



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

Часть 6

Минск
БНТУ
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Электротехника и электроника»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

В 6 частях

Часть 6

ЭЛЕКТРОНИКА

Минск
БНТУ
2013

УДК [621.3+621.38]

ББК 31.2я7

Э45

Составители:

*Ю.В. Бладыко, Т.Т. Розум, С.Д. Гавриленко,
Г.А. Михальцевич*

Рецензенты:

А.Г. Губанович, И.П. Матвеевко

Электротехника и электроника : сборник задач с контрольными
Э45 тестами для студентов неэлектротехнических специальностей : в 6 ч. /
сост.: Ю.В. Бладыко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2008–2013. – Ч. 6 :
Электроника. – 2013. – 88 с.
ISBN 978-985-550-001-9 (Ч. 6).

Настоящий сборник задач предназначен для студентов неэлектротехнических специальностей по курсам «Электроника», «Электроника и микропроцессорная техника», «Электротехника и электроника», «Электротехника и промышленная электроника».

Применяемая в пособии терминология соответствует рекомендациям ГОСТ 19880–74 «Электротехника. Основные понятия. Термины и определения». Обозначение единиц величин соответствует ТР 2007/003/ВУ.

Издается с 2008 года. Часть 5 «Электрические машины», сост.: С.В. Домников, Т.Т. Розум, Ю.В. Бладыко и др., вышла в БНТУ в 2013 г.

УДК [621.3+621.38]

ББК 31.2я7

ISBN 978-985-550-001-9 (Ч. 6)

ISBN 978-985-479-911-7

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ВЫПРЯМИТЕЛИ

Задачи с решениями

Задача 1.1. Определить значение и форму выходного напряжения u_2 в цепи (рис. 1.1, а), полагая, что диод представляет собой идеальный вентиль. Напряжение на входе $u_1 = 30\sin\omega t$ В.

Решение. Вольт-амперная характеристика идеального вентиля приведена на рис. 1.1, б. При прямом включении сопротивление диода равно нулю, а при обратном – бесконечности. Эквивалентные схемы цепи для положительной и отрицательной полуволн входного напряжения изображены на рис. 1.1, в, г. При положительном значении напряжения u_1 выходное напряжение $u_2 = u_1$; при отрицательном значении напряжения u_1 ток диода равен нулю, а следовательно, ток и напряжение на резисторе сопротивлением R_H равны нулю, $u_2 = 0$. Диаграммы $u_1(t)$ и $u_2(t)$ показаны на рис. 1.1, д.

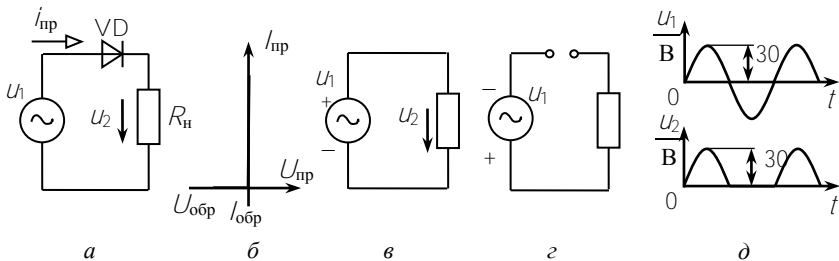


Рис. 1.1

У реального диода прямое сопротивление не равно нулю и имеется падение напряжения на диоде (0,5...1,5 В). Оно мало, поэтому им можно пренебречь, но при малых входных напряжениях его следует учитывать.

Задача 1.2. Кремниевый диод Д210 работает в цепи (рис. 1.1, а) при прямом токе $I_{пр} = 100$ мА. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 1.2. Определить прямое сопротивление диода и выходное напряжение $U_{2\text{ср}}$, если на входе цепи $u_1 = 4\sin\omega t$ В.

Решение. По ВАХ $I(U)$ диода при заданном токе $I_{пр} = 100$ мА находим $U_{пр} = 1$ В. Тогда

$$R_{пр} = U_{пр} / I_{пр} = 1 / (100 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом.}$$

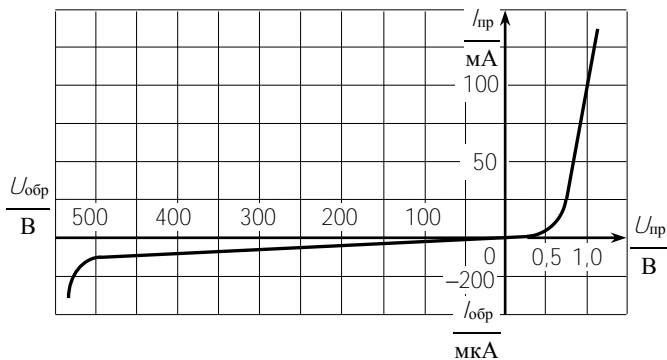


Рис. 1.2

Среднее значение входного напряжения

$$U_{1\text{cp}} = \frac{1}{\pi} U_{1m} = \frac{1}{\pi} \cdot 4 = 1,32 \text{ В}$$

Выходное напряжение

$$U_{2\text{cp}} = U_{1\text{cp}} - U_{\text{пр}} = 1,32 - 1 = 0,32 \text{ В.}$$

Задача 1.3. Рассчитать простейший однополупериодный выпрямитель без фильтра (рис. 1.3) для выпрямления синусоидального напряжения $U = 220 \text{ В}$ с помощью кремниевых диодов КД202Д.

Электрические параметры диодов: $U_{\text{пр}} = 0,9 \text{ В}$, $I_{\text{пр}} = 5 \text{ А}$, $I_{\text{обр max}} = 0,8 \text{ мА}$ (при $U_{\text{обр max}} = 140 \text{ В}$).

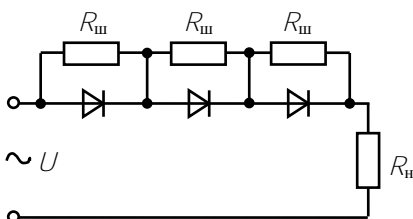


Рис. 1.3

Решение. Амплитудное значение входного напряжения

$$U_m = \sqrt{2} U = 1,41 \cdot 220 = 311 \text{ В}$$

будет обратным напряжением в схеме выпрямления. У диодов КД202Д $U_{\text{обр max}} = 140 \text{ В} < U_m$, значит, в схеме нужно использовать последовательное включение диодов.

Необходимое число диодов

$$n = U_m / (K_n U_{\text{обр max}}),$$

где K_n – коэффициент нагрузки диодов по напряжению (0,5...0,8).

Задаемся $K_n = 0,8$, тогда $n = 311 / (0,8 \cdot 140) = 2,76$. Принимаем $n = 3$.

Поскольку обратные сопротивления однотипных диодов имеют большой разброс (могут различаться в несколько раз), то диоды необходимо шунтировать резисторами сопротивлением $R_{ш}$.

Сопротивление резисторов

$$R_{ш} \leq \frac{nU_{обр\max} - 1,1U_m}{(n-1)I_{обр\max}} = \frac{3 \cdot 140 - 1,1 \cdot 311}{(3-1) \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 49 \text{ кОм.}$$

Здесь коэффициент 1,1 учитывает 10%-й разброс сопротивлений резисторов.

Задача 1.4. Рассчитать простейший выпрямитель на диодах КД202Д (рис. 1.4), чтобы выпрямленный ток $I_{выпр}$ был равен 10 А.

Решение. Требуемый выпрямленный ток $I_{выпр}$ больше максимально допустимого тока одного диода $I_{пр\max} = 5 \text{ А}$ (табл. 1.1). Значит, необходимо несколько диодов соединить параллельно.

Т а б л и ц а 1.1

Параметры диода	Тип диода						
	Д210	Д226	Д229А	Д229И	КД212А	КД202Д	Д305
$I_{пр}, \text{ А}$	0,1	0,3	0,4	0,7	1,0	5,0	10,0
$U_{обр\max}, \text{ В}$	500	400	200	200	200	140	50

Требуемое число диодов

$$n = I_{выпр} / (K_T \cdot I_{пр\max}) = 10 / (0,8 \cdot 5) = 2,5,$$

где $K_T = (0,5 \dots 0,8)$ – коэффициент нагрузки диодов по току. Принимаем три диода, т.е. $n = 3$.

Поскольку прямые сопротивления однотипных диодов могут различаться, то для выравнивания токов в них необходимо последовательно с диодами включить добавочные резисторы, сопротивления которых

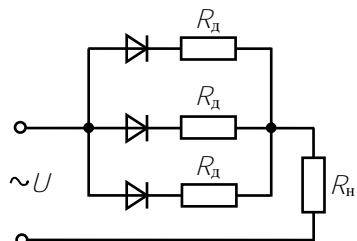


Рис. 1.4

$$R_d \geq \frac{U_{\text{пр}}(n-1)}{n I_{\text{пр max}} - 1,1 I_{\text{выпр}}} = \frac{0,9(3-1)}{3 \cdot 5 - 1,1 \cdot 10} = 0,45 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R_d = 0,5 \text{ Ом.}$

Задача 1.5. Выбрать диоды для мостового выпрямителя (рис. 1.5), если в нагрузочном резисторе сопротивлением $R_n = 110 \text{ Ом}$ выпрямленный ток $I_{\text{н.ср}} = 1 \text{ А}$. Рассчитать также коэффициент трансформации и мощность трансформатора, подключенного к сети напряжением $U_1 = 220 \text{ В}$.

Решение. Среднее значение напряжения на нагрузке

$$U_{\text{н.ср}} = R_n I_{\text{н.ср}} = 110 \cdot 1 = 110 \text{ В.}$$

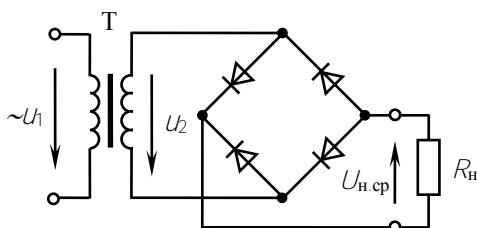


Рис. 1.5

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора рассчитываем, воспользовавшись табл. 1.2 количественного соотношения напряжений, токов и мощностей для различных схем выпрямления:

$$U_2 = 1,11 U_{\text{н.ср}} = 1,11 \cdot 110 = 122 \text{ В.}$$

Амплитуда обратного напряжения на диодах

$$U_{\text{обр max}} = 1,57 U_{\text{н.ср}} = 1,57 \cdot 110 = 173 \text{ В.}$$

Поскольку ток проходит через диоды только 1/2 периода, то ток диодов

$$I_d = I_{\text{н.ср}} / 2 = 0,5 \text{ А.}$$

Диоды выбираем по двум параметрам: прямому току $I_{\text{пр}}$ и амплитуде максимально допустимого обратного напряжения $U_{\text{обр max}}$, которые должны быть не меньше расчетных значений. Ток $I_d = 0,5 \text{ А}$ и напряжению $U_{\text{обр max}} = 173 \text{ В}$ удовлетворяет диод Д229И (см. табл. 1.1).

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = U_1 / U_2 = 220 / 122 = 1,8.$$

Т а б л и ц а 1.2

Схема выпрямления	Соотношения для выбора				Коэффициент пульсаций
	диодов		трансформатора		
	$\frac{U_{\text{обрmax}}}{U_{\text{н.ср}}}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{н.ср}}$	$U_{2\text{ф}}/U_{\text{н.ср}}$	$P_{\text{Т}}/P_{\text{Н}}$	$k_{\text{п}}$
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
Трехфазная мостовая ($m = 6$)	1,045	1/3	0,427	1,045	0,057
Трехфазная с нулевым выводом трансформатора ($m = 3$)	2,09	1/3	0,855	1,34	0,25

Для выбора по каталогу типового трансформатора определяем расчетную мощность трансформатора:

$$P_{\text{Т}} = 1,23P_{\text{Н}} = 1,23U_{\text{н.ср}} I_{\text{н.ср}} = 1,23 \cdot 110 \cdot 1 = 135 \text{ Вт.}$$

По каталогу ближайшая стандартная мощность

$$S_{\text{НОМ}} = 160 \text{ В} \cdot \text{А} > P_{\text{Т}} = 135 \text{ Вт.}$$

Задача 1.6. В цепи (рис. 1.5) определить среднее значение напряжения на нагрузке, обратное напряжение диодов и амплитуду пульсаций напряжения нагрузки, если $U_2 = 10 \text{ В}$. Падением напряжения в диодах пренебречь.

Решение. Среднее значение напряжения нагрузки

$$U_{н.ср} = U_2 / 1,11 = 10 / 1,11 = 9 \text{ В.}$$

Обратное напряжение диодов

$$U_{обр \max} = 1,57 U_{н} = 1,57 \cdot 9 = 14,1 \text{ В.}$$

Коэффициент пульсаций $k_{п}$ – это отношение амплитуды основной гармоники к среднему значению выпрямленного напряжения $U_{н.ср}$.

Для двухполупериодного выпрямителя выпрямленное напряжение представляется гармоническим рядом

$$U_{н} = U_{н.ср} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Тогда

$$k_{п} = \frac{2}{3} U_{н.ср} / U_{н.ср} = \frac{2}{3} = 0,667.$$

Амплитуда пульсаций

$$U_{mп} = k_{п} U_{н.ср} = 0,667 \cdot 9 = 6 \text{ В.}$$

Задача 1.7. Рассчитать и выбрать простой сглаживающий фильтр (индуктивный или емкостный) в выпрямителе (рис. 1.5) для получения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки $k_{п2} = 0,01$ при двух значениях сопротивления нагрузки: $R_{н} = 10 \text{ Ом}$ и $R_{н} = 1 \text{ кОм}$. Частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$.

Решение. Требуемый коэффициент сглаживания выпрямленного напряжения

$$k_{сгл} = k_{п1} / k_{п2} = 0,667 / 0,01 = 66,7,$$

где $k_{п1}$ – коэффициент пульсаций на выходе двухполупериодного выпрямителя без фильтра (см. табл. 1.2).

Соотношения для расчета элементов фильтра приведены в табл. 1.3, где m – число пульсаций (фаз) выпрямленного напряжения.

