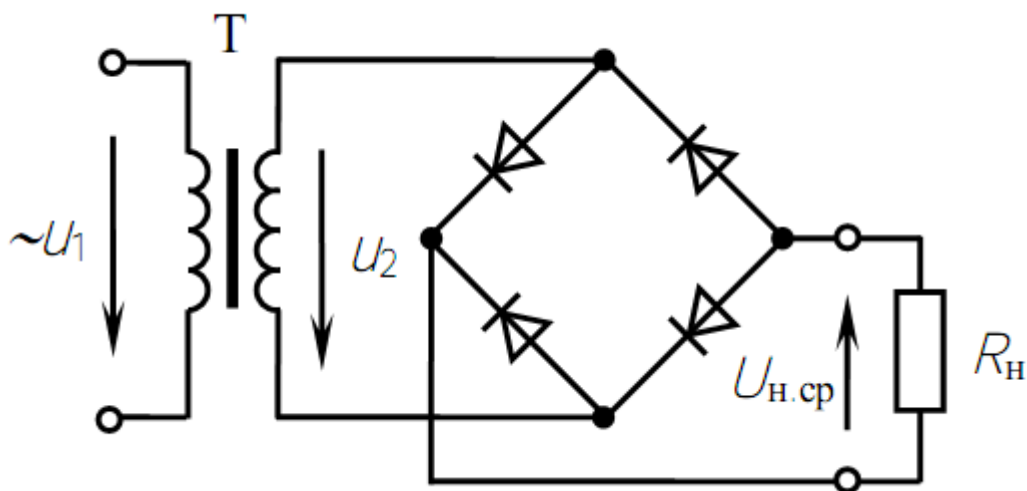


Рис. 3.5. Исходный выпрямитель

Решение

Требуемый коэффициент сглаживания выпрямленного напряжения:

$$q = \frac{k_{\text{вх}}}{k_{\text{вых}}} = \frac{0,667}{0,01} = 66,7,$$

где $k_{\text{вх}}$ – коэффициент пульсаций на входе двухполупериодного выпрямителя без фильтра (см. табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Соотношения для выбора элементов фильтра

Схема выпрямления	Соотношения для выбора				Коэффициент пульсаций
	диодов		трансформатора		
	$\frac{U_{\text{обр max}}}{U_{\text{н.ср}}}$	$\frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{н.ср}}}$	$\frac{U_{2\phi}}{U_{\text{н.ср}}}$	$\frac{P_{\text{T}}}{P_{\text{H}}}$	$k_{\text{п}}$
Однополупериодная ($m = 1$)	3,14	1	2,22	3,0...3,5	1,57
Однофазная мостовая ($m = 2$)	1,57	1/2	1,11	1,23	0,667
Двухполупериодная с нулевым выводом трансформатора ($m = 2$)	3,14	1/2	1,11	1,48	0,667

Где m – число пульсаций (фаз) выпрямленного напряжения.

Таблица 3.2 – Коэффициенты сглаживания по типу фильтра

Тип фильтра	Коэффициент сглаживания
Простой емкостной	$k_{\text{сгл C}} = m \omega R_{\phi} C_{\phi}$
Простой индуктивный	$k_{\text{сгл L}} = m \omega L_{\phi} / R_{\phi}$
Г-образный LC-фильтр	$k_{\text{сгл Г}} = m^2 \omega^2 L_{\phi} C_{\phi}$
Г-образный RC-фильтр	$k_{\text{сгл RC}} = (0,5 \dots 0,9) m \omega R_{\phi} C_{\phi}$

При $R_{\text{H}} = 10$ Ом находим:

$$C_{\phi} = \frac{k_{\text{сгл C}} \cdot 10^6}{m \omega R_{\text{H}}} = \frac{66,7 \cdot 10^6}{2 \cdot 314 \cdot 10} = 10600 \text{ мкФ},$$

$$L_{\phi} = \frac{k_{\text{сгл L}} \cdot R_{\text{H}}}{m \omega} = \frac{66,7 \cdot 10}{2 \cdot 314} = 1,06 \text{ Гн}.$$

При $R_{\text{H}} = 1$ кОм получим: $C_{\phi} = 106$ мкФ, $L_{\phi} = 106$ Гн.

Из расчетов видно, что для низкоомной нагрузки следует взять индуктивный фильтр, так как велика емкость C_{ϕ} , для высокоомной нагрузки ($R_{\text{H}} = 1$ кОм) – емкостный фильтр $C_{\phi} = 106$ мкФ.

3.2. Задания для самостоятельного решения

1. Определить параметры Г-образного LC-фильтра к однополупериодному выпрямителю, если коэффициент пульсации напряжения нагрузки $k_{п2} = 0,02$, частота питающей сети $f = 50$ Гц, сопротивление нагрузки $R_H = 200$ Ом.

Ответ: $C_\phi = 200$ мкФ, $L_\phi = 3,92$ Гн.

2. Для схемы двухполупериодного выпрямителя с индуктивным сглаживающим фильтром определить коэффициент сглаживания q , если известно, что амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U'_{2m} = 300$ В, выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, $I_0 = 200$ мА, частота сети $f_c = 50$ Гц, индуктивность дросселя $L_\phi = 10$ Гн.

3. Рассчитать П-образный LC-фильтр (рис. 4.6) к однофазному мостовому выпрямителю с сопротивлением $R_H = 110$ Ом для обеспечения коэффициента пульсаций выходного напряжения $k_{п2} = 0,01$, если частота сети $f = 50$ Гц, $C_\phi = 100$ мкФ, $C_{\phi2}$ выбрать из условия – обычно выбирают $C_{\phi2} = (1 \div 2) C_{\phi1}$.

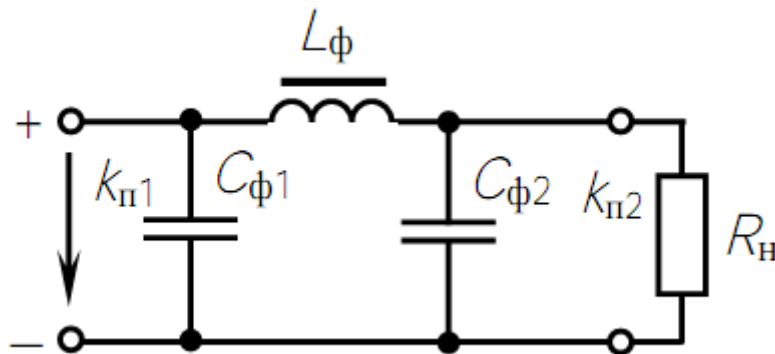


Рис. 4.6. П-образный LC-фильтр

Ответ $L_\phi = 0,242$ Гн

4. При подключении к однофазному мостовому выпрямителю активной нагрузки $R_H = 100$ Ом напряжение $U_{H\text{ ср}} = 0,9 U_{H\text{ х}}$. Как изменится U_H при подключении сглаживающего фильтра (дросселя), если $R_{др} = 10$ Ом? Принять падение напряжения на откр. диодах $\Delta U_a = 0$.

Ответ: уменьшится в 1,09 раз (на 9 %).

5. В схему двухполупериодного выпрямителя включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность фильтра, если выпрямленный ток $I_{H\text{ ср}} = 1$ А, выпрямленное напряжение $U_{H\text{ ср}} = 100$ В, частота сети $f = 400$ Гц, коэффициент сглаживания $k_{сгл} = 15$.

6. Определить емкость конденсатора, подключенного к выходу двухполупериодного выпрямителя для обеспечения коэффициента сглаживания $k_{сгл} = 100$, если $f_1 = 50$ Гц, $R_H = 1$ кОм.

4. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ

Входное сопротивление транзистора переменному току:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}},$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$ – изменение входного напряжения, В; $\Delta I_{\text{вх}}$ – изменение входного тока под действием изменения входного напряжения, А.

Коэффициенты:

Усиления тока базы в схеме с общим эмиттером:

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{б}}}.$$

Передачи тока эмиттера в схеме с общей базой:

$$h_{21б} = \frac{\Delta I_{\text{к}}}{\Delta I_{\text{э}}},$$

где $\Delta I_{\text{к}}$, $\Delta I_{\text{б}}$, $\Delta I_{\text{э}}$ – изменения токов коллектора, базы и эмиттера.

Связь между коэффициентом усиления тока базы $h_{21э}$ и коэффициентом передачи тока эмиттера $h_{21б}$.

$$h_{21э} = \frac{h_{21б}}{1 - h_{21б}}.$$

Мощность потерь на коллекторе:

$$P_{\text{к}} = I_{\text{к}} \cdot U_{\text{к}},$$

где $I_{\text{к}}$ – ток коллектора, А; $U_{\text{к}}$ – напряжение на коллекторе, В.

4.1. Типовая задача с решением

Пример 4.1

По семейству выходных характеристик транзистора КТ339А в схеме с общим эмиттером (рис. 4.1) определить ток базы $I_{\text{б}}$ и напряжение на коллекторе $U_{\text{к}}$ в рабочей точке А, в которой ток коллектора $I_{\text{к}} = 6$ мА, а мощность, рассеиваемая на коллекторе, $P_{\text{к}} = 72$ мВт.

Решение

Определяем мощность потерь на коллекторе:

$$P_{\text{к}} = U_{\text{к}} \cdot I_{\text{к}}, \text{ отсюда } U_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{к}}} = \frac{72 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ В.}$$

Таким образом положение рабочей точки А на выходных характеристиках определяется значениями $I_{\text{к}} = 6$ мА, $U_{\text{к}} = 12$ В. Находим положение рабочей точки А на выходных характеристиках транзистора КТ339А (рис. 4.1) и определяем ток базы: $I_{\text{б}} = 150$ мкА.

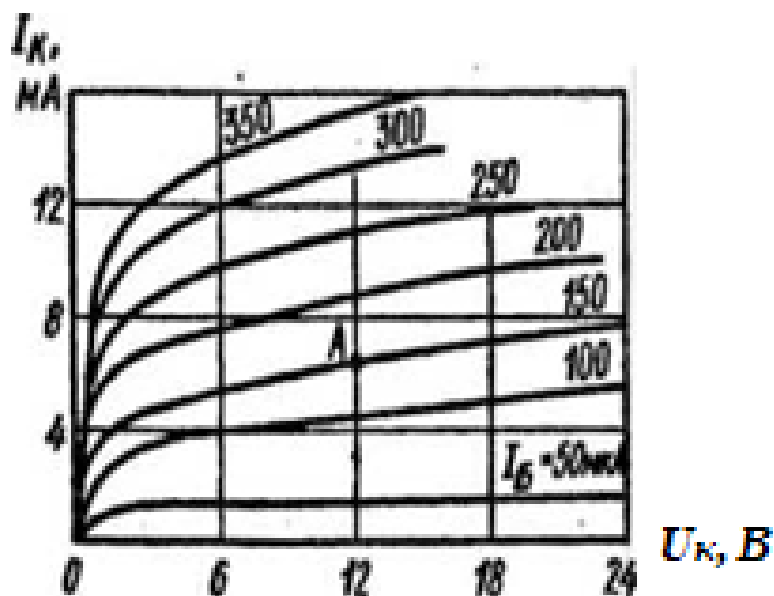


Рис. 4.1. Выходные характеристики транзистора КТ339А

4.2. Задания и задачи для самостоятельного решения

1. Для транзистора КТ312А обратный ток коллектора $I_K = 10 \text{ мкА}$ при напряжении $U_K = 15 \text{ В}$. Определить обратное сопротивление коллекторного перехода постоянному току.

2. Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы $h_{21э} = 10 \div 100$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б}$.

Ответ: $h_{21б} = 0,91 \div 0,99$.

3. Для транзистора ГТ109А коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б} = 0,95 \div 0,98$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент усиления тока базы.

Ответ: $h_{21э} = 20 \div 50$.

4. По семейству выходных характеристик транзистора КТ312А в схеме с общим эмиттером (рис. 4.2) определить напряжение на коллекторе U_K , при котором проходит ток коллектора $I_K = 31,5 \text{ мА}$, а ток базы $I_б = 0,8 \text{ мА}$. Оцените мощность, рассеиваемую коллектором в данном режиме.

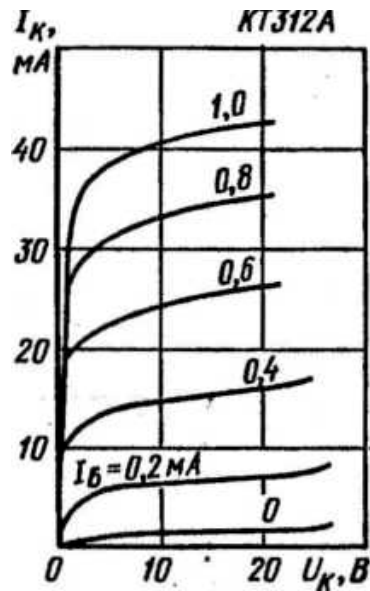


Рис. 4.2. Выходная характеристика

5. Для транзистора КТ339А, включенного по схеме с общей базой, при изменении тока эмиттера на 10 мА ток коллектора изменяется на 9,7 мА. Определить коэффициент усиления по току для транзистора в схеме с общим эмиттером.

Ответ: $h_{21э} = 32$.

6. По входной характеристике транзистора ГТ403А в схеме с общей базой (рис. 4.3) определить входное сопротивление переменному току, если известно, что ток эмиттера изменяется в пределах от 0,15 до 0,35 А.

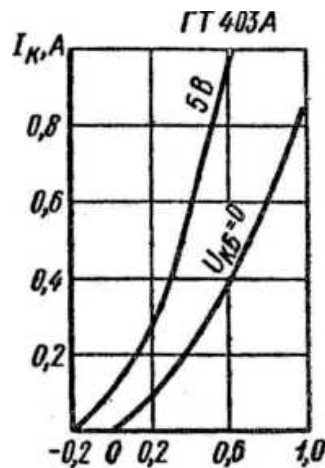


Рис. 4.3. Входная характеристика

7. Для транзистора ГТ403А, включенного по схеме с общим эмиттером, ток коллектора изменяется на 140 мА, а ток эмиттера – на 145 мА. Определить коэффициент усиления тока базы.

Ответ: $h_{21э} = 28$.

8. Для транзистора КТ315А, включенного по схеме с общим эмиттером, входное сопротивление переменному току $R_{вв} = 160$ Ом. Определить входное сопротивление транзистора в схеме с общей базой, если коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21б} = 0,96$.

Ответ: $R_{вх} = 6,7$ Ом.

5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФОРМУЛЫ

Полевой транзистор (ПТ) – полупроводниковый прибор, в котором регулирование тока осуществляется изменением сопротивления проводящего канала с помощью поперечного электрического поля. Ток полевого транзистора обусловлен потоком основных носителей (заряда одного типа – электронов или дырок).

Полевые транзисторы управляются электрическим полем (рис. 5.1). В основе управления током полевых транзисторов лежит изменение сопротивления канала, через который протекает этот ток под действием электрического поля. Главное достоинство полевых транзисторов – высокое входное сопротивление ($r_{вх}$).



Рис. 5.1. Полевые транзисторы с управляющим p-n и n-p переходом:

И – исток – электрод, от которого движутся носители заряда;

С – сток – электрод, к которому движутся носители заряда;

З – затвор – электрод, управляющий сечением канала,
а следовательно, и сопротивлением канала

Полевые транзисторы имеют три схемы включения: общий исток (ОИ); общий сток (ОС); общий затвор (ОЗ) (рис. 5.2). При использовании полевых транзисторов вывод подложки не влияет на определение схемы включения транзистора, но сильно определяет их свойства.

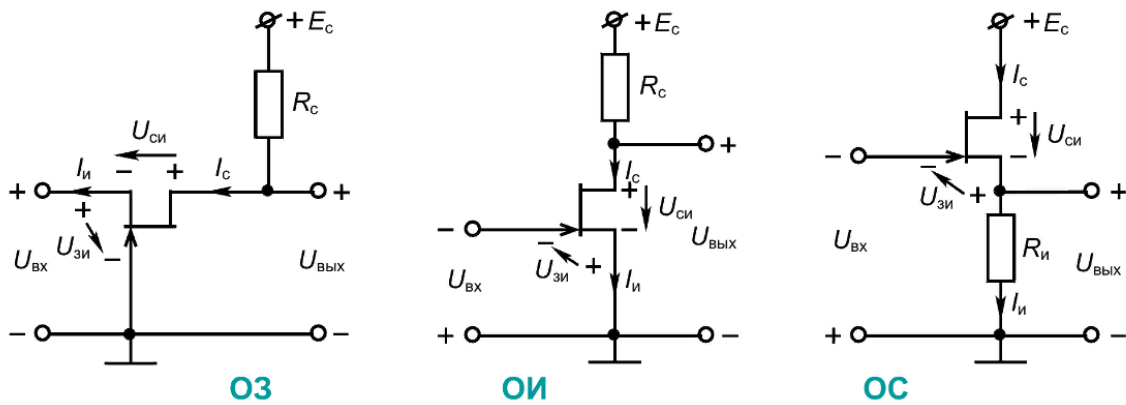


Рис. 5.2. Схемы включения полевого транзистора

Справочные данные основных характеристик:

1) $U_{зи0}$ – пороговое напряжение (напряжение запираения, напряжение отсечки) – напряжение, при котором ток I_c практически равен нулю – справочный параметр. $U_{зи0} = 0,8 \div 10\text{В}$.

2) $I_{c\max}(I_{c0})$ – максимальное значение тока стока, наблюдающееся при $U_{зи} = 0$ – справочный параметр (нормально открытый транзистор).

$$I_c = I_{c0} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}}\right)^2 ; U_{зи} = U_{зи0} \left(1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{c0}}}\right).$$

При $U_{зи} = 0$; $I_c = I_{c\max} = I_{c0}$.

Выражение используется для задания рабочей точки.

3) S – крутизна стоко-затворной характеристики – отражает влияние $U_{зи}$ на выходной ток I_c транзистора. $S = 0,3 \div 7 \text{ мА/В}$. Крутизна определяется по стоко-затворной характеристике (рис. 3.3) или аналитически:

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{зи}=\text{const}} = \frac{2I_{c0}}{U_{зи0}} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи0}}\right).$$

Максимальная крутизна $S_{\max} = S_0 = S_{\text{нач}}$ будет при $U_{зи} = 0$.

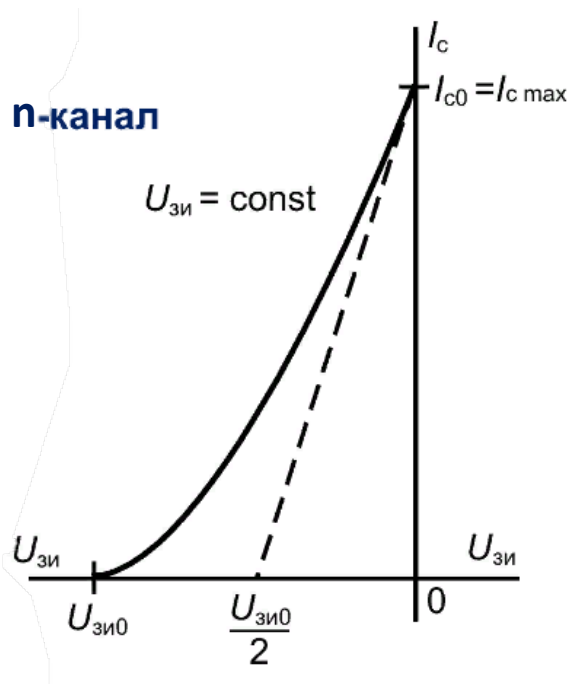


Рис. 5.3. ВАХ стоко-затворной характеристики

4) r_i – внутренне сопротивление показывает динамическое сопротивление канала – справочный параметр. $r_i = 0,02 \div 0,5$ МОм.

$$r_i = \left. \frac{dU_{си}}{dI_c} \right|_{U_{зи}=\text{const}} \cong \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи}=\text{const}}$$

5) $r_{вх}$ – входное сопротивление определяется сопротивлением обратно смещенных р-п-переходов. $r_{вх} = 10^8 \div 10^9$ Ом.

$$r_i = \left. \frac{dU_{зи}}{dI_3} \right|_{U_{си}=\text{const}}$$

6) $C_{зи}$, $C_{си}$, $C_{зс}$ – межэлектродные емкости, обусловленные в основном наличием р-п-переходов, примыкающих к истоку и к стоку. $C_{зи} = C_{си} = 6 \div 20$ пФ; $C_{зс} = 2 \div 8$ пФ.

5.1. Типовая задача с решением

Пример 5.1

Пусть дан полевой транзистор типа КП103, напряжение сток-исток $U_{си0} = 6$ В, $U_{зи0} = 4$ В. Определить крутизну характеристики S , внутреннее сопротивление R_i полевого транзистора и ток стока I_c по статическим характеристикам.

Решение

Приводим выходные характеристики. Для построения характеристики прямой передачи определяем ток стока при $U_{зи} = 0 \text{ В}, 0,5 \text{ В}$ и т. д. (рис. 5.4). Результаты заносим в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты определения тока стока

$U_{зи}, \text{ В}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4
$I_c, \text{ мА}$	4,08	3,13	2,31	1,6	1,05	0,61	0,3	0

По полученным результатам строим характеристику прямой передачи (рис. 5.5). Определяем крутизну и строим ее зависимость от напряжения на затворе. Для этого сначала находим крутизну при напряжении на затворе $U_{зи} = 0,25 \text{ В}$.

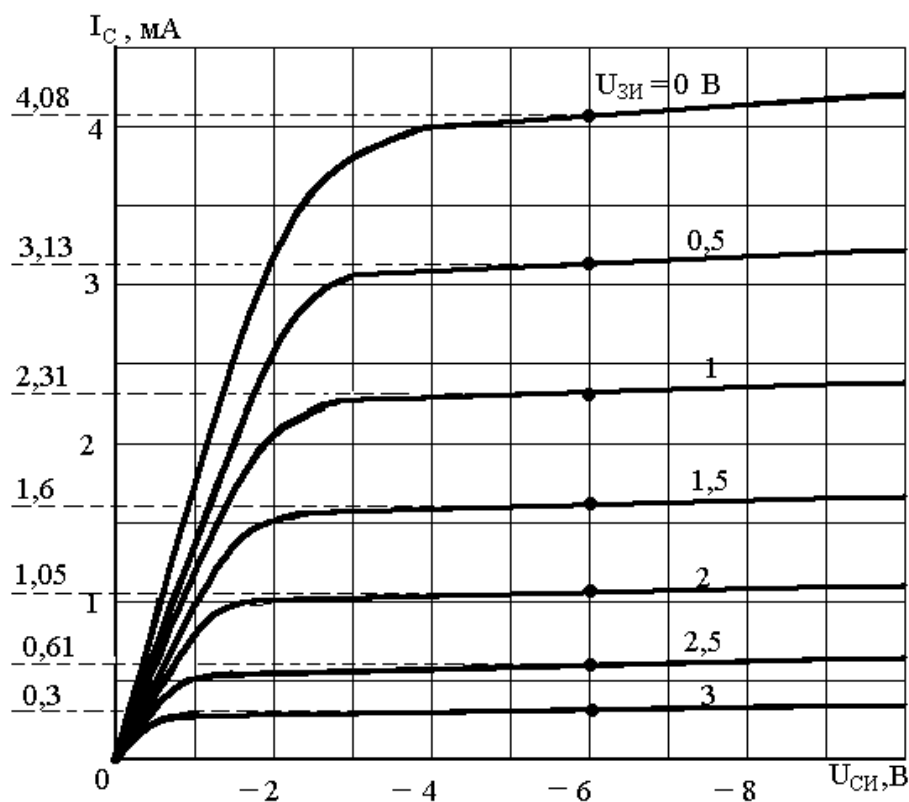


Рис. 5.4. ВАХ стоко-истоковой характеристики

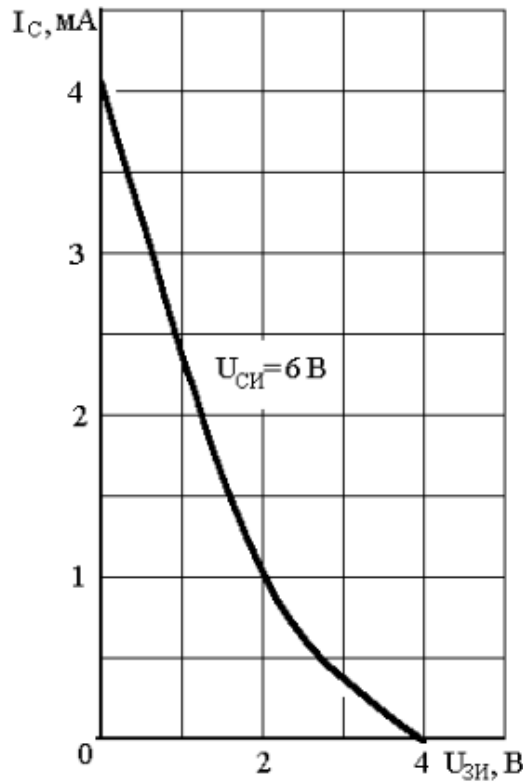


Рис. 5.5. ВАХ стоко-затворной характеристики

Определяем токи $I_{c1} = 4,08$ мА и $I_{c2} = 3,13$ мА при напряжениях $U_{зи1} = 0$ В и $U_{зи2} = 0,5$ В соответственно (рис. 5.4). Затем вычисляем крутизну:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{I_{c1} - I_{c2}}{U_{зи1} - U_{зи2}} = \frac{4,08 - 3,13}{0,5 - 0} = 1,96 \text{ мА/В.}$$

Аналогично проделываем эту операцию для $U_{зи} = 0,75$ В; 1,25 В и т. д. Результаты вычислений заносим в табл. 5.2 и строим график (рис. 5.6).

Таблица 5.2 – Результаты вычислений крутизны стоко-затворной характеристики

$U_{зи}, \text{В}$	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	4
$S, \text{мА/В}$	1,9	1,64	1,42	1,1	0,88	0,62	0

Для определения выходного сопротивления R_i задаемся приращением $\Delta U_{си} = \mp 2$ В относительно напряжения $U_{си} = 6$ В (рис. 5.7). Определяем приращение тока стока при напряжении на затворе 0 В, вычисляем значение $R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c}$. Результат заносим в табл. 5.3. Аналогично проделываем для $U_{зи} = 0,5$ В; 1 В и т. д. На рис. 5.6 строим зависимость $R_i = f(U_{си})$.