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

При $R_{\text{H}} = 10 \text{ Ом}$ находим

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

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

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

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

Задача 1.8. Рассчитать П-образный LC-фильтр к однофазному мостовому выпрямителю с сопротивлением $R_{\text{H}} = 110 \text{ Ом}$ для обеспечения коэффициента пульсаций выходного напряжения $k_{\text{п}2} = 0,01$, если частота сети $f = 50 \text{ Гц}$.

Решение. Рассматриваем П-образный LC-фильтр (рис. 1.6) как многосвязный фильтр, коэффициент сглаживания которого

$$k_{\text{сгл } \Pi} = k_{\text{сгл } C} k_{\text{сгл } \Gamma}.$$

Задаемся емкостью $C_{\phi} = 100 \text{ мкФ}$ и рассчитываем коэффициент сглаживания емкостного фильтра:

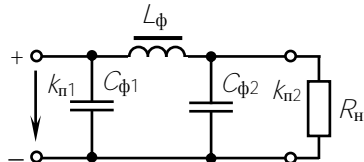


Рис. 1.6

$$k_{\text{сгл } C} = m\omega C_{\text{ф1}} R_{\text{н}} = 2 \cdot 314 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 110 = 6,9,$$

где $m = 2$; $\omega = 2\pi f = 314 \text{ с}^{-1}$.

По требуемому значению $k_{\text{сгл } \Pi} = k_{\text{п1}} / k_{\text{п2}} = 0,667 / 0,01 = 66,7$ определяем

$$k_{\text{сгл } \Gamma} = k_{\text{сгл } \Pi} / k_{\text{сгл } C} = 66,7 / 6,9 = 9,7.$$

Поскольку коэффициент сглаживания Γ -образного фильтра (табл. 1.3) $k_{\text{сгл } \Gamma} = m^2 \omega^2 L_{\text{ф}} C_{\text{ф2}}$, то

$$L_{\text{ф}} C_{\text{ф2}} = \frac{k_{\text{сгл } \Gamma}}{m^2 \omega^2} = \frac{9,7 \cdot 10^6}{4 \cdot 10^5} = 24,2 \text{ Гн} \cdot \text{мкФ}.$$

Задаемся значением $C_{\text{ф2}} = 100 \text{ мкФ}$ (обычно выбирают $C_{\text{ф2}} = (1 \dots 2) C_{\text{ф1}}$) и находим индуктивность дросселя

$$L_{\text{ф}} = L_{\text{ф}} C_{\text{ф2}} / C_{\text{ф2}} = 24,2 / 100 = 0,242 \text{ Гн}.$$

Задача 1.9. При подключении к однофазному мостовому выпрямителю активной нагрузки $R_{\text{н}} = 100 \text{ Ом}$ напряжение $U_{\text{н.ср}} = 0,9 U_{\text{нх}}$.

Как изменится $U_{\text{н}}$ при подключении сглаживающего фильтра (дросселя), если $R_{\text{др}} = 10 \text{ Ом}$? Принять падение напряжения на открытых диодах $\Delta U_{\text{а}} = 0$.

Решение.

$$U_{\text{н}} = U_{\text{нх}} - N \cdot \Delta U_{\text{а}} - I_{\text{н}} \cdot R_{\text{вн}},$$

где N – число вентилялей; $R_{\text{вн}}$ – выходное (внутреннее) сопротивление выпрямителя.

В схеме без сглаживающего фильтра

$$\frac{U_{\text{н.ср}}}{U_{\text{нх}}} = 0,9 = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} = \frac{100}{R_{\text{вн}} + 100},$$

откуда

$$R_{\text{вн}} = \frac{100}{0,9} - 100 = 100 \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) = 11,1 \text{ Ом}.$$

При подключении дросселя

$$\frac{U_{\text{н.ср}}}{U_{\text{нх}}} = \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}} + R_{\text{др}}} = \frac{100}{11,1 + 100 + 10} = \frac{100}{121,1} = 0,826.$$

Следовательно, $U'_{\text{н.ср}} = 0,826 \cdot U_{\text{нх}}$, т. е. уменьшится в 1,09 раз (на 9%).

Задача 1.10. Рассчитать сопротивление $R_{\text{б}}$ балластного резистора в схеме параметрического стабилизатора напряжения (рис. 1.7, а), выполненного на кремниевом стабилитроне КС210Ж. Вольт-амперная характеристика стабилитрона дана на рис. 1.7, б. Входное напряжение изменяется от $U_{\text{min}} = 13$ В до $U_{\text{max}} = 19$ В. Сопротивление нагрузочного резистора $R_{\text{н}} = 1,8$ кОм. Будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения входного напряжения? Чем равен коэффициент стабилизации?

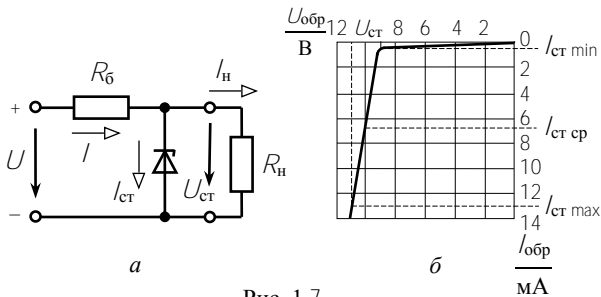


Рис. 1.7

Решение. Сопротивление балластного резистора определяем по формуле

$$R_{\text{б}} = (U_{\text{ср}} - U_{\text{ст}}) / (I_{\text{ст.ср}} + I_{\text{н}}),$$

где

$$U_{\text{ср}} = (U_{\text{min}} + U_{\text{max}}) / 2 = (13 + 19) / 2 = 16 \text{ В};$$

$$I_{\text{ст.ср}} = (I_{\text{ст.min}} + I_{\text{ст.max}}) / 2 = (0,5 + 13) / 2 = 6,75 \text{ мА};$$

$$I_{\text{н}} = U_{\text{ст}} / R_{\text{н}} = 10 / (1,8 \cdot 10^3) = 5,55 \text{ мА}.$$

Таким образом,
$$R_{\text{б}} = \frac{16 - 10}{(6,75 + 5,55) \cdot 10^{-3}} = 490 \text{ Ом}.$$

Стабилизация будет обеспечена при изменении входного напряжения от $U_{\min} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст. min}} + I_{\text{н}}) R_{\text{б}} = 10 + (0,5 + 5,55) \cdot 10^{-3} \cdot 490 \approx 13 \text{ В}$ до $U_{\max} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст. max}} + I_{\text{н}}) R_{\text{б}} = 10 + (13 + 5,55) \cdot 10^{-3} \cdot 490 \approx 19,1 \text{ В}$. Значит, стабилизация обеспечивается во всем диапазоне изменения напряжения источника питания.

Коэффициент стабилизации напряжения

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх.ср}}}{\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых.ср}}} = \frac{(19-13)/((19+13)/2)}{(11-9)/((11+9)/2)} = \frac{6/16}{2/10} = 1,88.$$

Задача 1.11. Определить средние значения выпрямленного напряжения однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя, если угол управления тиристоров $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$. Амплитуда входного напряжения $U_m = 311 \text{ В}$. Начертить временные диаграммы выпрямленного напряжения.

Решение. Тиристоры открываются с запаздыванием и пропускают ток в течение части полупериода входного напряжения от α до π (рис. 1.8).

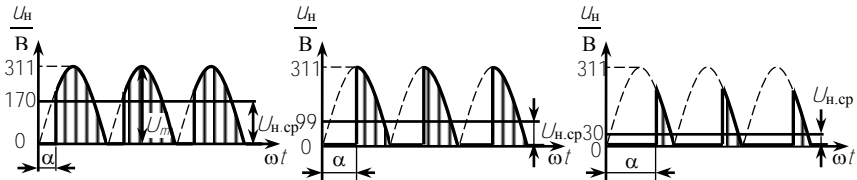


Рис. 1.8

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0,9U \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

При $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ напряжение $U_{\text{н.ср}}$ равно соответственно 170, 99 и 30 В.

Задача 1.12. Найти выходное напряжение для трехфазной мостовой схемы управляемого выпрямителя (УВ) (рис. 1.9.) при углах управления $\alpha_1 = 15^\circ$ и $\alpha_2 = 75^\circ$ для активной и индуктивной нагрузки, если линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2 = 100$ В, соединение вторичной обмотки – звезда. Начертить временные диаграммы выпрямленного напряжения.

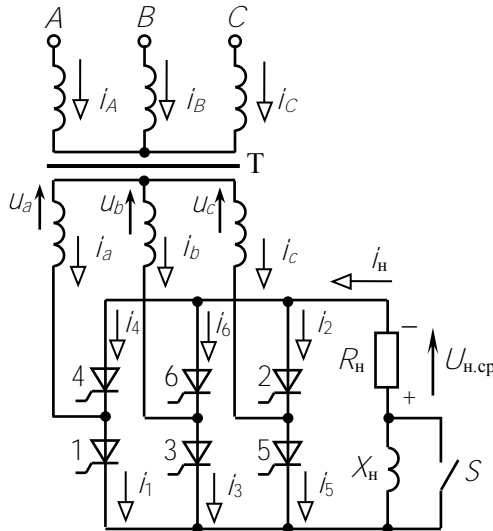


Рис. 1.9

Решение. Из табл. 1.2 для трехфазной мостовой схемы находим $U_{н.ср0}/U_{2ф} = 2,34$.

Выпрямленное напряжение при угле управления $\alpha_0 = 0$ равно

$$U_{н.ср0} = 2,34U_{2ф} = 1,35U_2 = 1,35 \cdot 100 = 135 \text{ В.}$$

Находим выходное напряжение при $\alpha_1 = 15^\circ$ для любого характера нагрузки

$$U_{н.ср} = U_{н.ср0} \cos \alpha_1 = 135 \cos 15^\circ = 130,4 \text{ В;}$$

при $\alpha_2 = 75^\circ$ для индуктивной нагрузки

$$U_{н.ср} = U_{н.ср0} \cos \alpha_2 = 135 \cos 75^\circ = 34,9 \text{ В};$$

при $\alpha_2 = 75^\circ$ для активной нагрузки

$$U_{н.ср} = U_{н.ср0} [1 + \cos(60^\circ + \alpha_2)] = 135 [1 + \cos(60^\circ + 75^\circ)] = 39,5 \text{ В}.$$

Временные диаграммы представлены на рис. 1.10.

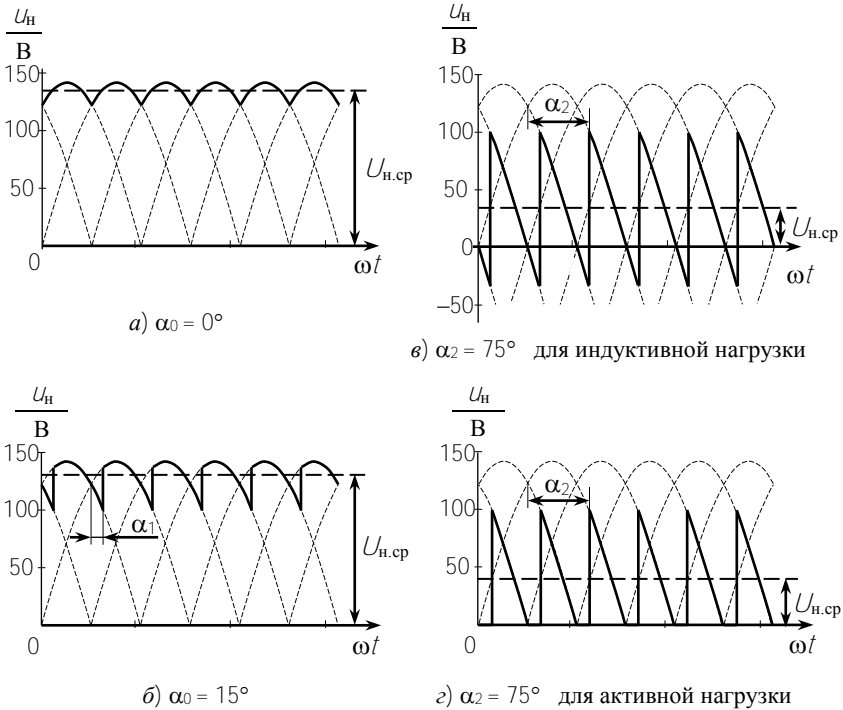


Рис. 1.10. Временные диаграммы трехфазного мостового УВ

Задача 1.13. В импульсном преобразователе постоянного напряжения (рис. 1.11.) действующее значение напряжения нагрузки $U_n = 50 \text{ В}$. Найти среднее значение $U_{н.ср}$, если $E = 100 \text{ В}$.

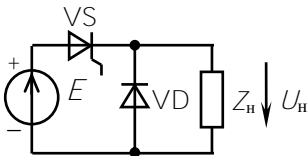


Рис. 1.11.

Решение. Скважность импульсов

$$Q = \left(\frac{E}{U_1} \right)^2 = \left(\frac{100}{50} \right)^2 = 4.$$

Среднее значение напряжения $U_{н.ср} = \frac{E}{Q} = \frac{100}{4} = 25 \text{ В}.$

Задача 1.14. В регулируемом преобразователе переменного напряжения (рис. 1.12) найти действующее значение напряжения на нагрузке U_H , если напряжение питающей сети $U = 220 \text{ В}$, угол управления симистора $\alpha = \pi/2$.

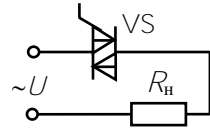


Рис. 1.12.

Решение. Напряжение на нагрузке при $\alpha = \pi/2$

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U \sin \omega t)^2 d\omega t} = U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = \frac{U}{\sqrt{2}} = 155 \text{ В}.$$

Задача 1.15. Определить напряжение однофазного нулевого ведомого сетью инвертора с учетом потерь на коммутацию, если ток инвертора $I_{ср} = 2 \text{ А}$, напряжение вторичной обмотки трансформатора $U_2 = 100 \text{ В}$, индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора $X_a = 15,7 \text{ Ом}$, угол опережения $\beta = 60^\circ$.

Решение. Напряжение на входе инвертора

$$U_{ср} = U_{ср0} \cos \beta + \frac{X_a I_{ср}}{\pi} = 90 \cos 60^\circ + \frac{15,7 \cdot 2}{\pi} = 55 \text{ В},$$

где $U_{ср0} = 0,9 U_2 = 0,9 \cdot 100 = 90 \text{ В}.$

Задача 1.16. Рассчитать отношения амплитуд гармоник выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения для управляемых выпрямителей: двухпульсного, трехпульсного, шестипульсного. Угол управления принять равным 0° и 30° .