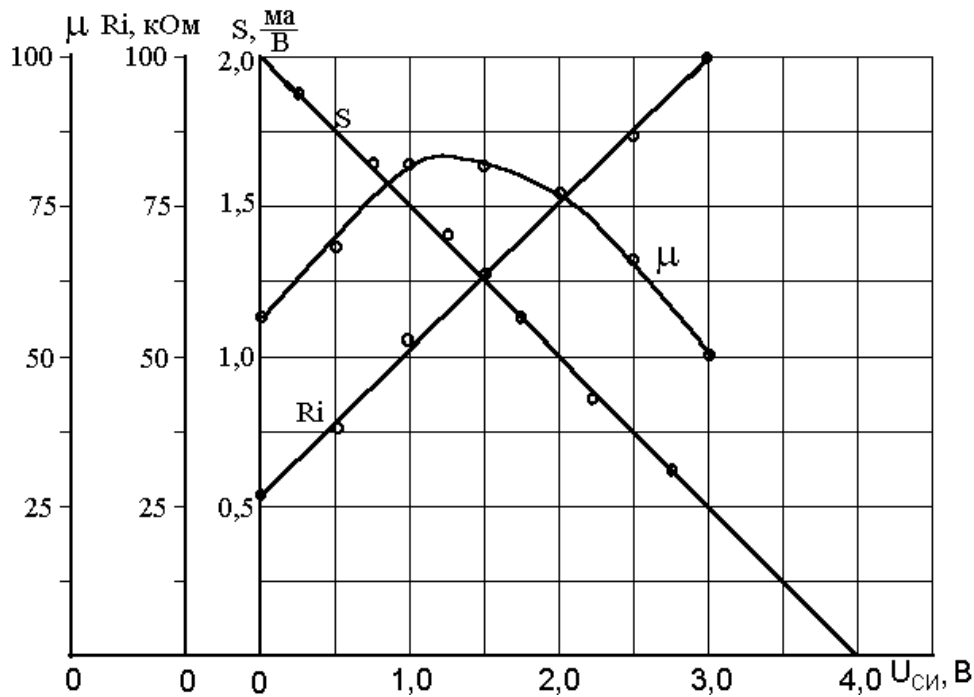


Рис. 5.6. График зависимости выходного сопротивления от $U_{си}$

Таблица 5.3 – Данные для расчета коэффициента усиления транзистора

$U_{зи}, В$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$\Delta I_c, мА$	0,14	0,1	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04
$R_i, кОм$	28	39,2	54,8	65,6	77	88,9	100
$S, мА/В$	2	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
μ	56	68,6	82,2	82	77	66,6	50

Из рис. 5.6 определяем значение крутизны для тех же величин, что и R_i . Результат заносим в табл. 5.3. В заключении определяем коэффициент усиления транзистора $\mu = S \cdot R_i$. Результат также заносим в табл. 5.3 и строим зависимость (рис. 5.7).

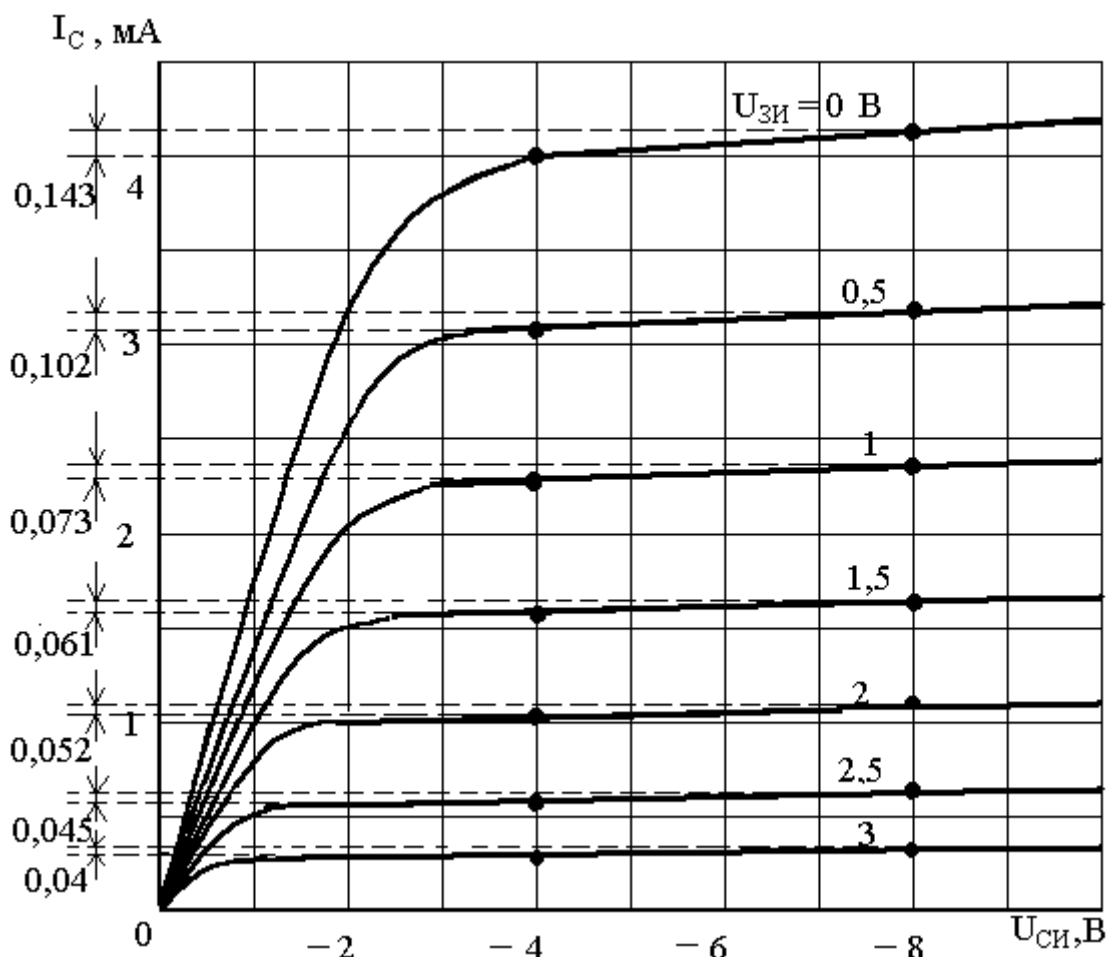


Рис. 5.7. График зависимости тока стока от $U_{си}$

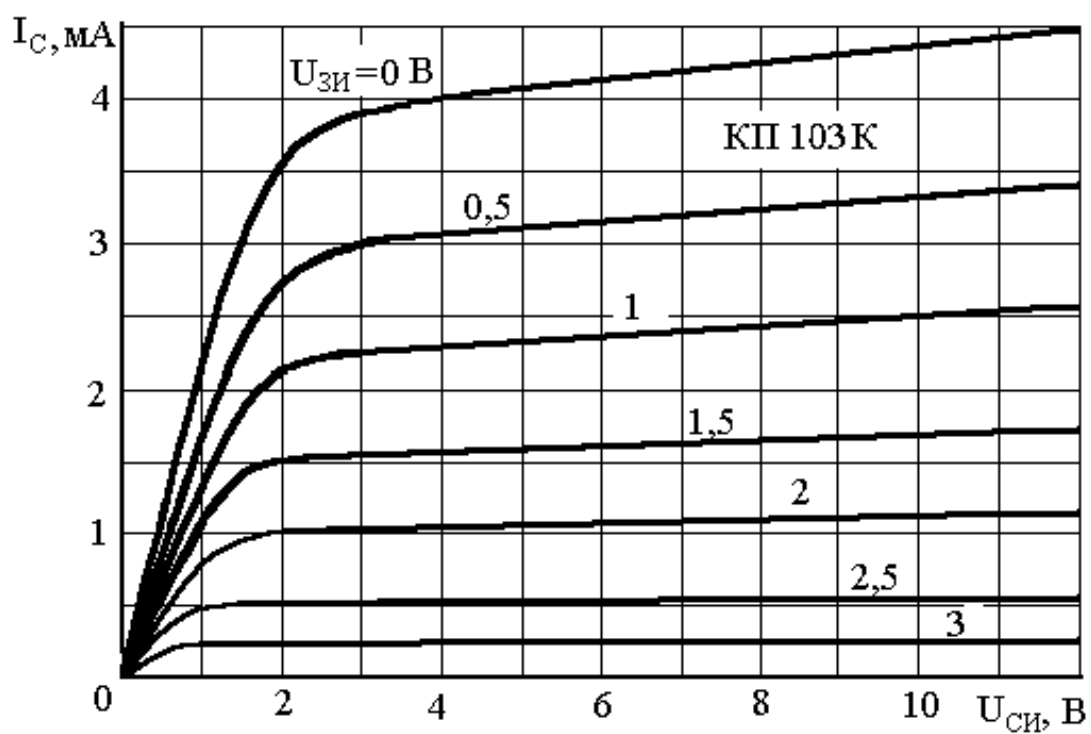
5.2. Задания для самостоятельного решения

Определить крутизну характеристики S , внутреннее сопротивление R_i полевого транзистора и ток стока I_c по статическим характеристикам при $U_{си} = 6 \text{ В}$, $U_{зи} = 4 \text{ В}$. Рассчитать коэффициент усиления $\mu = SR_i$.

Таблица 5.4 – Исходные данные

Вариант	Тип ПТ	$U_{си0}$, В	$U_{зи0}$, В
1	КП 103 К	7	4
2	КП 903 А	10	8
3	КП 103 К	8	4
4	КП 903 А	12	8
5	КП 103 К	9	4

Вариант	Тип ПТ	$U_{си0}$, В	$U_{зи0}$, В
6	КП 903 А	14	8
7	КП 103 К	10	4
8	КП 903 А	16	8
9	КП 103 К	11	4
10	КП 903 А	18	8

Рис. 5.8. График зависимости тока стока от $U_{си}$ для КП103К

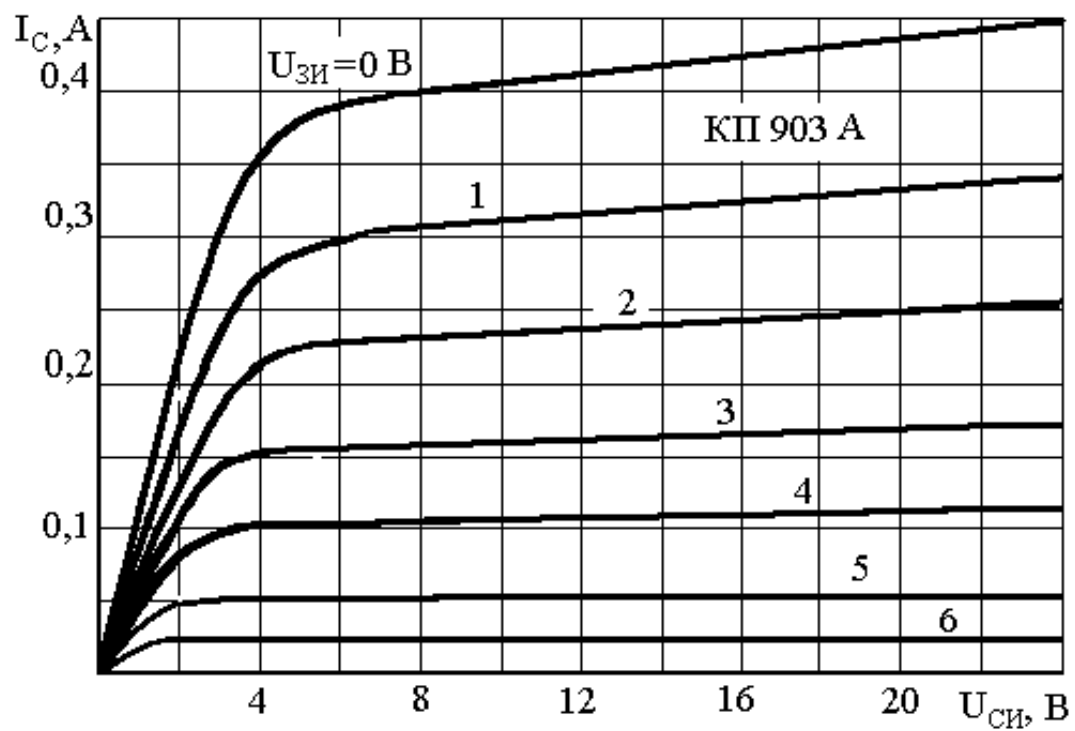


Рис. 5.9. График зависимости тока стока от U_{CE} для КП903А

6. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$; $U_{\text{ВХ}}$ – напряжения на выходе и входе усилителя.

Коэффициент усиления по напряжению, выраженный в децибелах:

$$K_u = 20 \lg K,$$

где K – коэффициент усиления в раз.

Коэффициент усиления – многокаскадного усилителя:

$$K = K_1, K_2 \dots K_n; \text{ или}$$

$$K_{\text{дБ}} = K_{1\text{дБ}} + K_{2\text{дБ}} + \dots + K_{n\text{дБ}},$$

где $K_1, K_2 \dots K_n$ – коэффициенты усиления отдельных каскадов, n – число каскадов в усилителе.

Коэффициент частотных искажений усилительного каскада:

$$M = \frac{K_0}{K},$$

где K_0 – коэффициент усиления на средних частотах; K – коэффициент усиления на какой-либо частоте рабочего диапазона.

Коэффициент частотных искажений, выраженный в децибелах:

$$M_{\text{дБ}} = 20 \lg M.$$

Коэффициент частотных искажений многокаскадного усилителя:

$$M_{\text{общ}} = M_1, M_2 \dots M_n, \text{ или}$$

$$M_{\text{общ дБ}} = M_{1\text{дБ}} + M_{2\text{дБ}} + \dots + M_{n\text{дБ}}.$$

Коэффициент усиления транзисторного каскада на средних частотах:

$$K_0 = \frac{h_{21э} R_H}{R_{\text{ВХ}}},$$

где $h_{21э}$ – статический коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером; R_H – сопротивление коллекторной нагрузки, Ом; $R_{\text{ВХ}}$ – входное сопротивление транзистора, Ом.

Электрический КПД усилителя:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_0},$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – выходная мощность усилителя; P_0 – мощность, расходуемая источником коллекторного (анодного) питания.

Мощность, выделяемая в нагрузке:

$$P_H = \eta_T \cdot P_{\text{РВЫХ}},$$

где η_T – КПД выходного трансформатора; $P_{\text{ВЫХ}}$ – мощность, отдаваемая транзистором.

Сопротивление нагрузки, пересчитанное в первичную обмотку трансформатора (приведенное сопротивление):

$$R'_H = \frac{R_n}{n^2},$$

где R_n – сопротивление нагрузки; n – коэффициент трансформации выходного трансформатора.

Коэффициент усиления каскада, охваченного отрицательной обратной связью:

$$K_0^* = \frac{K_0}{1 + K_{oc}K_0},$$

где K_0 – коэффициент усиления каскада до введения ООС; K_{oc} – коэффициент обратной связи.

6.1. Типовые задачи с решениями

Пример 6.1

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения для схемы с общим эмиттером:

$$U_{\text{выхт}} = 4 \text{ В}; R_H = 500 \text{ Ом}; f_H = 100 \text{ Гц}; M_H = 1,2; E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}.$$

Решение

$$U_{\text{кэ доп}} \geq M_H \cdot E_{\text{пит}} = 1,2 \cdot 12 = 14,4 \text{ В}.$$

$$I_{\text{к доп}} > 2I_{\text{нт}} = 2 \frac{U_{\text{выхт}}}{R_H} = 2 \frac{4}{500} = 0,016 \text{ А} = 16 \text{ мА}.$$

Выбираем транзистор МП42А, для которого $I_{\text{к доп}} = 30 \text{ мА}$;

$$U_{\text{кэ доп}} = 15 \text{ В}; \beta_{\text{min}} = 30, \beta_{\text{max}} = 50, I_{\text{к min доп}} = 25 \text{ мкА}.$$

Для построения нагрузочной прямой находим (рабочую) точку покоя (0); для этого определяем:

$$I_{\text{к0}} = 1,2I_{\text{нт}} = 1,2 \cdot \frac{16}{2} = 9,6 \text{ А};$$

$$U_{\text{кэ0}} = U_{\text{выхт}} + \Delta U_{\text{кэ}} = 4 + 1 = 5 \text{ В}.$$

Вторая точка нагрузочной прямой $U_{\text{кэ}} = E_{\text{пит}} = 12 \text{ В}$. По полученным значениям строится нагрузочная прямая.

По статическим выходным характеристикам и нагрузочной прямой находим $I = 18 \text{ мА}$, откуда

$$R_{об} = 12 / (18 \cdot 10^{-3}) = 670 \text{ Ом};$$

$$R_k = R_{об} / 1,2 = 670 / 1,2 = 560 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_{об} - R_H = 670 - 560 = 110 \text{ Ом}.$$

Наименьший коэффициент усиления по току (для схемы ОЭ) для транзистора МП42А $\beta_{min} = 30$, тогда $I_{вх min} = I_{б min} = I_{к min}$. Из-за малого значения $I_{к min}$ можно принять $I_{к min} \approx 0$ и, следовательно, $I_{б min} \approx 0$.

$$I_{бm} = I_{км} / \beta_{min} = 14 / 30 = 0,47 \text{ мА}.$$

Амплитуда входного тока:

$$I_{бm} = I_{бmax} - I_{бmin} / 2 = 0,47 / 2 = 0,235 \text{ мА}.$$

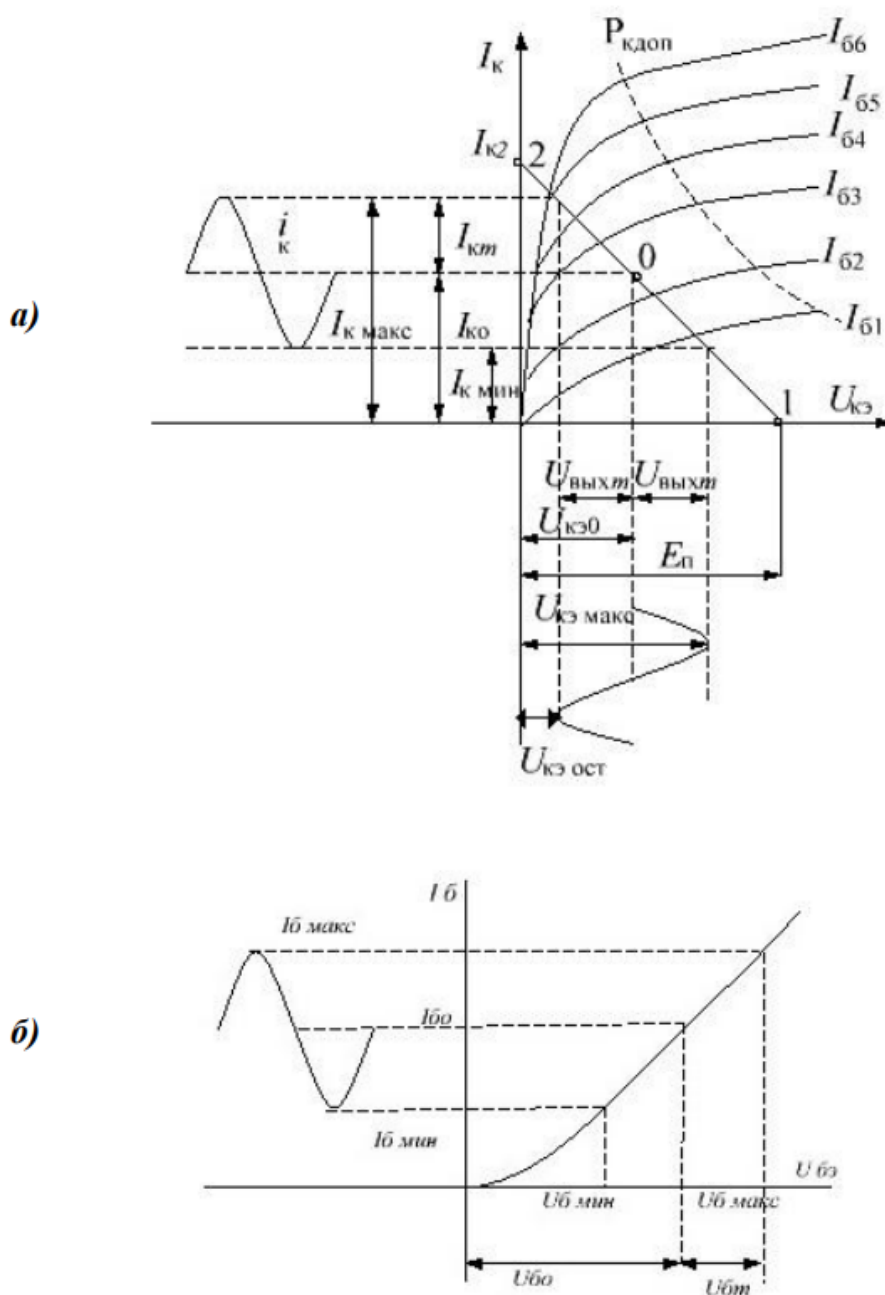


Рис. 6.1. Выходные (а) и входные (б) характеристики транзистора

По входной статической характеристике (для схемы ОЭ):

$$U_{бэmin} = 0,11 \text{ В}; U_{бэmax} = 0,33 \text{ В}; 2U_{вхт} = U_{бэmax} - U_{бэmin} = 0,33 - 0,11 = 0,22 \text{ В}.$$

Находим входное сопротивление транзистора переменному току:

$$R_{вх} \cong 2U_{вхт}/2I_{бт} = \frac{0,22}{0,47 \cdot 10^{-3}} \approx 470 \text{ Ом}.$$

Для определения R_1 и R_2 находим $R_{1-2} \geq 8R_{вх} \sim = 8 \cdot 470 \approx 3800 \text{ Ом}$.

Отсюда:

$$R_1 = \frac{E_{п} R_{1-2}}{R_3 I_{к0}} = \frac{12 \cdot 3800}{110 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3}} = 43000 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_{1-2}}{(R_1 - R_{1-2})} = \frac{43000 \cdot 3800}{(43000 - 3800)} = 4200 \text{ Ом}.$$

Определяем, будет ли схема достаточно стабильна:

$$S = \frac{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_3(R_1 + R_2) + R_1 R_2 / (1 + \beta_{max})} =$$

$$= \frac{110(43000 + 4200) + 43000 \cdot 4200}{110(43000 + 4200) + 43000 \cdot 4200 / (1 + 50)} \approx 2,66.$$

Следовательно, работа рассчитанного каскада достаточно стабильна.

Определяем емкость:

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H (R_k + R_H) \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{1}{1 \cdot 3,14 \cdot 100(560 + 500) \cdot \sqrt{1,2^2 - 1}} =$$

$$= 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Принимаем $C_p = 3,0 \text{ мкФ}$.

Находим емкость:

$$C_3 \geq \frac{10}{2\pi f_H R_3} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 110} = 159 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 159 \text{ мкФ}.$$

Для полного устранения отрицательной обратной связи необходимо включить $C_3 \geq 159 \text{ мкФ}$. Эта емкость слишком велика. Обычно используют $C_3 = 10 \div 30 \text{ мкФ}$. Принимаем $C_H = 20 \text{ мкФ}$.

Коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_u = U_{выхт}/U_{вхт} = 4/0,11 = 36,4.$$

6.2. Задача для самостоятельного решения

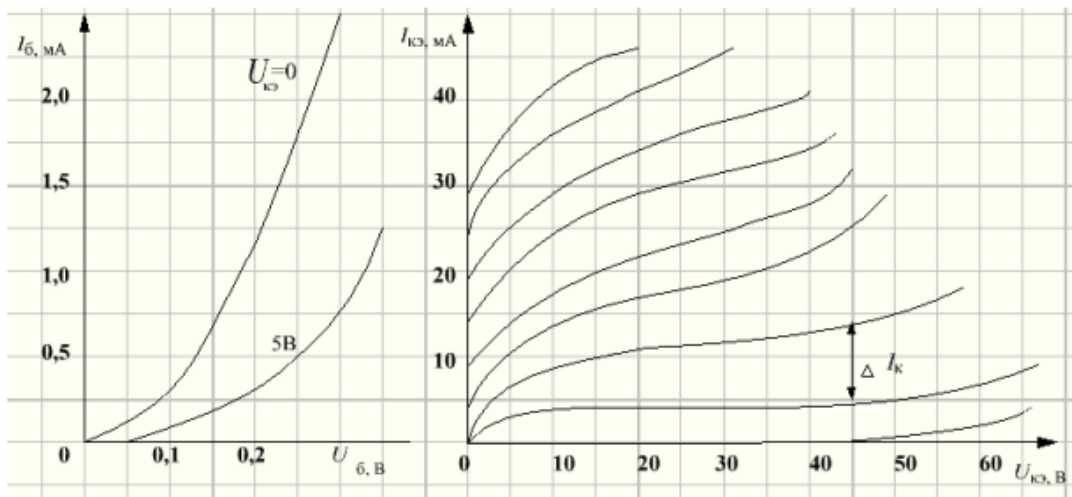
Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения и определить h -параметры выбранного типа транзистора. Данные для расчета приведены в табл. 6.2 и 6.3, а также рисунки 6.2 – 6.7.

Таблица 6.2 – Исходные данные

Номер варианта	Данные для расчета				
	$U_{\text{вых } m}, \text{ В}$	$R_{\text{н}}, \text{ Ом}$	$f_{\text{н}}, \text{ Гц}$	$E_{\text{пит}}, \text{ В}$	$M_{\text{н}}$
0	3,0	600	100	12	1,20
1	2,0	400	90	16	1,20
2	1,0	250	120	9	1,25
3	5,0	450	200	27	1,30
4	8,0	350	150	12	1,30
5	2,4	600	180	3	1,25
6	3,4	550	140	12	1,25
7	1,6	280	160	6	1,20
8	4,0	590	170	17	1,20
9	2,2	440	110	9	1,40
10	3,4	600	150	12	1,40
11	1,5	200	60	3	1,30
12	1,7	250	70	6	1,30
13	1,8	300	80	9	1,30
14	2,0	350	90	12	1,20
15	2,1	400	120	15	1,20
16	2,3	450	140	18	1,20
17	2,5	480	150	24	1,40
18	2,7	500	160	27	1,40
19	2,8	520	170	24	1,40
20	3,0	540	180	20	1,35
21	3,1	550	200	18	1,35
22	3,2	580	220	15	1,25
23	3,5	560	230	12	1,25
24	3,6	480	250	9	1,20
25	1,8	320	270	6	1,30

Окончание табл. 6.2

Номер варианта	Данные для расчета	Номер варианта	Данные для расчета	Номер варианта	Данные для расчета
	$U_{\text{вых } m}, \text{ В}$		$U_{\text{вых } m}, \text{ В}$		$U_{\text{вых } m}, \text{ В}$
26	3,0	600	300	15	1,20
27	4,0	500	200	12	1,30
28	5,0	520	250	10	1,30
29	6,5	640	280	18	1,25
30	2,5	480	300	16	1,25
31	4,5	350	230	15	1,40
32	5,0	450	270	20	1,50
33	5,0	430	350	9	1,50
34	6,0	420	250	12	1,40
35	6,0	560	150	24	1,40
36	5,5	480	170	27	1,30
37	4,0	550	190	15	1,20
38	4,0	450	200	18	1,25
39	2,5	350	220	10	1,25
40	3,0	420	230	12	1,40