Решение. Расчет производится по формуле

$$\frac{U_{н.ср\ v\ m}}{U_{н.ср0}} = \frac{2}{v^2 m^2 - 1} \cos \alpha \sqrt{1 + v^2 m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha},$$

где m – пульсность выпрямителя; v – номер гармоники.

Результаты расчетов показаны в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.4

$m \backslash v$	1	2	3	4	5
$\alpha = 0^\circ$					
$m = 2$	0,667	0,133	0,057	0,032	0,020
$m = 3$	0,250	0,057	0,025	0,014	0,009
$m = 6$	0,057	0,014	0,006	0,003	0,002
$\alpha = 30^\circ$					
$m = 2$	0,882	0,290	0,178	0,131	0,100
$m = 3$	0,433	0,178	0,115	0,085	0,068
$m = 6$	0,178	0,085	0,054	0,036	0,030

Вывод: при увеличении угла управления амплитуды высших гармоник резко возрастают для всех видов выпрямителей.

Задача 1.17. Трехфазный мостовой выпрямитель потребляет от сети 380/220 В ток $I_1 = 50$ А. Потребляемая выпрямителем активная мощность в одной фазе составляет $P_1 = 9$ кВт. Частота напряжения сети $f = 50$ Гц.

Найти необходимую емкость косинусных конденсаторов (рис. 1.13) для полной компенсации реактивной мощности, построить векторную диаграмму токов и показать схему подключения конденсаторов к сети.

Решение. Полная мощность, потребляемая выпрямителем в одной фазе

$$S_1 = U_1 I_1 = 220 \cdot 50 = 11 \text{ кВ}\cdot\text{А}.$$

Коэффициент мощности выпрямителя

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1} = \frac{9}{11} = 0,818.$$

Сдвиг фаз между напряжением и потребляемым током

$$\cos \varphi = \frac{\lambda}{k} = \frac{0,818}{0,955} = 0,857, \quad \text{т.е. } \varphi = 31^\circ,$$

где k – коэффициент искажения формы кривой потребляемого тока, равный 0,955 для трехфазных выпрямителей.

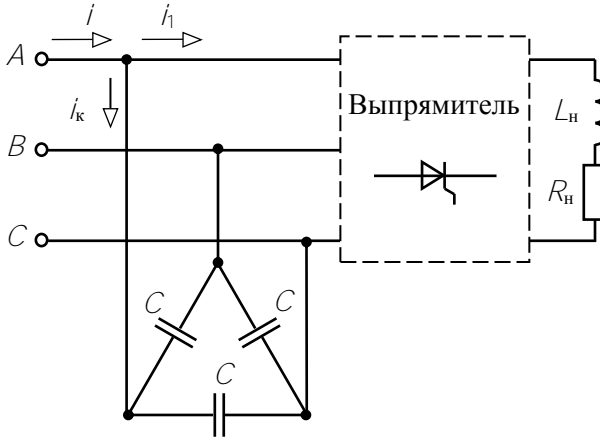


Рис. 1. 13

Действующее значение первой гармоники потребляемого тока

$$I_{1(1)} = k I_1 = 0,955 \cdot 50 = 47,75 \text{ А.}$$

Тогда действующее значение компенсирующего тока должно быть равно

$$I_k = I_{1(1)} \cdot \sin \varphi = 47,75 \cdot 0,515 = 24,6 \text{ А.}$$

Так как косинусные конденсаторы при подключении к сети соединяются треугольником, ток в конденсаторах будет равен

$$I_C = \frac{I_k}{\sqrt{3}} = \frac{24,6}{\sqrt{3}} = 14,2 \text{ А.}$$

Тогда из выражения для напряжения на косинусном конденсаторе найдем необходимую величину его емкости

$$C = \frac{I_C}{U \cdot \omega} = \frac{14,2}{380 \cdot 314} = 119 \text{ мкФ.}$$

Строим векторную диаграмму (рис. 1.14), где $I_{(1)}$ – действующее значение первой гармоники потребляемого тока;

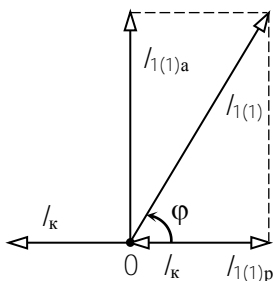


Рис. 1.14

$I_{(1)a}$, $I_{(1)p}$ – активная и реактивная составляющие действующего значения первой гармоники потребляемого тока;

I_k – действующее значение компенсирующего тока.

Задача 1.18. Рассчитать частоты гармоник выпрямленного напряжения для схем выпрямителей с пульсностью 2, 6, 12 и сделать выводы.

Решение. Частоты гармоник выпрямленного напряжения

$$f_v = v m f,$$

где v – номер гармоники; m – пульсность выпрямителя; f – частота сети.

Результаты расчетов занесены в табл. 1.5.

Т а б л и ц а 1.5

$v \backslash m$	1	2	3	4	5
$m = 2$	100	200	300	400	500
$m = 6$	300	600	900	1200	1500
$m = 12$	600	1200	1800	2400	3000

Вывод: чем выше пульсность выпрямителя, тем выше частоты гармоник в кривой выпрямленного напряжения и легче задача их фильтрации.

Задача 1.19. Рассчитать частоты гармоник кривой потребляемого тока для различных видов неуправляемых выпрямителей: 1) двухпульсного; 2) двухпульсного с нулевым диодом; 3) шестипульсного мостового. Сделать выводы.

Решение. Из разложения кривой потребляемого тока в ряд Фурье известно, что для двухпульсного неуправляемого выпрямителя и двухпульсного с нулевым диодом в ряду Фурье содержатся все нечетные гармоники. У шестипульсного мостового выпрямителя отсутствует третья гармоника и другие, кратные ей.

Разложение в ряд Фурье кривой потребляемого тока имеет вид:

1) для двухпульсного однофазного выпрямителя

$$i_1(t) = \frac{4 I_{н.ср}}{\pi \cdot n} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{v} \sin v\omega t + \dots \right),$$

где $I_{н.ср}$ – ток преобразователя; n – коэффициент трансформации; v – номер гармоники.

2) для двухпульсного однофазного выпрямителя с нулевым диодом состав гармонических составляющих аналогичен;

3) для трехфазного мостового выпрямителя

$$i_1(t) = \frac{2\sqrt{3} I_{н.ср}}{\pi \cdot n} \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right).$$

Частоты этих гармоник приводятся в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6

Частота \ Вид выпрямителя	f_1	f_3	f_5	f_7	f_9	f_{11}	f_{13}	f_{15}
Двухпульсный неуправляемый	50	150	250	350	450	550	650	750
Двухпульсный с нулевым диодом	50	150	250	350	450	550	650	750
Шестипульсный мостовой	50	–	250	350	–	550	650	–

Выводы:

1. У двухпульсных выпрямителей с нулевым диодом и без него состав гармоник одинаковый – все нечетные.

2. У схемы Ларионова отсутствует третья гармоника и другие, кратные ей, что облегчает задачу фильтрации этих гармоник для предотвращения их попадания в питающую сеть.

Задача 1.20. Потребляемый управляемым выпрямителем действующий ток $I_1 = 40$ А. Напряжение и частота сети 380/220 В, 50 Гц, угол управления $\alpha = 30^\circ$, угол коммутации $\gamma = 0^\circ$.

Для мостовых однофазного и трёхфазного выпрямителей определить: потребляемую активную мощность P_1 ; потребляемую полную мощность S_1 ; коэффициент мощности λ ; амплитуду первой гармоники потребляемого тока $I_{1(1)m}$.

Решение. Для однофазного мостового выпрямителя.

Действующее значение первой гармоники потребляемого тока

$$I_{1(1)} = k I_1 = 0,9 \cdot 40 = 36 \text{ А.}$$

Потребляемая выпрямителем активная мощность

$$P_1 = U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot \cos\varphi = 380 \cdot 36 \cos 30^\circ = 11,85 \text{ кВт.}$$

Потребляемая выпрямителем полная мощность

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 380 \cdot 40 = 15,2 \text{ кВт}\cdot\text{А.}$$

$$\text{Коэффициент мощности выпрямителя } \lambda = \frac{P_1}{S_1} = \frac{11,85}{15,20} = 0,78.$$

Амплитуда первой гармоники потребляемого тока

$$I_{1(1)m} = \sqrt{2} \cdot I_{1(1)} = \sqrt{2} \cdot 36 = 51 \text{ А.}$$

Для трехфазного мостового выпрямителя.

$$I_{1(1)} = k \cdot I_1 = 0,955 \cdot 40 = 38,2 \text{ А.}$$

$$P_1 = 3 U_1 \cdot I_{1(1)} \cdot \cos\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 38,2 \cdot \cos 30^\circ = 21,83 \text{ кВт.}$$

$$S_1 = 3 U_1 \cdot I_1 = 3 \cdot 220 \cdot 40 = 26,4 \text{ кВт}\cdot\text{А.}$$

$$\lambda = \frac{P_1}{S_1} = \frac{21,83}{26,4} = 0,827.$$

$$I_{1(1)m} = \sqrt{2} \cdot I_{1(1)} = \sqrt{2} \cdot 38,2 = 54 \text{ А.}$$

Задача 1.21. В однофазном двухпульсном преобразователе с нулевой точкой $U_1 = 220$ В; коэффициент трансформации $n = 2$; $R_H = 10$ Ом; $L_H = 100$ Гн; $E = 200$ В; $\alpha = 150^\circ$, $f = 50$ Гц. Построить диаграммы $u_H(t)$, $i_H(t)$, $i_1(t)$.

Вычислить среднее значение напряжения и тока в нагрузке.

Решение. Схема преобразователя в режиме инвертирования с активно-индуктивной нагрузкой имеет вид (рис 1.15):

Среднее значение напряжения в нагрузке $U_{H,cp} = U_{H,cp0} \cos \alpha$.

Для данного преобразователя

$$U_{H,cp0} = 0,9U_2 = 0,9 \frac{U_1}{n} = 0,9 \cdot \frac{220}{2} = 99 \text{ В,}$$

тогда

$$U_{H,cp} = 99 \cos 150^\circ = -85,7 \text{ В.}$$

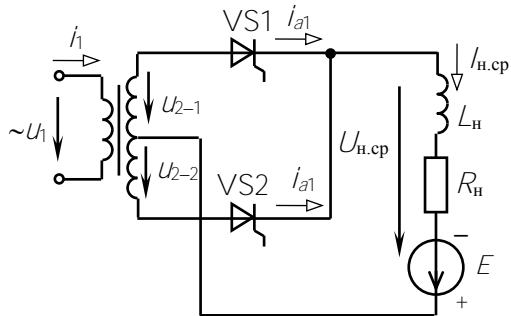


Рис. 1.15

Среднее значение тока в нагрузке будет равно:

$$I_{H,cp} = \frac{E + U_{H,cp}}{R_H} = \frac{200 - 85,7}{10} = 11,4 \text{ А.}$$

Диаграммы работы инвертора приведены на рис. 1.16:

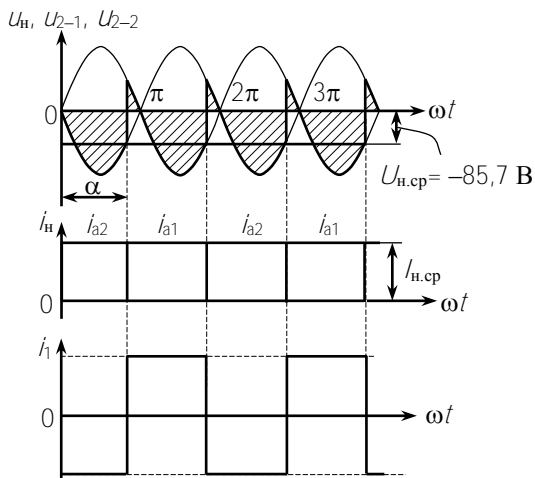
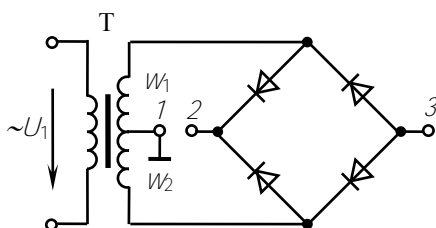


Рис. 1.16

Контрольные задачи

Задача 1.22. Определить статическое сопротивление полупроводникового диода Д210 при включении его в прямом и обратном направлениях, если к диоду приложено прямое напряжение $U_{пр} = 0,8$ В и обратное $U_{обр} = 500$ В. Вольт-амперная характеристика диода приведена на рис. 1.2.

Задача 1.23. На вход выпрямителя (рис. 1.17) подано напряжение

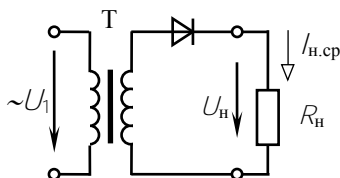


$u_1 = U_m \sin \omega t$. Число витков вторичных полуобмоток трансформатора $W_1 = W_2$. Начертить временные диаграммы напряжения на нагрузке при включении ее между выводами: а) 1–2; б) 1–3; в) 2–3.

Рис. 1.17

Задача 1.24. При прямом напряжении $0,9$ В максимально допустимый ток диода равен 300 мА. Каково наибольшее напряжение источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором сопротивлением $R_n = 17$ Ом?

Задача 1.25. В цепи (рис. 1.18) через нагрузочный резистор сопротивлением $R_n = 500$ Ом проходит ток $I_{н.ср} = 0,1$ А. Выбрать тип диода и



рассчитать коэффициент трансформации и мощность трансформатора (см. табл. 1.1, 1.2), если напряжение питающей сети $U_1 = 220$ В.

Рис. 1.18

Задача 1.26. Аккумуляторная батарея, ЭДС которой $E = 12$ В, внутреннее сопротивление $R_0 = 1$ Ом, заряжается через однофазный мостовой выпрямитель, подключенный к трансформатору с вторичным напряжением $u_2 = 22 \sin \omega t$ В. Начертить электрическую схему зарядной установки и определить среднее значение зарядного тока.