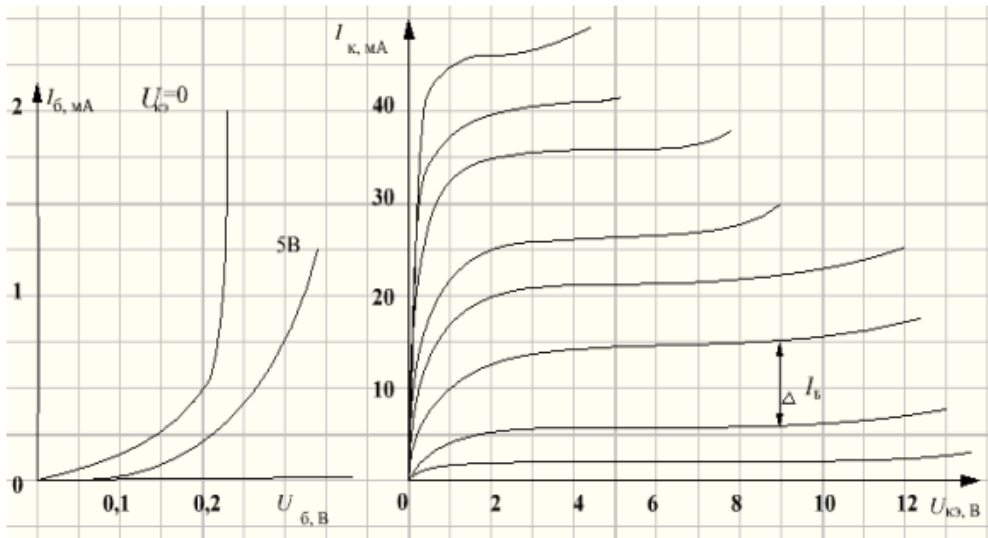


МП 20А, МП 20Г, МП 21Е - $\Delta I_{\text{б}} = 50 \text{ мкА}$

МП 20Б, МП 20Д, МП 21Д - $\Delta I_{\text{б}} = 40 \text{ мкА}$

МП 20В, МП 21Д - $\Delta I_{\text{б}} = 100 \text{ мкА}$

Рис. 6.2. Входные и выходные характеристики транзисторов

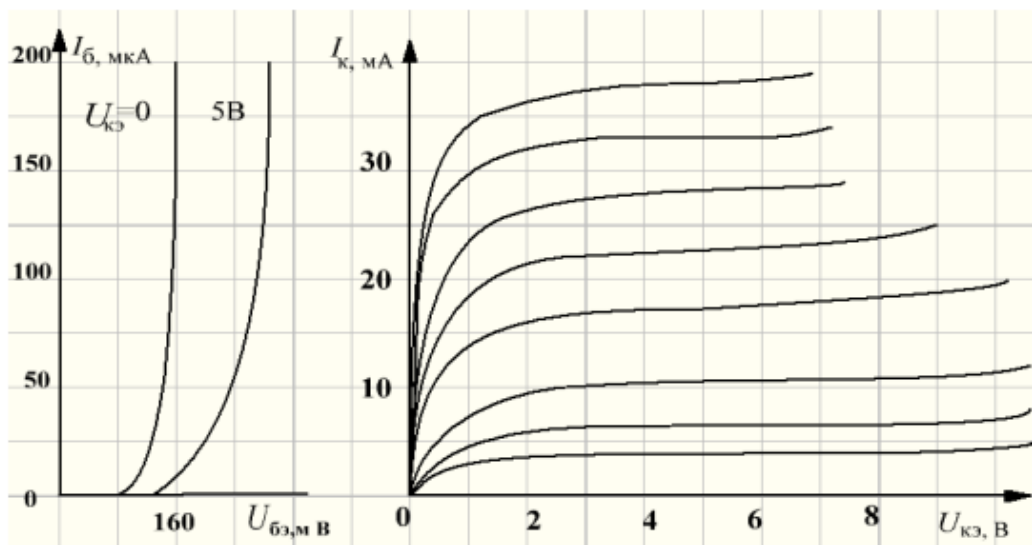


МП 39 - $\Delta I_B = 400$ мкА;

МП 39Б, МП 40А, МП 41 - $\Delta I_B = 200$ мкА;

МП 41А - $\Delta I_B = 100$ мкА

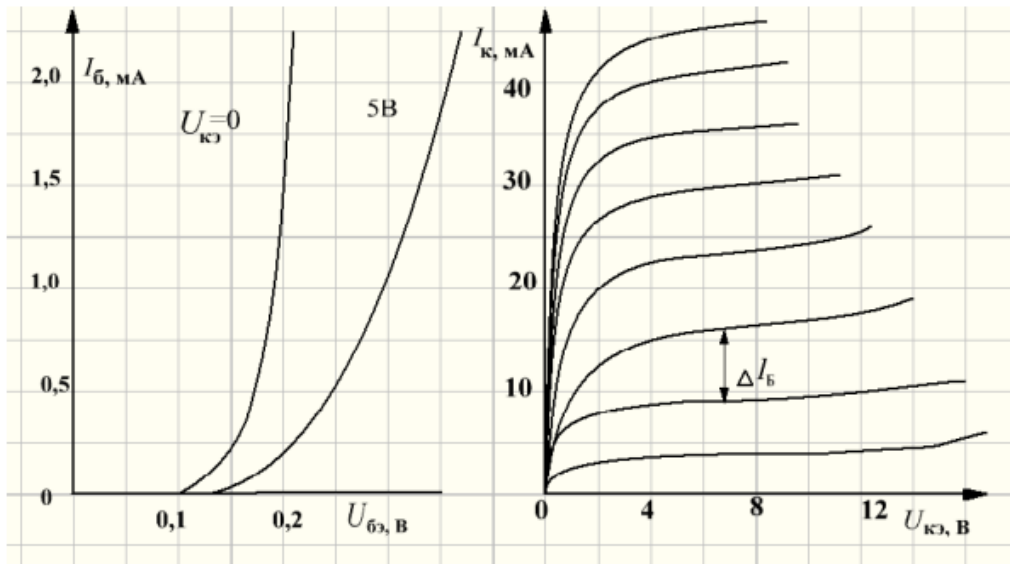
Рис. 6.3. Входные и выходные характеристики транзисторов



ГТ 108А, ГТ 108Б - $\Delta I_B = 100$ мкА;

ГТ 108В, ГТ 108Г - $\Delta I_B = 50$ мкА

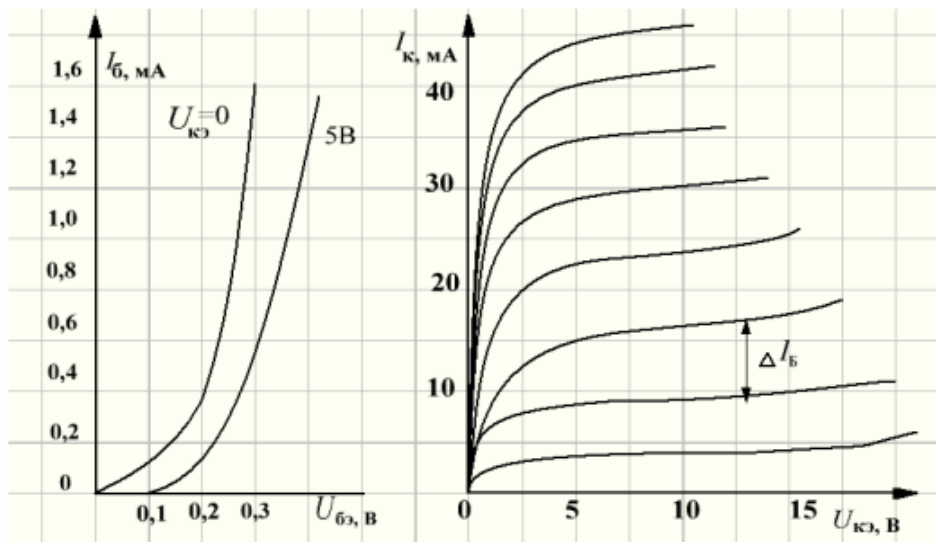
Рис. 6.4. Входные и выходные характеристики транзисторов



МП 42, МП 42А - $\Delta I_{\text{б}} = 150 \text{ мкА}$;

МП 42Б - $\Delta I_{\text{б}} = 100 \text{ мкА}$

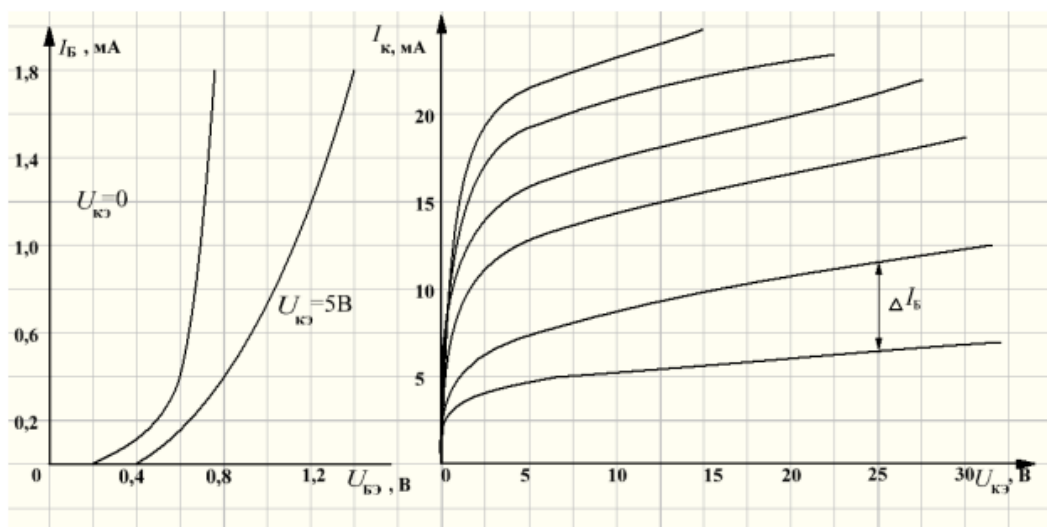
Рис. 6.5. Входные и выходные характеристики транзисторов



МП 35, МП 36А, МП 37В, МП 38 - $\Delta I_{\text{б}} = 200 \text{ мкА}$

МП 37, МП 37А - $\Delta I_{\text{б}} = 300 \text{ мкА}$, МП 38А - $\Delta I_{\text{б}} = 50 \text{ мкА}$

Рис. 6.6. Входные и выходные характеристики транзисторов



МП 114, МП 115 - $\Delta I_B = 0,3 \text{ mA}$;

МП 116 - $\Delta I_B = 0,25 \text{ mA}$

Рис. 6.7. Входные и выходные характеристики транзисторов

Таблица 6.3 – Максимально допустимые параметры транзисторов

Тип транзистора	Коэффициент усиления по току β	Максимально допустимые параметры		
		$I_{K \text{ доп}}, \text{ mA}$	$U_{KЭ \text{ доп}}, \text{ B}$	Рассеиваемая мощность коллектора $P_K, \text{ мВт}$
МП 20 А	105	45	20	150
МП 20 Б	125			
МП 20 В	60			
МП 20 Г	105			
МП 20 Д	125			
МП 21 В	60			
МП 21 Г	60			
МП 21 Д	125			
МП 21 Е	105			
МП 35	13			
МП 36 А	15			
МП 37 А	15			
МП 37 Б	25			
МП 38	25			
МП 38 А	45			

Окончание табл. 6.3

Тип транзистора	Коэффициент усиления по току β	Максимально допустимые параметры		
		$I_{К доп}$, мА		
МП 39	12	20	15	150
МП 39 Б	20			
МП 40	20			
МП 40 А	20			
МП 41	30			
МП 41 А	50			
МП 42	20	45	15	200
МП 42 А	30			
МП 42 Б	45			
ГТ 108 А	20	50	18	75
ГТ 108 Б	35			
ГТ 108 В	60			
ГТ 108 Г	110			
МП 114	9	10	60	150
МП 115	9		30	
МП 116	15		15	

7. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМУЛЫ

Операционным усилителем называют усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и однотактным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления.

Усилитель постоянного тока (УПТ) – электронный усилитель, рабочий диапазон частот которого включает нулевую частоту (постоянный ток).

ОУ предназначен для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: усиление и ослабление, сложение и вычитание, интегрирование и дифференцирование, логарифмирование и потенцирование, фильтрация и другие.

Идеальный ОУ обладает следующими свойствами:

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения нуля на входе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- выходное сопротивление ОУ равно нулю.

К основным характеристикам ОУ относят:

- коэффициент усиления дифференциальной составляющей входного сигнала – $K_U \geq 5,104$
- коэффициент ослабления синфазной составляющей входного сигнала – K_{OC} не менее 65 дБ;
- входной средний ток – $I_{вх\ ср} < 0,15$ нА;
- ток, потребляемый от источников питания – $I_{п} \leq 3,5$ мА;
- максимальная рабочая частота – не менее 1 МГц;
- напряжение питания – $U_{п} = \pm 15$ В;
- максимальный выходной сигнал – $U_{вых. max} = \pm 10$ В;
- ток смещения менее 50 пА.



Рис. 7.1. Структурная схема операционного усилителя

Структурная схема ОУ приведена на рис. 7.1. Первый блок (1) – дифференциальный усилительный каскад, у ОУ имеются два входа: инвертирующий, обозначается знаком (o) или знаком (-), и не инвертирующий, не отмечается или около него ставят (+). Входные сигналы

можно подавать на любой из двух входов.

Второй блок ОУ (2) – усилительный каскад с большим коэффициентом усиления, охваченный емкостной отрицательной обратной связью с целью коррекции частотной характеристики ОУ. На выходе используется усилительный каскад с малым выходным сопротивлением (3). При подаче на инвертирующий и не инвертирующий входы одинаковых сигналов сигнал на выходе будет близок к нулю (в этом состоит смысл подавления синфазной составляющей). Разность сигналов, подаваемых на входы (дифференциальная составляющая) будет усиливаться в десятки и сотни тысяч раз.

На рис. 7.2 и 7.3 показаны обычно применяемые условные графические обозначения ОУ. Здесь показаны два дополнительных вывода ОУ, которые используются для подачи напряжения питания $U_{п+}$ и $U_{п-}$, иногда эти выводы обозначаются как $E_{п+}$ и $E_{п-}$. Двухполярное напряжение питания используется для обеспечения работы ОУ как с положительными, так и с отрицательными сигналами. Оба напряжения обычно имеют одинаковые по модулю значения, а их общий вывод одновременно является общим выводом для входных и выходных сигналов.

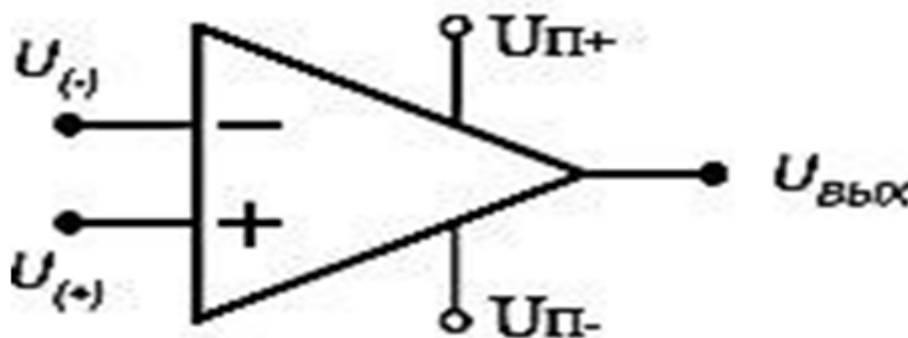


Рис. 7.2. Условное обозначение ОУ

(-) – инвертирующий вход ОУ; (+) – не инвертирующий вход ОУ; $U_{(-)}$ – напряжение на инвертирующем входе; $U_{(+)}$ – напряжение на не инвертирующем входе; $U_{вых}$ – выходное напряжение ОУ; $U_{п+}$ – положительное напряжение питания ОУ; $U_{п-}$ – отрицательное напряжение питания

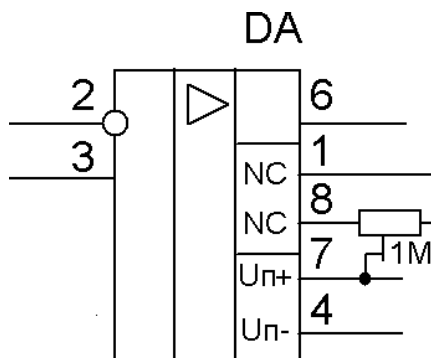


Рис. 7.3. Условное обозначение ОУ по ГОСТ

Модель идеального ОУ может успешно применяться для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ в различных режимах.

Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -A (U_{(-)} - U_{(+)}) = -A \Delta U,$$

где A – коэффициент передачи по напряжению усилителя, не охваченного обратной связью; $U_{(-)}$ – напряжение на инвертирующем входе; $U_{(+)}$ – напряжение на неинвертирующем входе. Следует отметить, что A зависит от частоты, как правило, уменьшается с ростом частоты.

Знак минус перед коэффициентом передачи A показывает, что выходное напряжение отрицательно для $\Delta U > 0$. Коэффициент передачи A можно определить, как отношение величины выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ к разности значений входных напряжений ΔU . Коэффициент передачи реальных ОУ на постоянном токе колеблется в пределах от 10 000 до 2 000 000.

Большинство ОУ имеют биполярный выход. Это означает, что выходной сигнал может иметь как положительную, так и отрицательную полярность. Поэтому для нормальной работы ОУ требуются два источника питания.

Выходное напряжение никогда не может превысить напряжение питания ($U_{\text{п-}} < U_{\text{ВЫХ}} < U_{\text{п+}}$). Как правило, максимальное выходное напряжение ОУ на доли вольта меньше напряжения питания. Это ограничение известно как напряжение ограничения (положительное $U_{\text{огр+}}$ и отрицательное $U_{\text{огр-}}$).

Для пояснения назначения выводов на рис. 7.4 приведена типовая схема на операционном усилителе – схема инвертирующего усилителя.

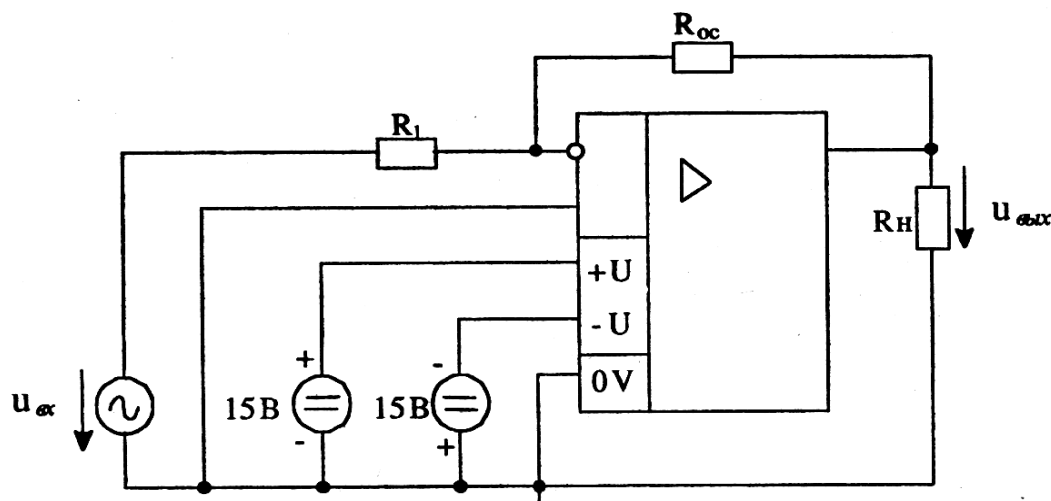


Рис. 7.4. Инвертирующий усилитель на основе операционного усилителя

Если входное напряжение $U_{\text{ВХ}}$ достаточно мало по модулю, то выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}.$$

Часто на схемах выводы + U, - U, и 0V не указывают (но подразумевают) и используют упрощенное условное графическое обозначение. При этом приведенная на рис. 7.4 типичная схема приобретает упрощенный вид (рис. 7.5)

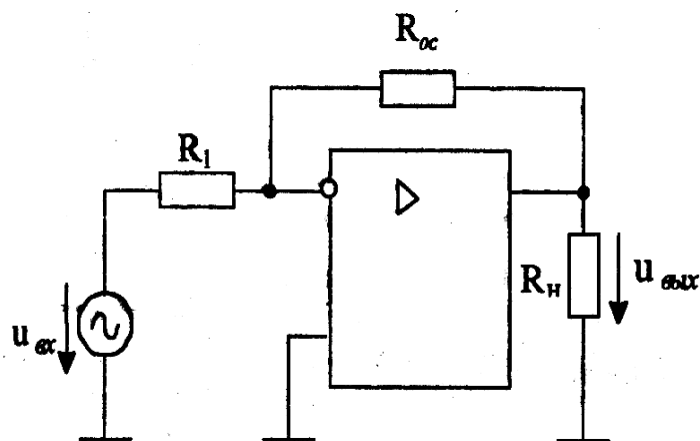


Рис. 7.5. Упрощенный вид инвертирующего усилителя на основе ОУ

Обозначим напряжения на выводах операционного усилителя (рис. 7.6).

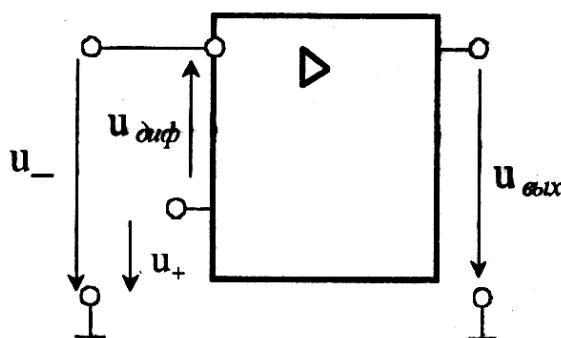


Рис. 7.6. Упрощенный вид инвертирующего усилителя на основе ОУ с напряжением на его выводах

Напряжение $U_{\text{диф}}$ между инвертирующим и неинвертирующим входами называют дифференциальным напряжением (дифференциальным сигналом). Ясно, что $U_{\text{диф}} = U_+ - U_-$. Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы они как можно больше изменяли напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ при изменении

дифференциального сигнала (т. е. разности $U_+ - U_-$) и как можно меньше изменяли напряжение $U_{\text{вых}}$ при одинаковом изменении напряжений U_+ и U_- .

Пусть $U_{\text{диф}} = 0$. Обозначим синфазное напряжение (синфазный сигнал) $U_{\text{сф}} \equiv U_+ = U_-$. Операционные усилители конструируют таким образом, чтобы влияние синфазного сигнала на выходное напряжение было как можно меньше.

Операционный усилитель хорошо характеризует его передаточная характеристика – зависимость вида:

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{диф}}),$$

где f – некоторая функция.

График этой зависимости для операционного усилителя К140УД1Б приведен на рис. 7.7. Эта конкретная характеристика не проходит через начало координат. Значение напряжения $U_{\text{диф}}$, при котором выполняется условие $U_{\text{вых}} = 0$, называют напряжением смещения нуля и обозначают через $U_{\text{см}}$. Для операционного усилителя типа К140УД1 известно, что напряжение $U_{\text{см}}$ лежит в диапазоне от -10 мВ до $+10$ мВ. А это означает, что при нулевом напряжении $U_{\text{диф}}$ напряжение $U_{\text{вых}}$ может лежать в пределах от минимально возможного (около -7 В) до максимально возможного (около $+10$ В).

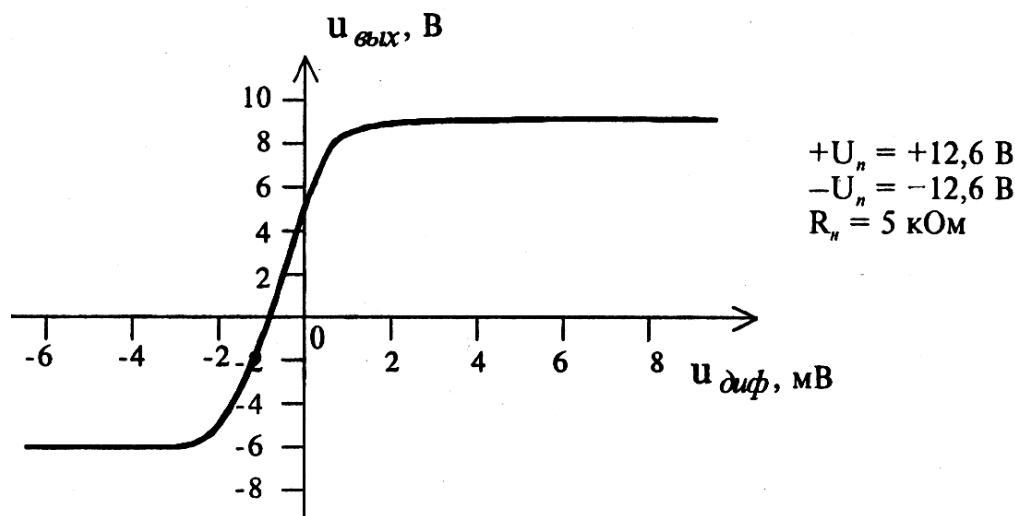


Рис. 7.7. Передаточная характеристика операционного усилителя К140УД1Б

7.1. Типовая задача с решением

Пример 7.1

На основе заданного операционного усилителя КР140УД11 разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления $K_u = 20$ и минимальным входным напряжением $U_{\text{вх min}} = 10$ мВ.

Параметры операционного усилителя КР140УД11 (аналог LM318N8):

– номинальное напряжение питания $U_{\text{пит ном}} = \pm 15$ В;

- коэффициент усиления $K_u \text{ ОУ} = 30000$;
- максимально допустимое выходное напряжение $U_{\text{вых max}} = 12 \text{ В}$;
- разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}} = 0,2 \text{ мкА}$;
- входное сопротивление $R_{\text{вх}} = 0,4 \text{ МОм}$;
- минимальное сопротивление нагрузки $R_{\text{н min}} = 2 \text{ кОм}$.

Разработанная схема инвертирующего усилителя низкой частоты приведена на рис. 7.2 (цепи балансировки нуля – НС и частотной коррекции – FC не используются).

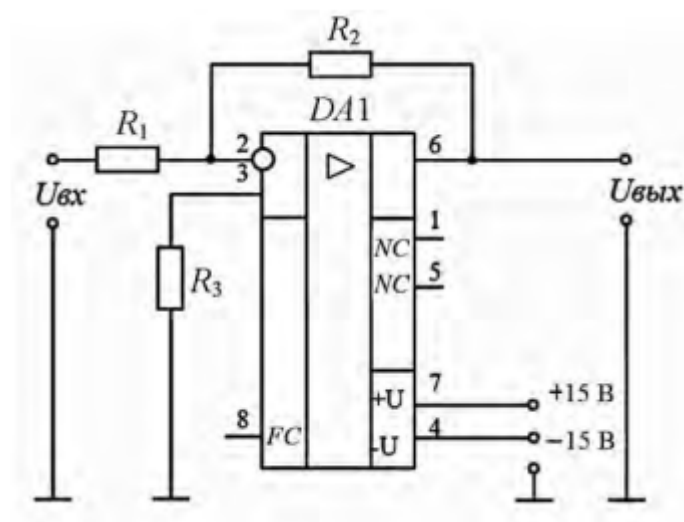


Рис. 7.2 Схема инвертирующего усилителя низкой частоты

Решение

Для инвертирующего усилителя на операционном усилителе входное сопротивление $R_{\text{вх}} = R_1$. Чтобы не загружать источники сигнала, величину R_1 желательно иметь большой. Но падение напряжения на R_1 от разностного тока $\Delta I_{\text{вх}}$ воспринимается усилителем как сигнал. Чтобы отстроить эту помеху от полезного сигнала, надо иметь $\Delta I_{\text{вх}} \cdot R_1$ значительно меньше, чем $U_{\text{вх min}}$.

$$\frac{U_{\text{вх min}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 50 \text{ кОм} \gg R_1.$$

Принимаем из стандартного ряда E24 $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$, тогда:

$$\Delta I_{\text{вх}} \cdot R_1 = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5,1 \cdot 10^3 = 1 \text{ мВ} \ll U_{\text{вх min}} = 10 \text{ мВ}.$$

Сопротивление обратной связи:

$$R_2 = K_u \cdot R_1 = 20 \cdot 5,1 \cdot 10^3 = 102 \text{ кОм}.$$

Принимаем $R_2 = 100 \text{ кОм}$.

Для уравнивания входных токов ОУ по обоим входам в цепь неинвертирующего входа включают резистор R_3 :

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5,1 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3}{5,1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = 4,85 \text{ кОм.}$$

Принимаем $R_3 = 4,7 \text{ кОм.}$

Амплитуда выходного сигнала не может быть больше максимального выходного напряжения (для данного типа ОУ – 12 В). Поэтому действующее значение максимального входного синусоидального сигнала составит:

$$U_{\text{вх max}} = \frac{U_{\text{вых max}}}{\sqrt{2} \cdot K_u} = \frac{12}{\sqrt{2} \cdot 20} = 0,42 \text{ В.}$$

7.2. Задачи для самостоятельного решения

Расчет инвертирующего усилителя низкой частоты на базе операционного усилителя. На основе заданного операционного усилителя разработать схему инвертирующего усилителя низкой частоты с коэффициентом усиления K_u и минимальным входным напряжением $U_{\text{вх min}}$. Исходные данные приведены в табл. 7.1. Определить максимальное входное напряжение синусоидального сигнала $U_{\text{вх max}}$, при котором не будет значительных искажений выходного сигнала.