Задача 1.27. Рассчитать входное напряжение U_2 (линейное) и выбрать диоды для трехфазного мостового выпрямителя (рис. 1.19), если средние значения напряжения и тока нагрузки $U_{н.ср} = 100$ В, $I_{н.ср} = 10$ А. Воспользоваться табл. 1.2.

Начертить диаграммы $u_n(t)$ при нормальном режиме и при обрыве одной из фаз.

Задача 1.28. Определить параметры Г-образного LC-фильтра к однополупериодному выпрямителю, если коэффициент пульсации напряжения нагрузки $k_{н2} = 0,02$, частота питающей сети $f = 50$ Гц, сопротивление нагрузки $R_n = 200$ Ом.

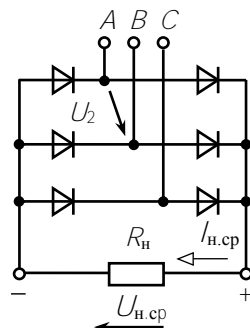


Рис. 1.19

Задача 1.29. Определить угол управления однофазного мостового управляемого выпрямителя на тиристорах, если среднее значение напряжения на нагрузке должно быть равным: а) 10 В; б) 1,75 В. Напряжение вторичной обмотки трансформатора, к которому подключен выпрямитель, $U_2 = 13$ В.

Задача 1.30. В параметрическом стабилизаторе напряжения (см. рис. 1.7, а) определить допустимые пределы изменения питающего напряжения, если напряжение стабилизации стабилитрона $U_{ст} = 10$ В, его минимальный ток $I_{ст\ min} = 1$ мА, максимальный ток $I_{ст\ max} = 30$ мА, сопротивление нагрузки $R_n = 1$ кОм, сопротивление балластного резистора $R_6 = 0,5$ кОм.

Задача 1.31. Определить коэффициент полезного действия стабилизатора (см. рис. 1.7, а) на полупроводниковом стабилитроне, у которого напряжение стабилизации $U_{ст} = 5$ В при токе стабилизации $I_{ст} = 0,5$ А, если $R_n = 10$ Ом, $R_6 = 5$ Ом.

Задача 1.32. Мостовой однофазный выпрямитель рассчитан на напряжение нагрузки $U_n = 100$ В, ток $I_n = 150$ мА. Для схемы выбраны диоды Д207 с предельными параметрами $I_{пр\ max} = 100$ мА и $U_{обр\ max} = 200$ В. Сохранит ли выпрямитель свои функции при обры-

ве цепи одного из диодов? Останутся ли работоспособными оставшиеся диоды?

Задача 1.33. Какие из диодов, Д206 или Д207, подойдут для однофазной мостовой схемы выпрямления (рис. 1.20), если напряжение и ток нагрузки соответственно равны $U_{н.ср} = 100$ В, $I_n = 150$ мА?

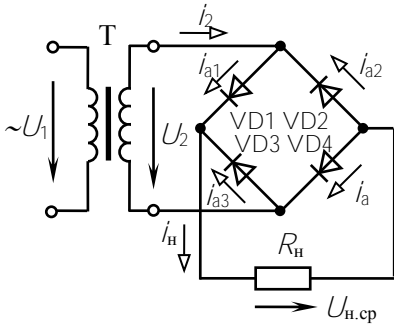


Рис. 1.20

Задача 1.34. Схема Ларионова на диодах дает постоянное напряжение $U_{н.ср} = 120$ В. Какое напряжение будет давать выпрямитель при обрыве цепи одного диода?

Задача 1.35. Начертить временную диаграмму напряжения на нагрузке R_n (рис. 1.21), если входное напряжение $u = 5 \sin \omega t$ В, а номинальное напряжение стабилитрона $U_{ст} = 3$ В. Диоды идеальные!

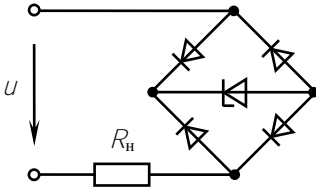


Рис. 1.21

Ответы к контрольным задачам

- 1.22. $R_{пр} = 16$ Ом, $R_{обр} = 5$ МОм.
- 1.24. 6 В.
- 1.25. Д210, $n = 2$, $P_T = 15$ Вт.
- 1.26. 2 А.
- 1.27. $U_2 = 74$ В; КД202Д.
- 1.28. $C_\phi = 200$ мкФ, $L_\phi = 3,92$ Гн.
- 1.29. а) 45° , б) 135° .
- 1.30. $U_{min} = 15,5$ В, $U_{max} = 30$ В.
- 1.31. 0,25.

Тест 1.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Вариант 1

1. В схеме однополупериодного выпрямителя на нагрузке $R_H = 510$ Ом постоянное напряжение $U_{н.ср} = 100$ В. Правильно ли выбран диод Д226, для которого максимальное обратное напряжение $U_{обр\ max} = 400$ В, а наибольший выпрямленный ток $I_{пр\ max} = 300$ мА?

2. В схеме двухполупериодного выпрямителя ток нагрузки $I_{н.ср} = 600$ мА. Можно ли в схеме использовать диоды типа Д229В, у которых наибольший средний прямой ток $I_{пр\ max} = 400$ мА?

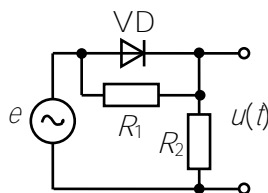
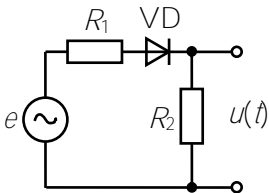
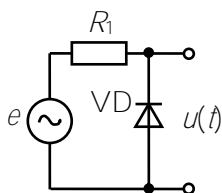
3. Определить частоту пульсаций основной гармоники напряжения на нагрузке трехфазного мостового выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту $f = 400$ Гц.

4. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя, если прямой ток каждого диода $I_{пр} = 150$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 430$ Ом.

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

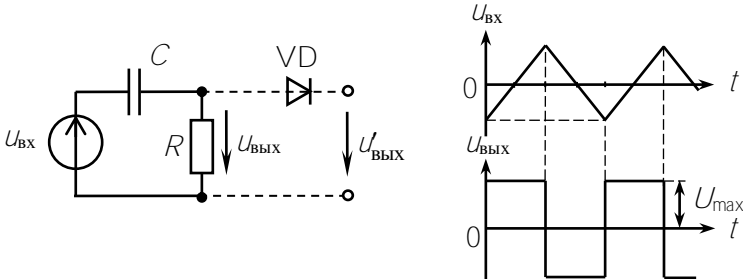
6. В схемах действует синусоидальная ЭДС $e = 15\sin\omega t$ В, сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = 10$ кОм. Начертить диаграммы напряжений $u(t)$ на выходе схем а, б, в.

а б в



Вариант 2

1. На вход дифференцирующей RC -цепи подключен источник напряжения $u_{\text{ВХ}}(t)$. На выходе формируются разнополярные прямоугольные импульсы $u_{\text{ВЫХ}}(t)$. Схема дифференциатора дополнена диодом VD. Начертить диаграмму $u'_{\text{ВЫХ}}(t)$, рассчитать среднее значение $U'_{\text{ВЫХ. ср}}$, если $U_{\text{max}} = 2$ В.



2. В однополупериодном выпрямителе амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{2m} = 12$ В, прямое сопротивление диода $R_{\text{пр}} = 20$ Ом, обратное сопротивление $R_{\text{обр}}$ считать равным бесконечности, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 100$ Ом. Определить амплитуды тока и напряжения нагрузки $I_{\text{н max}}$, $U_{\text{н max}}$, а также их средние значения $I_{\text{н. ср}}$, $U_{\text{н. ср}}$.

3. В однофазном мостовом выпрямителе $U_{2m} = 16$ В, амплитуда тока нагрузки $I_{\text{н max}} = 0,2$ А, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 50$ Ом. Определить прямое сопротивление диодов $R_{\text{пр}}$.

4. Для однополупериодного выпрямителя рассчитать необходимые параметры, затем выбрать диоды и трансформатор, если $U_{\text{н. ср}} = 1000$ В, $P_{\text{н}} = 10$ Вт.

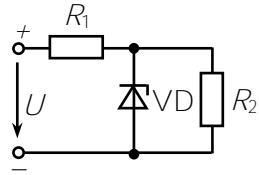
5. Определить емкость конденсатора, подключенного к выходу двухполупериодного выпрямителя для обеспечения коэффициента сглаживания $K_{\text{сгл}} = 100$, если $f_1 = 50$ Гц, $R_{\text{н}} = 1$ кОм.

6. Для однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя с нулевым выводом определить среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{н. ср}}$, если угол управления тиристоров $\alpha = 90^\circ$, амплитуда напряжения вторичной полуобмотки трансформатора $U_{2m} = 311$ В.

Рассмотреть режимы: а) активной нагрузки, б) индуктивной нагрузки. Начертить диаграммы $u_2(t)$, $u_{\text{н}}(t)$ для обоих режимов.

Вариант 3

1. Определить ток, проходящий через стабилитрон, если $U = 30$ В, $R_1 = R_2 = 20$ Ом, $U_{ст} = 12$ В.



2. Определить амплитуду напряжения на нагрузке в двухполупериодном выпрямителе, если прямой ток каждого диода $I_{пр} = 20$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 10$ Ом.

3. Для двухполупериодного мостового выпрямителя определить обратное напряжение на диодах, если ток в каждом диоде $I_{пр} = 250$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 500$ Ом.

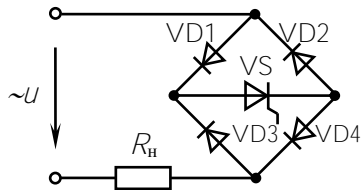
4. Вторичное напряжение трансформатора однополупериодного выпрямителя $U_2 = 200$ В. Среднее значение тока нагрузки $I_{н.ср} = 1$ А.

Определить индуктивность L -фильтра, если коэффициент пульсаций напряжения нагрузки $k_{п2} = 0,01$.

5. Прямой ток диодов трехфазного выпрямителя с нулевым выводом $I_{пр} = 3$ А. Сопротивление нагрузочного резистора $R_H = 10$ Ом.

Определить коэффициент трансформации трехфазного трансформатора, если линейное напряжение сети $U_{л} = 380$ В.

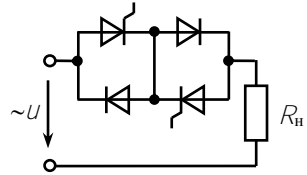
6. Начертить временную диаграмму напряжения на нагрузке, если $u = U_m \sin \omega t$, вентили – идеальные, а угол управления тиристора VS $\alpha = 90^\circ$.



Вариант 4

1. Начертить схему выпрямителя большой мощности, обеспечивающего наименьший уровень пульсаций напряжения на нагрузке при отсутствии сглаживающих фильтров и питании от промышленной сети.

2. Усовершенствовать схему, уменьшив число тиристоров так, чтобы форма напряжения на нагрузке не изменилась ($\alpha \neq 0$).



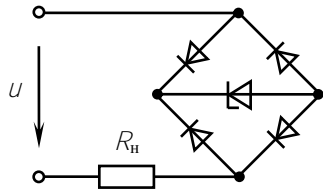
3. Составить схему однополупериодного выпрямителя для питания током приемника мощностью $P_n = 400$ Вт при напряжении $U_{н.ср} = 25$ В, применяя диод Д242Б с параметрами $I_{доп} = 10$ А, $U_{обр.макс} = 100$ В.

4. Сколько нужно диодов Д243Б с параметрами $I_{доп} = 2$ А, $U_{обр.макс} = 200$ В для двухполупериодного выпрямителя со средней точкой, чтобы питать приемник мощностью $P_n = 300$ Вт при напряжении $U_{н.ср} = 100$ В? Начертить схему выпрямителя.

5. При проверке трехфазного мостового выпрямителя случайно закоротили вентиль в катодной группе фазы В, установка отключилась. Какие вентили могли выйти из строя?

6. Начертить временную диаграмму напряжения на нагрузке R_n , если входное напряжение $u = 7\sin\omega t$ В, а номинальное напряжение стабилитрона $U_{ст} = 5$ В.

Диоды идеальные!



2. ТРАНЗИСТОРЫ И УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ

Задачи с решениями

Задача 2.1. По статическим характеристикам биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 2.1, а, б), для точки покоя ($I_{КП} = 10 \text{ мА}$, $U_{КЭП} = 5 \text{ В}$) определить h -параметры и начертить схему замещения.

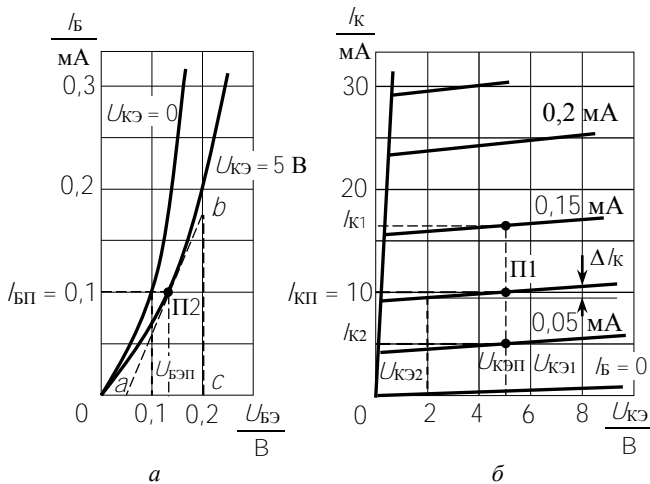


Рис. 2.1

Решение. На выходных характеристиках по $I_{КП} = 10 \text{ мА}$, $U_{КЭП} = 5 \text{ В}$ отмечаем точку покоя П1. Этому соответствует ток $I_{БП} = 0,1 \text{ мА}$.