Таблица 7.1 – Исходные данные

Номер варианта	Тип операционного усилителя	K_u
1	КР140УД7	10
2	КР140УД11	12
3	КР140УД14	14
4	КР1408УД1	16
5	КР140УД18	18
6	К140УД10	20
7	КР140УД7	22
8	КР140УД11	24
9	КР140УД14	26
10	КР1408УД1	28
11	КР140УД18	30
12	К140УД10	32

Окончание табл. 7.1

Номер варианта	Тип операционного усилителя	K_u
13	КР140УД7	34
14	КР140УД11	36
15	КР140УД14	38
16	КР1408УД1	40
17	КР140УД18	42
18	К140УД10	44
19	КР140УД7	46
20	КР140УД11	48
21	КР140УД14	50
22	КР1408УД1	52
23	КР140УД18	54
24	К140УД10	56
25	КР140УД7	58

Числовой ряд сопротивлений резисторов и конденсаторов

Числовой ряд E24, применяемый для присвоения номинальных значений сопротивлений резисторов:

(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) · 10ⁿ, где $n = -2; -1; 0; 1; 2$; и т. д.

8. ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА

Импульсная и цифровая техника использует импульсный режим работы, при котором кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой.

На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения, на ней основана цифровая вычислительная техника.

В состав многих импульсных устройств входят электронные ключи, основу которых составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор), работающий в режиме ключа. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено», «Выключено».

В реальных ключах токи и уровни $U_{\text{ВЫХ}}$ зависят от типа и параметров активных элементов. Ключи могут собираться на диодах и на транзисторах.

Ключевая схема на биполярном транзисторе показана на рис. 8.1.

Транзистор выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором R_k и источником питания E_k . Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Состояние ключа, т. е. открыт он или закрыт, определяется по выходной характеристике транзистора (рис. 8.2).

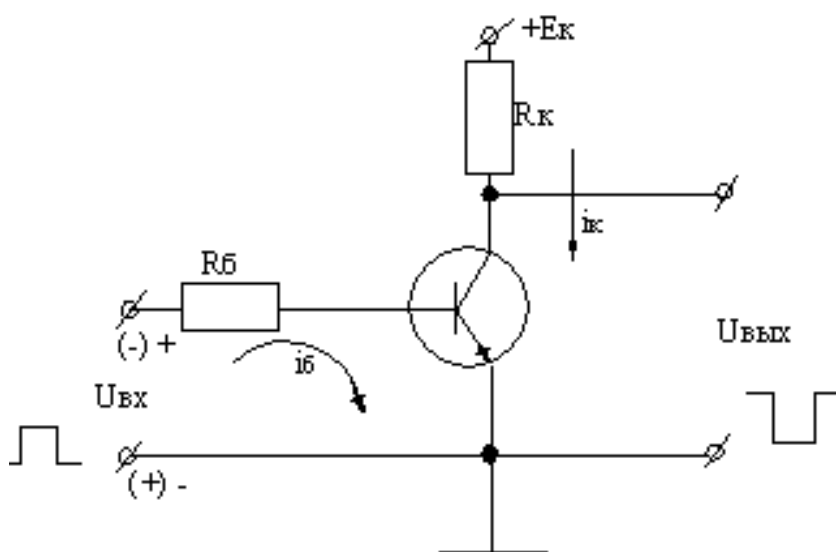


Рис. 8.1. Ключевая схема на биполярном транзисторе

Первое состояние определяет точка А1 на линии нагрузки, которая строится так же, как и для усилительного каскада. Это состояние называют режимом отсечки, который осуществляется подачей на его вход напряжения отрицательной полярности, т.е. при отрицательных потенциалах базы. При токе $I_b = 0$, транзистор закрыт, коллекторный ток $I_{к1}$ равен начальному коллекторному току, а напряжение $U_k = U_{к1} \approx E_k$.

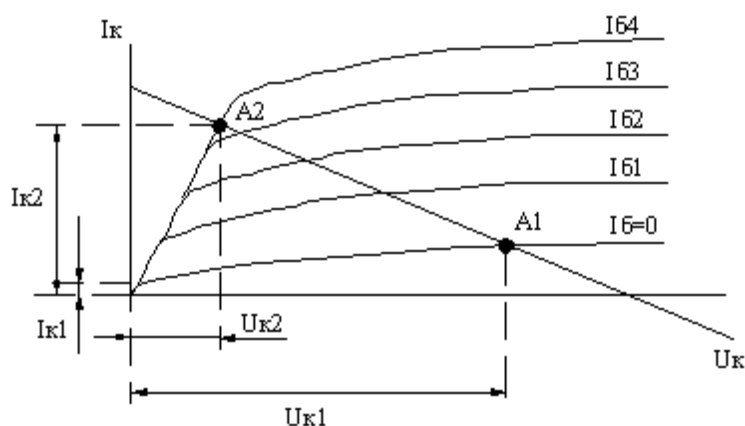


Рис. 8.2. Выходная характеристика транзистора

Второе состояние определяет точка A2 и называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется сопротивлением резистора R_6 и ток $I_2 = U_{\text{ВХ}}/R_6$, т. к. сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, потому что транзистор открыт. Коллекторный переход также открыт, ток $I_{\text{К2}} \approx E_{\text{К}}/R_{\text{К}}$, $U_{\text{К2}} \approx 0$. Т. е. повышению $U_{\text{ВХ}}$ (потенциала базы) соответствует понижение $U_{\text{ВЫХ}}$ (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют инвертирующим. Электронные ключи используют в устройствах формирования импульсов.

Линейные цепи служат для формирования коротких импульсов. К ним относятся дифференцирующие цепи и интегрирующие цепи. Дифференцирующие цепи – это линейные четырехполосники, у которых напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ пропорционально производной напряжения $U_{\text{ВХ}}$ по времени:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

На входе воздействует прямоугольный импульс напряжения (рис. 8.3). Конденсатор сначала заряжается, затем какое-то время находится в покое, затем разряжается, на выходе образуются короткие импульсы.

Интегрирующие цепи – это цепи, у которых $U_{\text{ВЫХ}}$ пропорционально интегралу по времени от $U_{\text{ВХ}}$. При этом в схеме (рис. 8.3) C и R меняются местами.

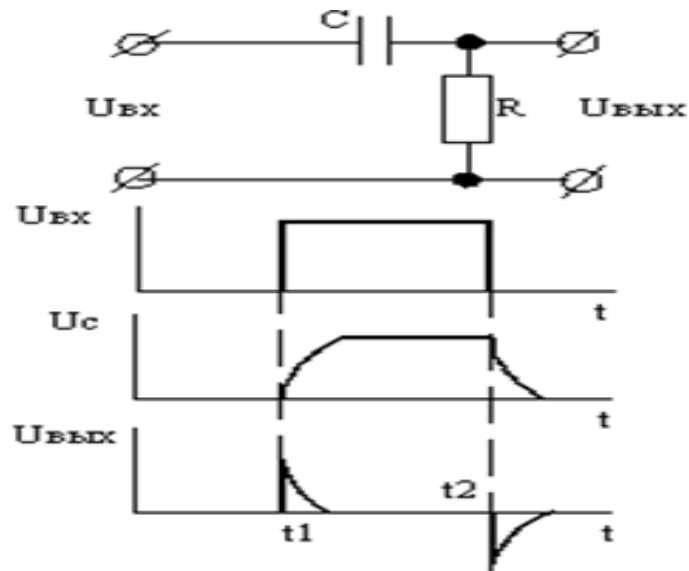


Рис. 8.3. Дифференцирующая цепь и временные диаграммы ее работы

8.1. Типовые задачи с решениями

Пример 8.1

Транзисторный ключ (рис. 8.4) собран на транзисторе КТ847А, $U_{\Pi} = 5$ В; $R_{\kappa} = 1$ Ом; $R_{\delta} = 20$ Ом; $R = 5$ Ом; $E_{\delta} = -1$ В. Определить значения $U_{\text{вх}}$, при которых транзистор работает в режимах отсечки, насыщения и в активном режиме. Характеристики транзистора приведены на рис. 8.5.

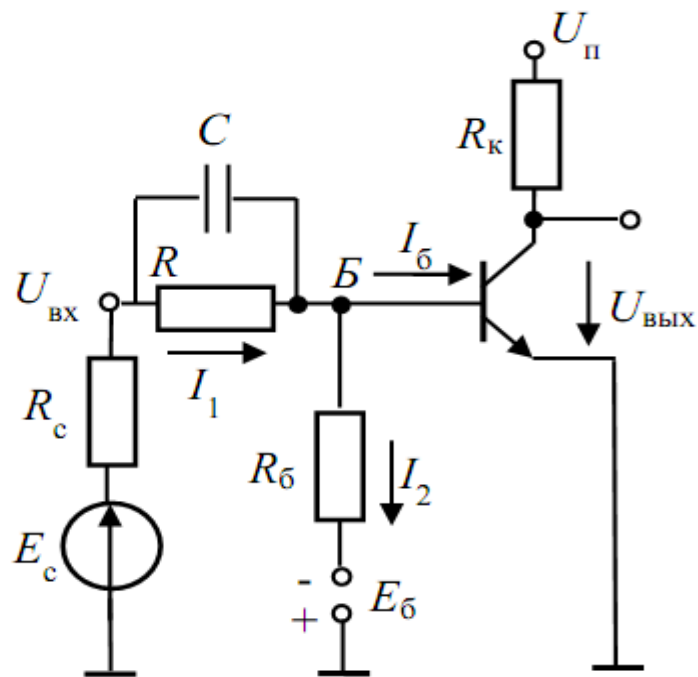


Рис. 8.4. Схема включения транзисторного ключа

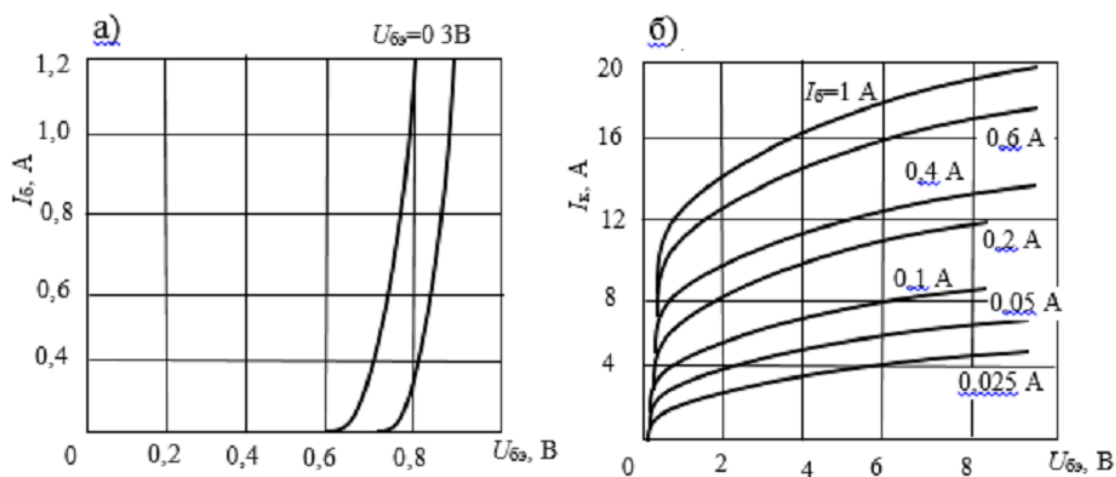


Рис. 8.5. Характеристики транзистора КТ847А: а) входные характеристики; б) выходные характеристики

Решение

Режим отсечки реализуется, если напряжение на базе транзистора $U_б$ меньше порогового значения $U_{БЭ\text{ пор}}$. Согласно входным характеристикам транзистора $U_{БЭ\text{ пор}} = 0,68$ В. Тогда ток I_2 равен:

$$I_2 = \frac{(U_{БЭ\text{ пор}} + |E_б|)}{R_б} = \frac{0,68 + 1}{20} = 0,084 \text{ А.}$$

Базовый ток транзистора в режиме отсечки равен нулю, поэтому $I_1 = I_2 = 0,084$ А. Соответствующее входное напряжение равно:

$$U_б = U_{БЭ\text{ пор}} + I_1 \cdot R = 0,68 + 0,084 \cdot 5 = 1,1 \text{ В.}$$

Следовательно, транзистор находится в отсечке, если $U_{вх} < 1,1$ В.

Определим граничное входное напряжение для режима насыщения. Для этого нужно знать $U_{КЭ\text{ нас}}$, $I_{б\text{ нас гр}}$ и $U_{БЭ\text{ нас}}$. Величину $U_{КЭ\text{ нас}}$ можно приближенно определить по выходным характеристикам транзистора (рис. 8.5). Оно примерно равно 0,2 В. Теперь можно определить ток $I_{к\text{ нас}}$:

$$I_{к\text{ нас}} = \frac{U_{п} - U_{КЭ\text{ нас}}}{R_к} = \frac{(5 - 0,2) \text{ В}}{1 \text{ Ом}} = 4,8 \text{ А.}$$

Ток $I_{б\text{ нас гр}}$ можно найти, воспользовавшись выходными характеристиками транзистора. Из рисунка 8.5 следует, что $I_{б\text{ нас гр}} = 0,3$ А. По входной характеристике (рис. 8.5) определяем значение напряжение $U_{БЭ\text{ нас}}$, соответствующее току 0,3 А:

$$U_{БЭ\text{ нас}} = 0,8 \text{ В.}$$

Если транзистор находится в насыщении, то напряжение $U_{БЭ\text{ нас}}$ остается постоянным даже при токах $I_б$, больших $I_{б\text{ нас гр}}$. Ток I_2 равен:

$$I_2 = \frac{(U_{БЭ} + |E_6|)}{R_6} = \frac{0,78 + 1}{1} = 0,09 \text{ А.}$$

Входное напряжение, отвечающее границе между активным режимом и режимом насыщения:

$$U_{\text{вх гр}} = U_{\text{БЭ нас}} + (I_2 + I_{6 \text{ нас гр}}) \cdot R = 0,8 + (0,09 + 0,3) \cdot 5 = 2,75 \text{ В.}$$

При всех напряжениях, больших $U_{\text{вх гр}}$, транзистор находится в насыщении.

Пример 8.2

Построить схему генератора сигналов треугольной формы (рис. 8.6) так, чтобы выходной сигнал представлял собой напряжение 10 В от пика до пика, с частотой 2 кГц и симметричное относительно нуля.

Решение

Если вспомнить, что конденсатор C заряжается постоянным током величиной $\frac{U_{\text{ст}}}{R_1}$, то выбирая $C = 0,01$ мкФ из равенства $C = \frac{I \cdot t}{U}$, где $t = \frac{\tau}{2}$,

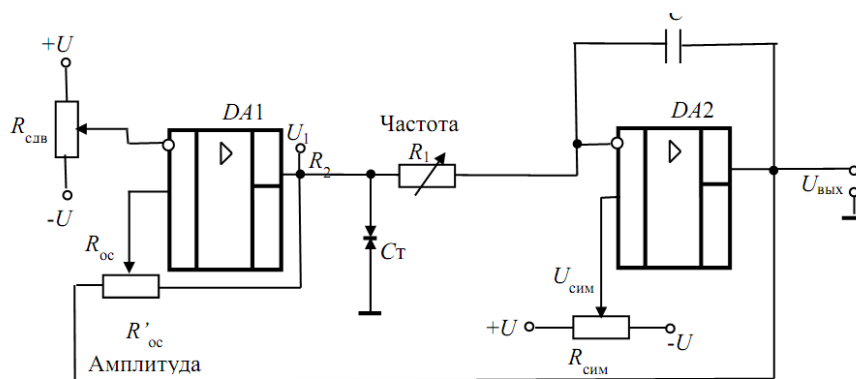
$U = U_{\text{вых}}$ от пика до пика, можно вычислить:

$$I = \frac{CU}{t} = \frac{0,01 \text{ мкФ} \cdot 10 \text{ В}}{0,25 \text{ мс}} = 0,4 \text{ мА.}$$

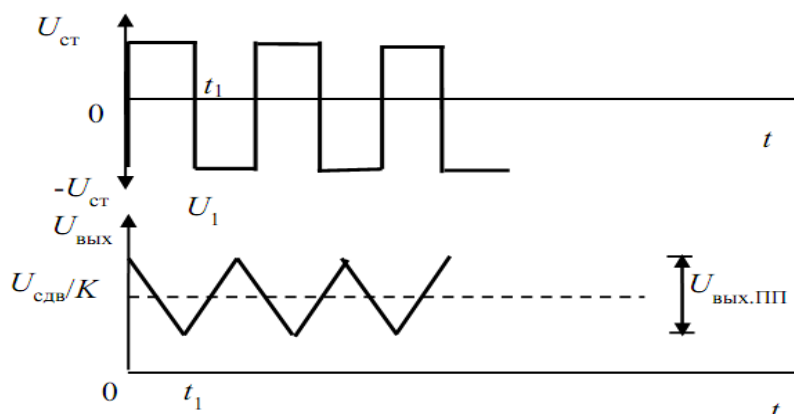
При $U_{\text{ст}} = 10$ В получим:

$$R_1 = \frac{10 \text{ В}}{0,4 \text{ мА}} = 25 \text{ кОм.}$$

Так как выходное напряжение должно быть симметрично относительно нуля, то для резисторов сдвига и симметрии выходного сигнала положим $R_{\text{сим}} = R_{\text{сдв}} = 100$ кОм. Инвертирующий вход усилителя DA1 должен быть заземлен через резистор 10 кОм, так как желательно не иметь сдвига выходного сигнала.



а)



б)

Рис. 8.6. Генератор сигналов треугольной формы: а) схема генератора; б) временные диаграммы

Выходное напряжение усилителя DA1 должно изменять свою полярность, когда выходное напряжение усилителя DA2 достигает 5 В.

При $U_{\text{вых DA1}} = +10 \text{ В}$ и $U_{\text{вых DA2}} = -10 \text{ В}$ напряжение на не инвертирующем входе усилителя DA1 должно быть равно нулю. Таким образом, в точке DA1 напряжение $U_{R_{oc}} = 5 \text{ В}$, а $U_{R'_{oc}} = 10 \text{ В}$. Положим $I_{R_{oc}} = I_{R'_{oc}} = 0,1 \text{ мА}$, тогда:

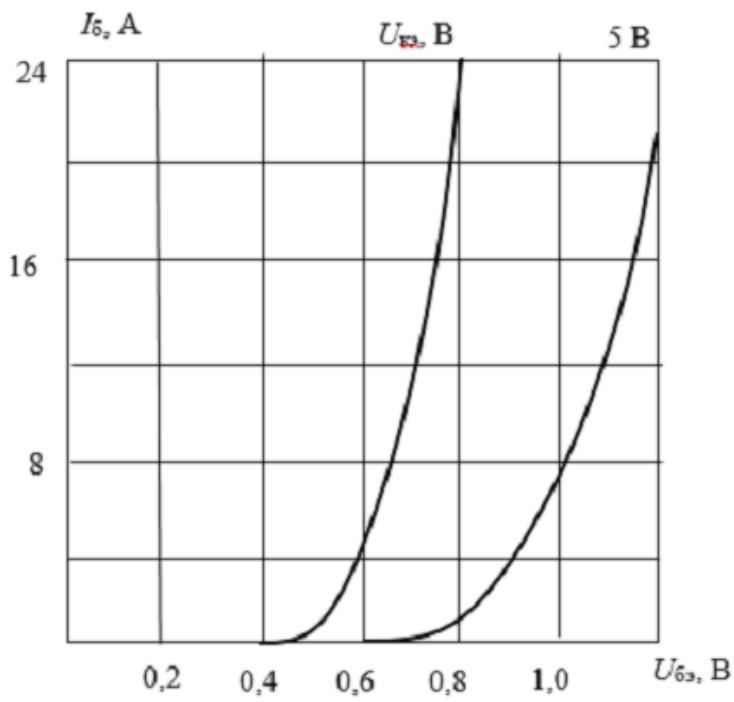
$$R_{oc} = \frac{5 \text{ В}}{0,1 \text{ мА}} = 50 \text{ кОм}, R'_{oc} = \frac{10 \text{ В}}{0,1 \text{ мА}} = 10 \text{ кОм}.$$

Если $I_{C_T} = 4 \text{ мА}$ и $U_{\text{вых макс DA1}} = 14 \text{ В}$, то R_2 должно быть равно:

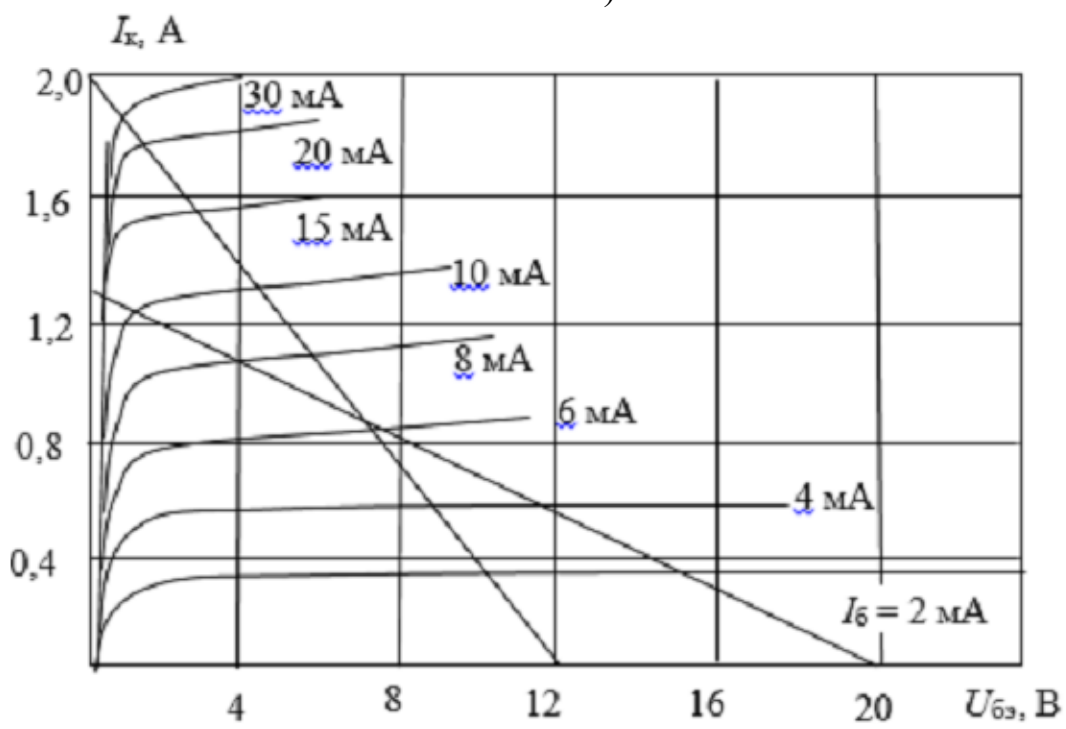
$$R_2 = \frac{U_{\text{вых макс}} - U_{C_T}}{I_{C_T} + I_{R_1} + I_{R_{oc}}} = \frac{14 \text{ В} - 10 \text{ В}}{4 \text{ мА} + 0,4 \text{ мА} + 0,1 \text{ мА}} = 888 \text{ Ом}.$$

8.2. Задачи для самостоятельного решения

1. В условиях примера 8.1 определить $K_{\text{нас}}$, если $U_{\text{вх}} = 4$ В.
2. В условиях примера 8.1 определить напряжение $U_{\text{вх}}$, если $K_{\text{нас}} = 3$.
3. Транзисторный ключ (рис. 8.4) собран на транзисторе 2Е860А. $U_{\text{п}} = 10$ В; $R_{\text{к}} = 10$ Ом; $R_{\text{б}} = 1$ кОм; $R = 400$ Ом; $R_{\text{с}} = 100$ Ом; $E_{\text{б}} = -1,5$ В. Определить значение $E_{\text{с}}$, при которых транзистор работает в режимах отсечки, насыщения и в активном режиме. Характеристики транзистора приведены на рис. 8.7.
4. Определить $K_{\text{нас}}$ транзистора (рис. 8.4), если $U_{\text{п}} = 6,2$ В; $R_{\text{к}} = 1$ кОм; $R = 1$ кОм; $R_{\text{б}} = 3,4$ кОм; $R_{\text{с}} = 100$ Ом; $E_{\text{б}} = -1$ В; $h_{21э} = 30$; $E_{\text{с}} = 3,23$ В. Принять, что $U_{\text{БЭ нас}} = 0,7$ В; $U_{\text{КЭ нас}} = 0,2$ В.



a)



б)

Рис. 8.7. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора 2Е860А

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2552982. Диоды полупроводниковые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров [Текст]. – Введ. 1984–01–01.
2. ГОСТ 2033284. Тиристоры. Термины, определения и буквенные обозначения параметров [Текст]. – Введ. 1985–07–01.
3. ГОСТ 2000374. Транзисторы биполярные. Термины, определения и буквенные обозначения параметров [Текст]. – Введ. 1988–01–01.
4. ГОСТ 1909573. Транзисторы полевые. Термины, определения и буквенные обозначения параметров [Текст]. – Введ. 1975–01–01.
5. ГОСТ 1948089. Микросхемы интегральные. Термины, определения и буквенные обозначения электрических параметров [Текст]. – Введ. 1991–01–01.
6. Марченко, А. Л. Основы электроники [Текст]: учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 296 с.
7. Марченко, А. Л. Основы электроники [Текст]: учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. [Электронный ресурс]. – URL: <http://e.lanbook.com/books/element>.
8. Прянишников, В. А. Электроника [Текст]: полный курс лекций / В. А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с.
9. Рекус, Г. Г. Основы электротехники и промышленной электроники в примерах и задачах с решениями [Текст]: учебное пособие для вузов / Г. Г. Рекус. – М.: Высшая школа, 2008. – 434 с.
10. Головатенко-Абрамова, М. П. Задачи по электронике [Текст] / М. П. Головатенко-Абрамова, А. М. Лапидес. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 112 с.
11. Долженко, О. В.. Сборник задач, вопросов и упражнений по радиоэлектронике [Текст] / О. В. Долженко, Г. В. Королев. – М.: Высш. шк., 1986. – 103 с.
12. Изьюрова, Г. И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи [Текст]: учебное пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г. И. Изьюрова, Г. В. Королев, В. А. Терехов и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
13. Электротехника и электроника [Текст]: сборник задач с контрольными тестами для студентов неэлектротехнических специальностей : в 6 ч. / сост.: Ю. В. Бладыко [и др.]. – Минск: БНТУ, 2008–2013. – Ч. 6 : Электроника. – 2013. – 88 с.
14. Жуков, С. П. Практикум по электротехнике и электронике [Текст]: учебное пособие [Текст] / С. П. Жуков, В. А. Кожухов, Л. Я. Власова, Н. В. Цугленок; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 178 с.
15. Гречихин, В. В. Электроника и микропроцессорная техника [Текст]: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям / В. В. Гречихин; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2017. – 63 с.

Учебное издание

**Кузнецов Валентин Юрьевич
Зятиков Илья Дмитриевич
Иваненко Владимир Павлович**

Электроника

Практикум

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2021 г., поз. 5254

Подписано к печати 17.05.2022.

Формат 60x84/16.

Бумага тип № 1.

Печать офсетная.

Печ.л. 3,7.

Уч.-изд. л. 3,7.

Тираж 40 экз.

Изд. № 5254.

Цена «С».

Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.