По $I_{БП} = 0,1 \text{ мА}$ и $U_{КЭП} = 5 \text{ В}$ на входных характеристиках находим точку П2. В точке П2 проводим касательную к характеристике. Из Δabc находим

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} = \frac{ac}{bc} = \frac{0,2 - 0,05}{0,175 \cdot 10^{-3}} = 0,86 \text{ кОм}.$$

По смещению входных характеристик при $I_{Б} = 0,1 \text{ мА}$ определяем

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{0,03}{5} = 0,006.$$

По выходным характеристикам находим:

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{I_{K1} - I_{K2}}{\Delta I_B} = \frac{16,5 - 5}{0,1} = 115;$$

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{\Delta I_K}{U_{КЭ1} - U_{КЭ2}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{8 - 2} = 167 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

Схема замещения транзистора при $h_{12} = 0$ приведена на рис. 2.2.

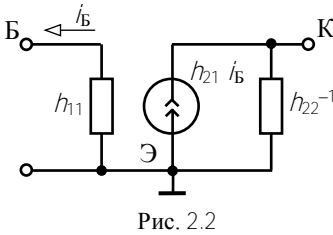


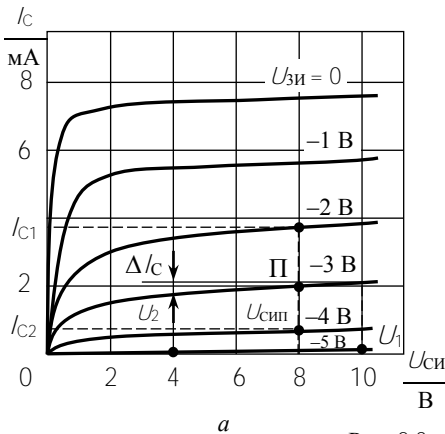
Рис. 2.2

Задача 2.2. Статические выходные характеристики полевого транзистора приведены на рис. 2.3, а. Определить крутизну и внутреннее сопротивление транзистора при $U_{СИП} = 8 \text{ В}$, $U_{ЗИП} = -3 \text{ В}$. Начертить схему замещения транзистора.

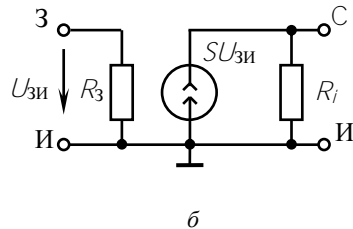
Решение. На характеристиках отмечаем точку покоя П с параметрами $U_{СИП} = 8 \text{ В}$ и $U_{ЗИП} = -3 \text{ В}$.

При постоянном $U_{СИП} = 8 \text{ В}$ и при изменении $\Delta U_{ЗИ} = \pm 1 \text{ В}$ находим крутизну характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{\Delta U_{ЗИ}} = \frac{(3,8 - 0,8) \cdot 10^{-3}}{2} = 1,5 \text{ мА/В.}$$



а



б

Рис. 2.3

Внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} = \frac{U_1 - U_2}{\Delta I_C} = \frac{10 - 4}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ кОм.}$$

При работе транзистора используется прямолинейный участок характеристик. Схема замещения транзистора приведена на рис. 2.3, б.

Задача 2.3. Схема усилительного каскада на транзисторе ГТ108А приведена на рис. 2.4, а. Рассчитать сопротивления R_1 , R_2 , R_K , R_3 резисторов, если $E_K = 12 \text{ В}$, $I_{КП} = 5 \text{ мА}$, $U_{ЭКП} = 5 \text{ В}$, $h_{21} = 115$, $U_{БП} = 0,1 \text{ В}$, $I_1 = 5 I_{БП}$, $R_3 = 0,1 R_K$.

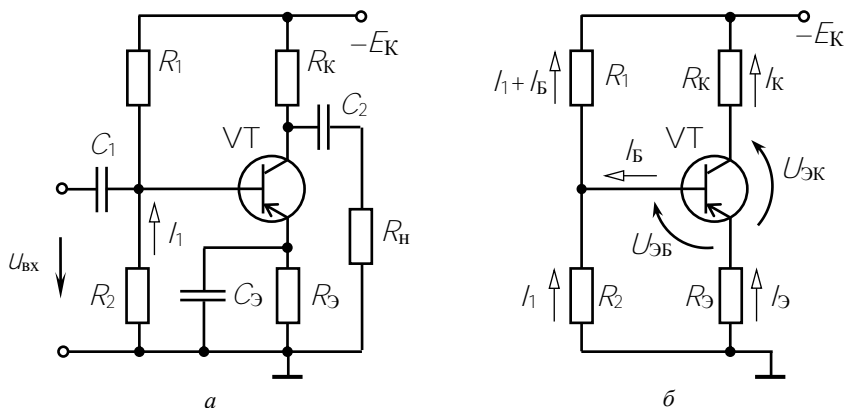


Рис. 2.4

Решение. В статическом режиме токи по элементам каскада проходят под действием источника ЭДС E_K . На постоянном токе сопротивление конденсаторов X_C равно бесконечности, что соответствует разрыву электрической цепи. Поэтому расчетная схема каскада принимает вид, показанный на рис. 2.4, б.

По второму закону Кирхгофа для контура E_K , R_K , VT , R_3

$$E_K = R_K I_K + U_{ЭК} + R_3 I_3.$$

Поскольку $h_{21} \gg 1$, то $I_K \approx I_3$, поэтому для заданной точки покоя:

$$R_K + R_3 = \frac{E_K - U_{ЭКП}}{I_{КП}} = \frac{12 - 5}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,4 \text{ кОм.}$$

$$R_K = \frac{R_{К} + R_{Э}}{1,1} = \frac{1,4}{1,1} = 1,27 \text{ кОм}; \quad R_{Э} = 0,13 \text{ кОм}.$$

Для контура R_2, VT, R_3

$$R_2 I_1 - U_{ЭБ} - R_3 I_{Э} = 0; \quad I_{БП} = \frac{I_{КП}}{h_{21}} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{115} \approx 0,04 \text{ мА};$$

$$I_1 = 5 I_{БП} = 5 \cdot 0,04 = 0,2 \text{ мА}; \quad I_{ЭП} \approx I_{КП};$$

$$R_2 = \frac{U_{ЭБП} + R_3 I_{КП}}{I_1} = \frac{0,1 + 0,13 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 3,75 \text{ кОм}.$$

Из уравнения $E_K = R_2 I_1 + R_1 (I_1 + I_{БП})$ находим:

$$R_1 = \frac{E_K - R_2 I_1}{I_1 + I_{БП}} = \frac{12 - 3,75 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{(0,2 + 0,04) \cdot 10^{-3}} = 46,9 \text{ кОм}.$$

Задача 2.4. Рассчитать сопротивления резисторов в схеме каскада на полевом транзисторе КП103М, включенном с общим истоком (рис. 2.5), при $E_C = 12 \text{ В}$, $I_{СП} = 4 \text{ мА}$, $U_{СИП} = -5 \text{ В}$, $U_{ЗИП} = 2 \text{ В}$.

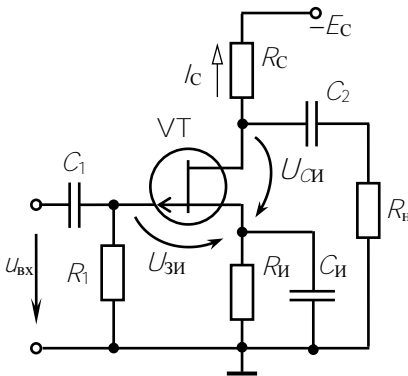


Рис. 2.5

Решение. В статическом режиме сопротивление конденсаторов X_C равно бесконечности, поэтому они представляют собой разрыв в электрической цепи. Их можно из схемы исключить.

Для контура $E_C, R_C, VT, R_{И}$ по второму закону Кирхгофа

$$E_C = R_C I_C + U_{ИС} + R_{И} I_C;$$

для заданной точки покоя

$$R_C + R_{И} = \frac{E_C - U_{ИСП}}{I_{СП}} = \frac{12 - 5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1,75 \text{ кОм.}$$

Затвор через резистор сопротивлением R_1 соединен с общей шиной, поэтому

$$U_{ЗИ} = R_{И} I_{И} = R_{И} I_C; \quad \text{откуда} \quad R_{И} = \frac{U_{ЗИП}}{I_{СП}} = \frac{2}{4 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \text{ кОм;}$$

$$R_C = 1,75 - 0,5 = 1,25 \text{ кОм.}$$

Сопротивление резистора R_1 стабилизирует входное сопротивление каскада и принимается равным $1 \dots 2 \text{ МОм}$.

Задача 2.5. Для каскада на транзисторе ГТ108А (см. рис. 2.4, а) начертить схему замещения в динамическом режиме и рассчитать динамические параметры при $h_{11} = 0,7 \text{ кОм}$, $h_{21} = 115$, $h_{22} = 170 \cdot 10^{-6} \text{ См}$, $R_K = 1,27 \text{ кОм}$, $R_1 = 47 \text{ кОм}$, $R_2 = 3,75 \text{ кОм}$, $R_{и} = 5 \text{ кОм}$.

Решение. В динамическом режиме токи в схеме проходят под действием источника переменного сигнала $U_{вх}$. Емкости конденсаторов каскада выбираем так, чтобы на частоте сигнала их сопротивления были малы, и ими можно было пренебречь. Внутреннее сопротивление источника E_K также приравниваем нулю, поэтому вывод $-E_K$ оказывается соединенным с общей точкой схемы (рис. 2.6, а).

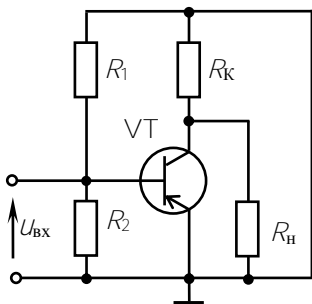
Сопротивления R_1 и R_2 включены параллельно, и мы заменяем их эквивалентным сопротивлением

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{47 \cdot 3,75}{47 + 3,75} = 3,47 \text{ кОм.}$$

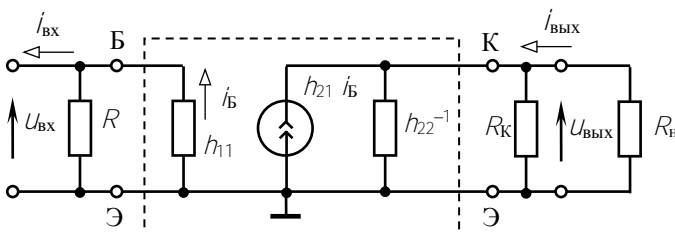
Представляя транзистор схемой замещения с h -параметрами (см. рис. 2.2), получаем расчетную схему каскада в динамическом режиме (рис. 2.6, б).

Для данной схемы находим:

$$R_{вх} = \frac{R h_{11}}{R + h_{11}} = \frac{3,47 \cdot 0,7}{3,47 + 0,7} = 0,58 \text{ кОм;}$$



a



б

Рис. 2.6

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{К}} h_{22}^{-1}}{R_{\text{К}} + h_{22}^{-1}} = \frac{R_{\text{К}}}{1 + h_{22} R_{\text{К}}} = \frac{1,27 \cdot 10^3}{1 + 170 \cdot 10^{-6} \cdot 1,27 \cdot 10^3} = 1,04 \text{ КОМ};$$

$$i_{\text{Б}} = \frac{u_{\text{ВХ}}}{h_{11}}; \quad u_{\text{ВЫХ}} = -h_{21} i_{\text{Б}} \frac{R_{\text{ВЫХ}} R_{\text{H}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}}} = -h_{21} \frac{u_{\text{ВХ}}}{h_{11}} \frac{R_{\text{ВЫХ}} R_{\text{H}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}}};$$

$$K_U = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ВХ}}} = -h_{21} \frac{R_{\text{ВЫХ}} R_{\text{H}}}{h_{11} (R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}})} = -115 \cdot \frac{1,04 \cdot 5}{0,7(1,04 + 5)} = -141;$$

$$h_{22}^{-1} \gg R_{\text{К}} \parallel R_{\text{H}};$$

$$i_{\text{ВХ}} = \frac{u_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Б}}}; \quad i_{\text{ВЫХ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{H}}} = -h_{21} \frac{u_{\text{ВХ}}}{h_{11}} \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{H}}};$$

$$K_I = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = -h_{21} \frac{R_{\text{ВХ}}}{h_{11}} \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}} = -115 \cdot \frac{0,58}{0,7} \frac{1,04}{1,04 + 5} = -16,4;$$

$$K_P = K_U K_I = 141 \cdot 16,4 = 2312.$$

Задача 2.6. Для каскада на полевом транзисторе КП103М, включенном с общим истоком (см. рис. 2.5), начертить схему замещения в динамическом режиме и рассчитать динамические параметры при $S = 1,5 \text{ мА/В}$, $R_i = 30 \text{ кОм}$, $R_1 = 1 \text{ МОм}$, $R_C = 1,25 \text{ кОм}$, $R_{\text{Н}} = 5 \text{ кОм}$.

Решение. На частоте входного сигнала $u_{\text{вх}}$ пренебрегаем сопротивлением конденсаторов C_1 , C_2 , $C_{\text{и}}$ ($X_C \rightarrow 0$) и внутреннее сопротивление источника E_C принимаем равным нулю. Если заменить полевой транзистор его схемой замещения (рис. 2.3, б), то получим расчетную схему, приведенную на рис. 2.7. В этой схеме сопротивление затвор – исток $R_3 = 10^9 \text{ Ом} \gg R_1 = 1 \text{ МОм}$ и $R_i = 30 \text{ кОм} \gg \gg R_C = 1,25 \text{ кОм}$, поэтому при расчете ими можно пренебречь.

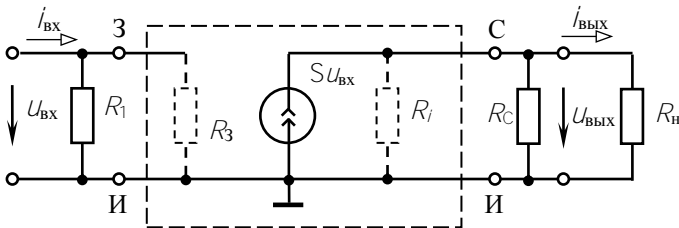


Рис. 2.7

Тогда для упрощенной схемы имеем:

$$R_{\text{ВХ}} = R_1 = 1 \text{ МОм}; \quad R_{\text{ВЫХ}} = R_C = 1,25 \text{ кОм};$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = S U_{\text{ВХ}} \frac{R_C R_{\text{Н}}}{R_C + R_{\text{Н}}};$$

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = S \frac{R_C R_{\text{Н}}}{R_C + R_{\text{Н}}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,25 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^3}{1,25 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3} = 1,5;$$

$$i_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}; \quad i_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{H}}} = S U_{\text{ВХ}} \frac{R_{\text{C}}}{R_{\text{C}} + R_{\text{H}}};$$

$$K_I = \frac{i_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВХ}}} = S \frac{R_{\text{C}} R_1}{R_{\text{C}} + R_{\text{H}}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,25 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{1,25 \cdot 10^3 + 5 \cdot 10^3} = 300;$$

$$K_P = K_U K_I = 450.$$

Поскольку входное сопротивление каскада велико, то коэффициент усиления по току K_I может быть очень большим.

Входная мощность каскада на полевом транзисторе

$$P_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}^2 m}{2 R_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВХ}}^2 m}{2 \cdot 10^6},$$

а для каскада на биполярном транзисторе (см. задачу 2.5)

$$P_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}^2 m}{2 \cdot 0,58 \cdot 10^3}.$$

Таким образом, каскад на полевом транзисторе потребляет от источника сигнала почти в 2000 раз меньшую мощность, чем на биполярном транзисторе.

Задача 2.7. На рис. 2.8 приведена упрощенная схема дифференциального каскада на идентичных транзисторах VT1 и VT2 с $h_{21} = 50$, $R_{\text{К}} = 1,2 \text{ кОм}$, $E_{\text{К}} = 12 \text{ В}$, $I_0 = 10 \text{ мА}$.

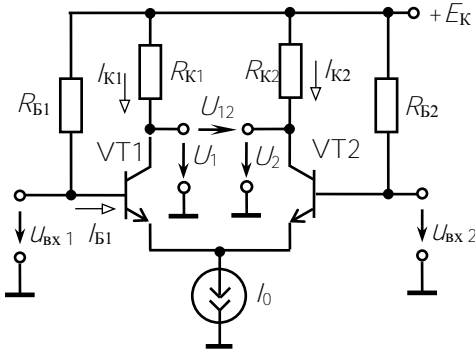


Рис. 2.8

Определить выходные напряжения U_1 , U_2 , U_{12} , при отсутствии входных сигналов и при увеличении тока базы транзистора VT1 на $\Delta I_{\text{Б1}} = 0,02 \text{ мА}$. Влиянием резисторов $R_{\text{Б1}}$ и $R_{\text{Б2}}$ пренебречь.

Решение. При отсутствии входных сигналов режимы работы транзисто-

ров задаются одинаковыми резисторами $R_{Б1}$ и $R_{Б2}$, поэтому $I_{К1} = I_{К2}$. Принимая $I_{К} \approx I_{Э}$ и учитывая генератор тока I_0 , имеем

$$I_{К1} = I_{К2} = \frac{I_0}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2} = 5 \text{ мА.}$$

Тогда получаем:

$$U_1 = E_{К} - R_{К} I_{К1} = 12 - 1,2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ В;}$$

$$U_2 = E_{К} - R_{К} I_{К2} = 12 - 1,2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ В;}$$

$$U_{12} = U_1 - U_2 = 6 - 6 = 0.$$

При увеличении тока базы транзистора VT1 на $\Delta I_{Б1} = 0,02 \text{ мА}$ ток $I_{К1}$ увеличивается на $\Delta I_{К1} = h_{21} \Delta I_{Б1} = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ мА}$ и будет иметь значение

$$I'_{К1} = 5 + 1 = 6 \text{ мА.}$$

При этом ток $I_{К2}$ изменится до значения

$$I'_{К2} = I_0 - I'_{К1} = 10 - 6 = 4 \text{ мА.}$$

Выходные напряжения равны соответственно:

$$U_1 = E_{К} - R_{К} I'_{К1} = 12 - 1,2 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 4,8 \text{ В;}$$

$$U_2 = E_{К} - R_{К} I'_{К2} = 12 - 1,2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 7,2 \text{ В;}$$

$$U_{12} = U_1 - U_2 = 4,8 - 7,2 = -2,4 \text{ В.}$$

Задача 2.8. Усилитель имеет динамические параметры $K_U = 141$, $R_{вх} = 0,58 \text{ кОм}$, $R_{вых} = 1,04 \text{ кОм}$ и охвачен отрицательной обратной связью по напряжению. Определить динамические параметры этого усилителя с учетом отрицательной обратной связи (ООС), если коэффициент передачи цепи обратной связи $\beta = 0,01$.

Решение. Вычисляем

$$K_{ОС} = \frac{K_U}{1 + \beta K_U} = \frac{141}{1 + 0,01 \cdot 141} = 58,5;$$

$$R_{\text{вх OC}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta K_U) = 0,58 \cdot 10^3 (1 + 0,01 \cdot 141) = 1,4 \text{ кОм};$$

$$R_{\text{вых OC}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + \beta K_U} = \frac{1,04 \cdot 10^3}{1 + 0,01 \cdot 141} = 0,43 \text{ кОм}.$$

Задача 2.9. Однотактный трансформаторный каскад усиления мощности на транзисторе ГТ404А включен на нагрузку $R_{\text{н}} = 4 \text{ Ом}$ (рис. 2.9). Предельные параметры транзистора: $P_{\text{К доп}} = 600 \text{ мВт}$,

$U_{\text{К доп}} = 25 \text{ В}$, $I_{\text{К доп}} = 0,5 \text{ А}$, $h_{21} = 50$.

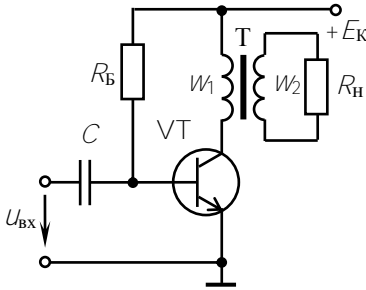


Рис. 2.9

Определить коэффициент трансформации трансформатора $n = W_1/W_2$, обеспечивающий получение максимальной выходной мощности без искажений сигнала, и эту мощность $P_{\text{н max}}$, если $E_{\text{К}} = 12 \text{ В}$. Нелинейностью характеристик транзистора и потерями в трансформаторе пренебречь. Рассчитать выходную мощность при $n = 1$.

Решение. Для полного использования транзистора по мощности выбираем точку покоя $U_{\text{КЭП}} = 12 \text{ В}$, при этом

$$I_{\text{КП}} = \frac{P_{\text{К доп}}}{U_{\text{КЭП}}} = \frac{600 \cdot 10^{-3}}{12} = 50 \text{ мА}.$$

Амплитуды переменных составляющих тока и напряжения во избежание искажений, должны быть равны:

$$I_{\text{К м}} \leq I_{\text{КП}} = 50 \text{ мА}; \quad U_{\text{КЭ м}} \leq U_{\text{КЭП}} = 12 \text{ В}.$$

Примем $I_{\text{К м}} = 50 \text{ мА}$, $U_{\text{КЭ м}} = 12 \text{ В}$.

Приведенное сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{КЭ м}}}{I_{\text{К м}}} = \frac{12}{0,05} = 240 \text{ Ом}.$$

Тогда

$$n = \sqrt{R_{\text{н}}/R_{\text{н}}} = \sqrt{240/4} = 7,75;$$

$$P_{H \max} = \frac{R_H I_{Km}^2}{(\sqrt{2})^2} = \frac{240 \cdot 0,05^2}{2} = 0,3 \text{ Вт.}$$

При $n = 1$

$$R'_H = R_H = 4 \text{ Ом,} \quad P_H = \frac{R_H I_{Km}^2}{2} = \frac{4 \cdot 0,05^2}{2} = 0,005 \text{ Вт.}$$

Задача 2.10. В параметрическом стабилизаторе тока на транзисторе КТ818Б (рис. 2.10) рассчитать сопротивления резисторов R_1 , R_3 и найти, в каких пределах может изменяться сопротивление резистора R_H , чтобы осуществлялась стабилизация тока, если $E_{II} = 20 \text{ В}$, $U_{CT} = 3,3 \text{ В}$, $I_{CT} = 10 \text{ мА}$, $U_{ЭБ} = 0,6 \text{ В}$, $I_H = 2 \text{ А}$, $U_{ЭК \min} = 2 \text{ В}$. Определить мощность резисторов R_1 , R_3 .

Решение. По второму закону Кирхгофа для контура R_3 , VT, VD

$$U_{CT} - U_{ЭБ} = R_3 I_3.$$

Так как $h_{21} \gg 1$, то $I_K \approx I_3$, поэтому

$$R_3 = \frac{U_{CT} - U_{ЭБ}}{I_3} = \frac{U_{CT} - U_{ЭБ}}{I_K} = \frac{3,3 - 0,6}{2} = 1,35 \text{ Ом.}$$

Для контура E_{II} , VD, R_1

$$E_{II} = U_{CT} + R_1 I_1,$$

откуда

$$R_1 = \frac{E_{II} - U_{CT}}{I_1} = \frac{20 - 3,3}{30 \cdot 10^{-3}} = 0,557 \text{ кОм,}$$

где

$$I_1 = I_{CT} + I_B = 10 + 20 = 30 \text{ мА;} \quad I_B = I_H / h_{21} = 2 / 100 = 0,02 \text{ А.}$$

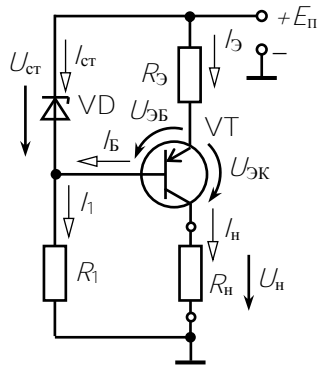


Рис. 2.10

Для контура $E_{\Pi}, R_{\Xi}, VT, R_{H \max}$

$$E_{\Pi} = R_{\Xi} I_{\Xi} + U_{\Xi K \min} + R_{H \max} I_H,$$

откуда

$$R_{H \max} = \frac{E_{\Pi} - R_{\Xi} I_{\Xi} - U_{\Xi K \min}}{I_H} = \frac{20 - 1,35 \cdot 2 - 2}{2} = 7,65 \text{ Ом.}$$

Значит, сопротивление нагрузки $R_H = 0 \dots 7,65 \text{ Ом.}$

Определяем мощности резисторов:

$$P_1 \geq R_1 I_1^2 = 557 \cdot 0,03^2 = 0,5 \text{ Вт}, \quad P_3 \geq R_3 I_3^2 = 1,35 \cdot 2^2 = 5,4 \text{ Вт.}$$

Задача 2.11. Рассчитать сопротивление компенсационного стабилизатора постоянного напряжения (рис. 2.11) при $U_{K\Xi \min} = 2 \text{ В}$, $I_H = 2 \text{ А}$, $U_{BX} = 24 \text{ В}$, $U_{ВЫХ} = 12 \text{ В}$, $h_{21} = 100$, $U_{БЭ1} = U_{БЭ2} = 0,6 \text{ В}$, $U_{CT} = 5,6 \text{ В}$, $I_{CT} = 10 \text{ мА}$, $I_2 = 5 \text{ мА}$, $I_4 = 5 I_{B2}$.

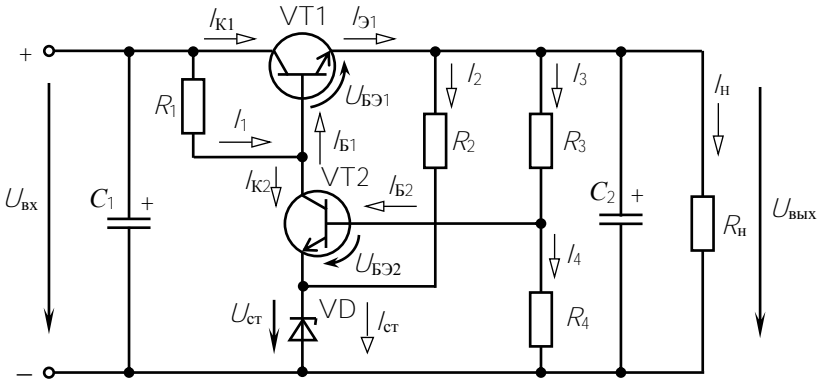


Рис. 2.11

Решение. Поскольку $I_K \gg I_B$, то $I_K \approx I_{\Xi}$, тогда ток базы транзистора VT1

$$I_{B1} = I_{K1} / h_{21} \approx I_H / h_{21} = 2 / 100 = 0,02 \text{ А.}$$

Ток коллектора транзистора VT2

$$I_{K2} = I_{CT} - I_2 = 10 - 5 = 5 \text{ мА.}$$

Ток, проходящий через резистор R_1

$$I_1 = I_{Б1} + I_{К2} = 20 + 5 = 25 \text{ мА} .$$

Для контура $U_{ВХ}, R_1, VT1, R_H$

$$U_{ВХ} = I_1 R_1 + U_{БЭ1} + U_{ВЫХ} ,$$

откуда

$$R_1 = \frac{U_{ВХ} - U_{ВЫХ} - U_{БЭ1}}{I_1} = \frac{24 - 12,0 - 0,6}{25 \cdot 10^{-3}} \approx 0,47 \text{ кОм} .$$

Для контура R_H, R_2, VD :

$$R_2 = \frac{U_{ВЫХ} - U_{СТ}}{I_2} = \frac{12,0 - 5,6}{5 \cdot 10^{-3}} = 1,3 \text{ кОм} .$$

Ток базы транзистора $VT2$

$$I_{Б2} = \frac{I_{К2}}{h_{21}} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ мА} .$$

По условию задачи ток делителя

$$I_4 = 5 I_{Б2} = 5 \cdot 0,05 = 0,25 \text{ мА} .$$

Для контура $R_4, VT2, VD$

$$U_{R4} = U_{СТ} + U_{БЭ2} = 5,6 + 0,6 = 6,2 \text{ В} ,$$

тогда

$$R_4 = U_{R4} / I_4 = 6,2 / (0,25 \cdot 10^{-3}) \approx 24 \text{ кОм} .$$

Ток, проходящий через резистор сопротивлением R_3 ,

$$I_3 = I_4 + I_{Б2} = 0,25 + 0,05 = 0,3 \text{ мА} .$$

Для контура R_3, R_4, R_H напряжение

$$U_{R3} = U_{ВЫХ} - U_{R4} = 12 - 6,2 = 5,8 \text{ В} ,$$

тогда

$$R_3 = U_{R3} / I_3 = 5,8 / (0,3 \cdot 10^{-3}) \approx 20 \text{ кОм} .$$

Задача 2.12. Найти коэффициент усиления по току транзистора, составленного по схеме Дарлингтона (рис. 2.12), если $h_{21\text{Э}1} = h_{21\text{Э}2} = 50$.

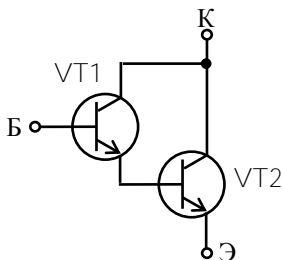


Рис. 2.12

Решение. Для составного транзистора коэффициент усиления по току

$$\begin{aligned}
 h_{21\text{Э}} &= h_{21\text{Э}1} + \\
 &+ \frac{(h_{21\text{Э}2} - h_{22\text{Э}1}h_{11\text{Э}2})(1 + h_{21\text{Э}1})}{1 + h_{22\text{Э}1}h_{11\text{Э}2}} \approx \\
 &\approx h_{21\text{Э}1} + h_{21\text{Э}2} + h_{21\text{Э}1}h_{21\text{Э}2} = \\
 &= 50 + 50 + 50 \cdot 50 = 2600.
 \end{aligned}$$

Контрольные задачи

Задача 2.13. По статическим характеристикам транзистора КТ315В, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 2.13), для точки покоя $U_{\text{КЭП}} = 10 \text{ В}$, $I_{\text{БП}} = 0,4 \text{ мА}$ определить h -параметры и начертить схему замещения транзистора.

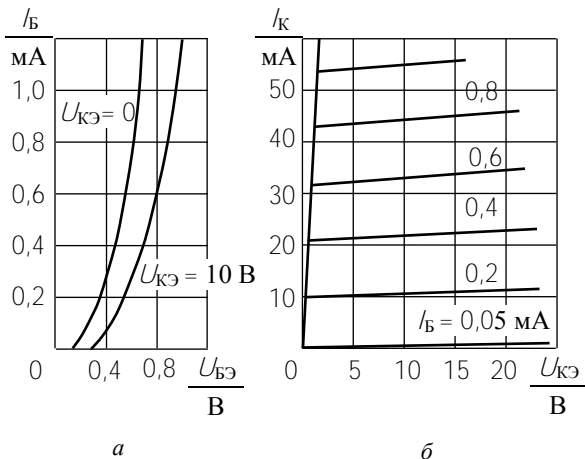


Рис. 2.13

Задача 2.14. В биполярном транзисторе $I_K = 10$ мА, $I_Э = 10,5$ мА.

Определить коэффициенты передачи тока α и β , если тепловым током можно пренебречь.

Задача 2.15. Биполярный транзистор с $\beta = 100$ имеет $I_B = 10$ мкА.

Определить I_K и $I_Э$, если тепловым током можно пренебречь. Сравнить токи I_K и $I_Э$.

Задача 2.16. По выходным характеристикам транзистора КТ315В (рис. 2.13) определить I_B и $U_{КЭ}$ в рабочей точке, если $I_K = 25$ мА, а рассеиваемая на коллекторе мощность $P_K = 150$ мВт.

Задача 2.17. Определить крутизну характеристики S и внутреннее сопротивление R_i полевого транзистора КП103М по статическим характеристикам при $U_{СИ} = 6$ В, $U_{ЗИ} = 4$ В.

Рассчитать коэффициент усиления $\mu = SR_i$.

Задача 2.18. Полевой транзистор имеет следующие параметры: $S = 2$ мА/В, $R_i = 200$ кОм. Рассчитать приращение напряжения $\Delta U_{СИ}$, чтобы ток стока I_C остался прежним, если напряжение $U_{ЗИ}$ изменилось на $0,05$ В.

Задача 2.19. Для каскада на транзисторе ГТ108А, схема которого приведена на рис. 2.4, а заданы $E_K = 10$ В, $U_{ЭК} = 5$ В, $U_{БЭ} = 0,15$ В, $R_K = 900$ Ом, $R_Э = 100$ Ом, $h_{21} = 100$. Рассчитать токи I_K , I_B и сопротивления резисторов R_1 и R_2 , если $I_1 = 5 I_B$.

Задача 2.20. Для каскада, схема которого приведена на рис. 2.14, определить R_K и R_B , если $E_K = 12$ В, $U_{БЭ} = 0,6$ В, $h_{21} = 50$, $U_{КЭ} = 4,5$ В, $I_K = 2,5$ мА.

Задача 2.21. Для каскада, схема которого приведена на рис. 2.14, определить $U_{КЭ}$ при $E_K = 12$ В, $U_{БЭ} = 0,6$ В, $R_B = 50$ кОм, $R_K = 1$ кОм, $h_{21} = 25$.

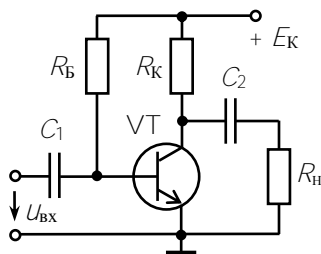


Рис. 2.14

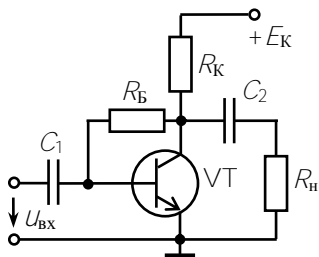


Рис. 2.15

Задача 2.22. В усилительном каскаде (рис. 2.15) $E_K = 10$ В, $I_K = 2$ мА, $U_{KЭ} = 5$ В, $U_{БЭ} = 0,4$ В, $h_{21} = 100$.

Записать уравнения согласно второму закону Кирхгофа для входной и выходной цепей в режиме покоя и определить R_K и R_B .

Задача 2.23. На рис. 2.16 приведена схема балансного каскада на

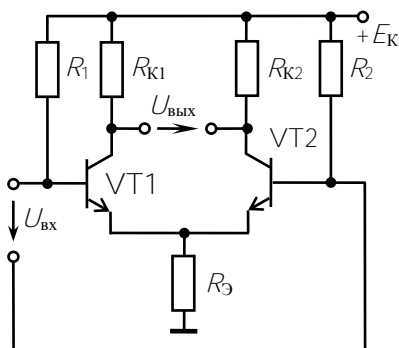


Рис. 2.16

идентичных транзисторах VT1 и VT2 с $h_{21} = 50$. При отключенном входе $I_{Б1} = I_{Б2} = 0,02$ мА, $U_{БЭ1} = U_{БЭ2} = 0,5$ В, $U_{КЭ1} = U_{КЭ2} = 5$ В.

Определить сопротивления R_1 , $R_{К1}$, R_2 , $R_{К2}$ резисторов и $U_{ВЫХ}$, если $E_K = 12$ В и $R_Э = 500$ Ом.

Изменится ли $U_{ВЫХ}$, если E_K уменьшится до 10 В?

включенном по схеме с общим истоком (см. рис. 2.5), если $E_C = 12$ В, $S = 2$ мА/В, $U_{СИ} = 4$ В, $U_{ЗИ} = 2$ В.

Задача 2.25. Составить схему замещения каскада (см. рис. 2.14) и рассчитать его динамические параметры при $h_{21} = 50$, $h_{11} = 1$ кОм, $R_B = 120$ кОм, $R_K = 5$ кОм для трех значений сопротивления нагрузки: $R_{Н1} = 0,5$ кОм, $R_{Н2} = 5$ кОм, $R_{Н3} = 15$ кОм.

Как зависит режим работы каскада от сопротивления нагрузки? Параметрами h_{12} и h_{22} транзистора пренебречь.

Задача 2.26. Составить схему замещения каскада, приведенного на рис. 2.15, и рассчитать его динамические параметры при $h_{11} = 1$ кОм, $h_{21} = 100$, $R_B = 50$ кОм, $R_K = 1,2$ кОм, $R_H = 5$ кОм. Параметрами h_{12} и h_{22} транзистора пренебречь.

Задача 2.27. Схема каскада на полевом транзисторе со встроенным n -каналом показана на рис. 2.17. Составить схему замещения каскада для динамического режима и рассчитать его динамические параметры при $R_1 = 5 \text{ МОм}$, $R_2 = 1 \text{ МОм}$, $R_C = 12 \text{ кОм}$, $R_H = 20 \text{ кОм}$, $S = 2 \text{ мА/В}$, $R_i = 200 \text{ кОм}$.

Задача 2.28. Решить задачу 2.7 с учетом того, что транзисторы VT1 и VT2 имеют разные коэффициенты передачи тока: $h_{21}^{(1)} = 50$; $h_{21}^{(2)} = 40$.

Задача 2.29. Усилитель имеет коэффициент усиления $K_U = 100$ и охвачен положительной обратной связью по напряжению с коэффициентом передачи $\beta = 0,01$. Определить коэффициент усиления K_{OC} усилителя с обратной связью.

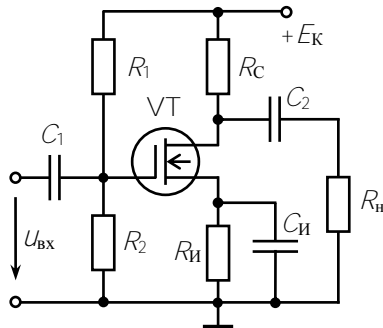


Рис. 2.17

Задача 2.30. Усилитель имеет следующие динамические параметры: $K_U = 250$, $R_{вх} = 0,5 \text{ кОм}$, $R_{вых} = 1 \text{ кОм}$. Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи β , который позволит повысить входное сопротивление до 2 кОм . Определить параметры усилителя с учетом ООС.

Задача 2.31. Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов $K_{U1} = 100$ и $K_{U2} = 20$ охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с $\beta = 0,02$. Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

Задача 2.32. Рассчитать мощность источника питания и максимальную мощность P_K транзистора однотактного трансформаторного каскада усиления мощности, если $P_{н \text{ max}} = 0,5 \text{ Вт}$.

Задача 2.33. Какую максимальную мощность можно получить от двухтактного каскада усиления мощности, если транзисторы работают в классе В и имеют $P_{к \text{ доп}} = 0,6 \text{ Вт}$?

Задача 2.34. В параметрическом стабилизаторе тока на транзисторе КТ819Б (рис. 2.18) $E_{\Pi} = 25 \text{ В}$, $U_{\text{ст}} = 5,6 \text{ В}$, $U_{\text{БЭ}} = 0,6 \text{ В}$, $U_{\text{КЭ min}} = 2 \text{ В}$. Ток стабилизации $I_{\text{ст}} = 10 \text{ мА}$, $I_{\text{н}} = 0,5 \text{ А}$, $h_{21} = 50$.

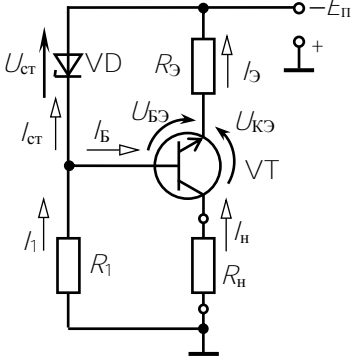


Рис. 2.18

Определить сопротивления резисторов R_1 и R_3 , $R_{\text{н max}}$, максимальную мощность $P_{\text{К max}}$, рассеиваемую на коллекторе VT , и мощности, рассеиваемые на резисторах R_1 , R_3 , $R_{\text{н}}$.

Задача 2.35. Определить коэффициент усиления напряжения двухкаскадного усилителя на низкой частоте $\omega_{\text{н}}$, если коэффициенты усиления отдельных каскадов $K_{U1 \text{ max}} = 10$ и $K_{U2 \text{ max}} = 20$ уменьшаются на частоте $\omega_{\text{н}}$ в $\sqrt{2}$ раз?

Задача 2.36. Определить β транзисторной пары (рис. 2.19), если для отдельных транзисторов $\beta_1 = \beta_2 = 10$.

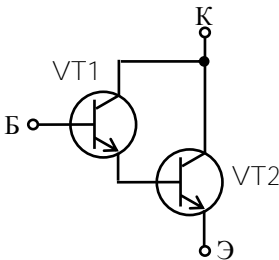


Рис. 2.19

Ответы к контрольным задачам

- 2.14. $\alpha = 0,95, \beta = 20$.
 2.15. $I_K = 1 \text{ мА}, I_\Omega = 1,01 \text{ мА}$.
 2.16. $I_B = 0,46 \text{ мА}, U_{KЭ} = 6 \text{ В}$.
 2.18. $\Delta U_{СИ} = 20 \text{ В}$.
 2.19. $I_K = 5 \text{ мА}, I_B = 0,05 \text{ мА}, R_1 = 31,3 \text{ кОм}, R_2 = 2,6 \text{ кОм}$.
 2.20. $R_K = 3 \text{ кОм}, R_B = 228 \text{ кОм}$.
 2.21. $U_{KЭ} = 6,3 \text{ В}$.
 2.22. $R_K = 2,47 \text{ кОм}, R_B = 230 \text{ кОм}$.
 2.23. $R_{K1} = R_{K2} = 6 \text{ кОм}, R_1 = R_2 = 525 \text{ кОм}, U_{\text{ВЫХ}} = 0$.
 2.24. $R_C = 1,5 \text{ кОм}, R_{II} = 0,5 \text{ кОм}$.
 2.25. $R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ кОм}, R_{\text{ВЫХ}} = 5 \text{ кОм}$.

$R_{\text{Н}}, \text{кОм}$	K_U	K_I	K_P
0,5	22,7	45,4	1030
5	125	25	3125
15	187,5	12,5	2344

- 2.26. $R_{\text{ВХ}} = 1,1 \text{ кОм}, R_{\text{ВЫХ}} = 1,2 \text{ кОм}, K_U = 95, K_I = 87$.
 2.27. $R_{\text{ВХ}} = 830 \text{ кОм}, R_{\text{ВЫХ}} = 12 \text{ кОм}, K_U = 15$.
 2.28. $U_1 = 5,3 \text{ В}, U_2 = 6,7 \text{ В}, U_{12} = -1,4 \text{ В}$.
 2.29. $K_{OC} \rightarrow \infty$.
 2.30. $\beta = 0,012, K_{OC} = 62,5, R_{\text{ВХ}} = 2 \text{ кОм}, R_{\text{ВЫХ}} = 0,25 \text{ кОм}$.
 2.31. $K_{OC} = 48,8$.
 2.32. $P_{II} = P_K \geq 1 \text{ Вт}$.
 2.33. При $\eta = 0,7$ $P_{II} = 2,8 \text{ Вт}$.
 2.34. $R_1 = 1 \text{ кОм}, R_\Omega = 10 \text{ Ом}, R_{\text{H max}} = 36 \text{ Ом}$,
 $P_{K \text{ max}} = 10 \text{ Вт}, P_{R1} = 0,39 \text{ Вт}, P_{R\Omega} = 2,5 \text{ Вт}, P_{\text{H max}} = 9 \text{ Вт}$.

**Тест 2.1 для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов
Вариант 1**

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

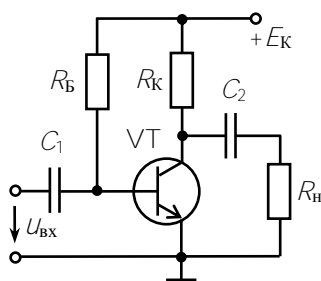
2. Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы $h_{21Э} = 10 \dots 100$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б}$.

3. Биполярный транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы $\beta = 100$, включен по схеме с общим эмиттером. Определить ток базы I_B , ток эмиттера I_E , коэффициент передачи тока эмиттера α , если ток коллектора $I_K = 1 \text{ мА}$, а током I_{K0} можно пренебречь.

4. Усилитель имеет следующие динамические параметры: $K_U = 100$, $R_{вх} = 1 \text{ кОм}$, $R_{вых} = 10 \text{ кОм}$. Рассчитать коэффициент передачи β цепи обратной связи, которая позволит повысить входное сопротивление до 5 кОм . Определить параметры усилителя с учетом отрицательной обратной связи (ООС).

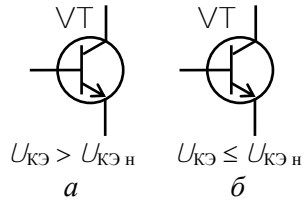
5. Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов $K_{U1} = 50$ и $K_{U2} = 60$ охвачен общей ООС по напряжению с $\beta = 0,01$. Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

6. Для каскада определить R_K и R_B , если $E_K = 12 \text{ В}$, $U_{БЭ} = 0,6 \text{ В}$, $h_{21} = 100$, $U_{КЭ} = 6 \text{ В}$, $I_K = 5 \text{ мА}$.



Вариант 2

1. Укажите полярность источников напряжения, приложенного к n - p -переходам транзистора: а) на пологом ($U_{КЭ} > U_{КЭ,н}$) и б) крутом ($U_{КЭ} \leq U_{КЭ,н}$) участках выходных характеристик транзистора. На каком участке (а или б) транзистор теряет свойства усилительного элемента?



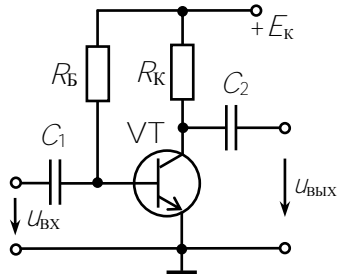
2. Как изменится эмиттерный ток транзистора при увеличении $U_{КЭ}$ ($U_{КЭ} > U_{КЭ,н}$), если ток базы поддерживается постоянным? При $I_B = 10$ мкА и $\beta = 50$ определить токи I_K , $I_Э$.

3. Определить выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ и коэффициент усиления напряжения $K_{ОС}$ усилителя с последовательной обратной связью, если на вход усилителя, кроме входного сигнала $U_{ВХ} = 0,2$ В, подано напряжение обратной связи $U_{ОС} = 0,1$ В, действующее в противофазе с входным. Коэффициент усиления без обратной связи $K_U = 20$.

4. В режиме холостого хода на выходе усилителя $U_{ВЫХ} = 2$ В, а при подключении нагрузки $R_H = 2$ кОм $U_{ВЫХ} = 1$ В. Рассчитайте $R_{ВЫХ}$ усилителя.

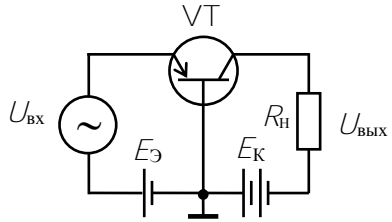
5. Определить амплитуду максимально возможного синусоидального напряжения на выходе усилителя $U_{ВХ\ m}$, при котором усилитель работает в режиме А без отсечки выходного напряжения. Коэффициент усиления $K_U = 30$, напряжение источника питания $E_K = 12$ В.

6. Используя схему замещения каскада в динамическом режиме, определить амплитуду входного напряжения $U_{ВХ\ m}$, при котором мощность в нагрузке $P_{ВЫХ} = 1$ мВт, если $h_{21} = 50$, $h_{11} = 1$ кОм, $R_H = 2$ кОм, $R_K = 3$ кОм.



Вариант 3

1. Входное напряжение изменилось на $\Delta U_{вх} = 0,1$ В, при этом ток эмиттера изменился на $\Delta I_{э} = 50$ мА. Коэффициент $\alpha = 0,98$, сопротивление нагрузки $R_{н} = 1$ кОм. Определить коэффициент усиления по напряжению.

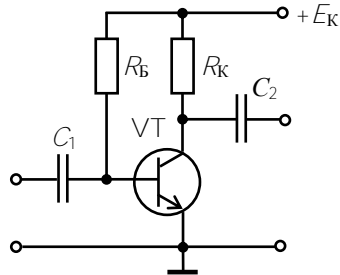


2. При включении транзистора по схеме с ОБ коэффициент передачи тока $\alpha = 0,98$. Сопротивление нагрузки $R_{н} = 5$ кОм.

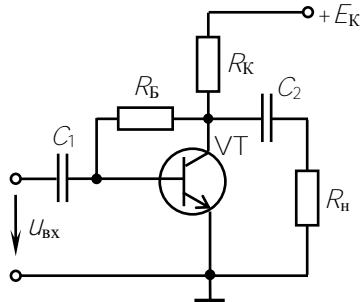
Определить входное сопротивление транзистора, если те же элементы включить по схеме с ОК.

3. На выходе двухкаскадного усилителя напряжение $U_{вых} = 2$ В. Определить напряжение на входе каждого каскада, если коэффициенты усиления напряжения первого каскада $K_{U1} = 40$, второго – $K_{U2} = 20$.

4. Для усилительного каскада определить сопротивления $R_{б}$ и $R_{к}$, необходимые для обеспечения в рабочей точке коллекторного тока $I_{кп} = 20$ мА при токе базы $I_{бп} = 0,6$ мА. Напряжение источника $E_{к} = 12$ В.



5. В транзисторном усилительном каскаде коэффициент усиления напряжения $K_U = 35$. Определить коэффициенты усиления тока K_I и мощности K_P , если входное сопротивление каскада $R_{вх} = 500$ Ом, а сопротивление нагрузки $R_{н} = 1$ кОм.



6. Определить сопротивления $R_{к}$ и $R_{б}$, если $E_{к} = 15$ В, $\eta_{21} = 100$, $U_{кэп} = 6$ В, $U_{бэп} = 0,3$ В, $I_{бп} = 10$ мкА.

3. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Задачи с решениями

Задача 3.1. На основе операционного усилителя (ОУ) типа К140УД7 с параметрами: $E_{\Pi} = \pm 15$ В, $K_{U\text{ОУ}} = 30000$, $U_{\text{ВЫХ max}} = \pm 10,5$ В, $R_{\text{ВХ ОУ}} = 0,4$ МОм; $R_{\text{ВЫХ ОУ}} = 0,1$ кОм; разность входных токов $\Delta I_{\text{ВХ}} = 0,2$ мкА; $I_{\text{ВХ}} = 0,4$ мкА, проектируется инвертирующий усилитель низкой частоты. Требуемый коэффициент усиления напряжения $K_U = -20$, минимальное входное напряжение $U_{\text{ВХ min}} = 10$ мВ.

Определить сопротивления резисторов схемы усилителя, входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления усилителя с обратной связью, напряжение $U_{\text{ВХ max}}$, при котором не будет искажения сигнала. Сопротивлением нагрузки пренебречь.

Решение. Для упрощения расчета считаем ОУ идеальным, т.е. $K_{U\text{ОУ}} = \infty$, $R_{\text{ВХ ОУ}} = \infty$. Тогда входное сопротивление инвертирующего усилителя (рис. 3.1) $R_{\text{ВХ}} = R_1$. Его желательно иметь большим, чтобы не загружать источник входного сигнала. Но разностный ток $\Delta I_{\text{ВХ}}$ создает падение напряжения $R_1 \Delta I_{\text{ВХ}}$, которое воспринимается ОУ как сигнал. Чтобы отстроиться от этого ложного сигнала необходимо выполнить следующее условие:

$$R_1 \Delta I_{\text{ВХ}} \ll U_{\text{ВХ min}}.$$

Значит,

$$R_1 \ll U_{\text{ВХ min}} / \Delta I_{\text{ВХ}} = 10 \cdot 10^{-3} / (0,2 \cdot 10^{-6}) = 50 \text{ кОм}.$$

Принимаем $R_1 = 5$ кОм, тогда

$$R_1 \Delta I_{\text{ВХ}} = 5 \cdot 10^3 / (0,2 \cdot 10^{-6}) = 1 \text{ мВ} < U_{\text{ВХ min}} = 10 \text{ мВ}.$$

Поскольку коэффициент усиления инвертирующего усилителя $K_U = -R_{\text{ОС}} / R_1$, то сопротивление резистора обратной связи

$$R_{\text{ОС}} = -K_U R_1 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ кОм}.$$

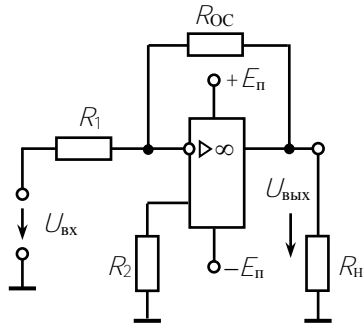


Рис. 3.1

Неинвертирующий вход заземлен через резистор R_2 , сопротивление которого для снижения величины токового дрейфа $R_2 = R_{OC} \parallel R_1$:

$$R_2 = \frac{R_{OC} \cdot R_1}{R_{OC} + R_1} = \frac{100 \cdot 5}{105} = 4,76 \text{ кОм.}$$

Находим входное и выходное сопротивления усилителя при неидеальном ОУ:

$$R_{ВХ} = R_1 + \frac{R_{ВХ ОУ} R_{OC}}{R_{ВХ ОУ} (1 + K_{U ОУ}) + R_{OC}} \approx R_1 = 5 \text{ кОм};$$

$$R_{ВЫХ} = R_{ВЫХ ОУ} \frac{1 + R_{OC} / R_1}{K_{U ОУ}} = 0,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 + 100/5}{3 \cdot 10^4} = 0,07 \text{ Ом.}$$

Амплитуда выходного сигнала по паспорту $|U_{ВЫХ \text{ max}}| \leq |\pm 10,5| \text{ В}$, значит, амплитуда входного сигнала, при котором не будет искажения, $U_{ВХ \text{ max}} = U_{ВЫХ \text{ max}} / K_U = \pm 10,5 / (-20) = \pm 525 \text{ мВ}$.

Задача 3.2. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ типа К140УД7, параметры которого даны в задаче 3.1, имеет коэффициент усиления напряжения $K_U = 30$ (рис. 3.2). Минимальное входное напряжение $U_{ВХ \text{ min}} = 20 \text{ мВ}$. Рассчитать сопротивления резисторов R_1, R_2, R_{OC} , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления усилителя с

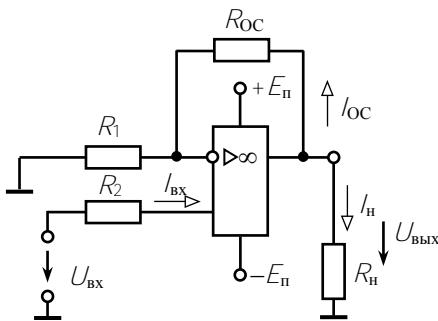


Рис. 3.2

обратной связью, наибольшее значение входного напряжения $U_{ВХ \text{ max}}$, при котором сигнал усиливается без искажения.

Определить выходной ток усилителя, если $R_H = 5 \text{ кОм}$.

Решение. Чтобы падение напряжения на резисторе сопротивлением R_2 от разностного тока ОУ $\Delta I_{ВХ}$ не воспринималось как сигнал, необходимо,

чтобы соблюдалось условие $R_2 \Delta I_{ВХ} \ll U_{ВХ \text{ min}}$, поэтому

$$R_2 \ll U_{\text{вх min}} / \Delta I_{\text{вх}} = 20 \cdot 10^{-3} / 0,2 \cdot 10^{-6} = 100 \text{ кОм.}$$

Принимаем $R_2 = 10 \text{ кОм}$, тогда $R_2 \Delta I_{\text{вх}} = 2 \text{ мВ} < U_{\text{вх min}} = 20 \text{ мВ}$.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя можно выразить как $K_U = 1 + R_{\text{ОС}} / R_1$ или $K_U = R_{\text{ОС}} / R_2$. Значит, сопротивление резистора обратной связи

$$R_{\text{ОС}} = K_U R_2 = 30 \cdot 10 = 300 \text{ кОм.}$$

Резистор сопротивлением R_1 служит для уравнивания входов: $R_1 \parallel R_{\text{ОС}} = R_2$, откуда

$$R_1 = \frac{R_{\text{ОС}} R_2}{R_{\text{ОС}} - R_2} = \frac{300 \cdot 10}{300 - 10} = 10,4 \text{ кОм.}$$

Определяем входное и выходное сопротивления усилителя с обратной связью

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{вх ОУ}} \frac{K_{\text{УОУ}}}{K_U} = 0,4 \cdot 10^6 \cdot \frac{30000}{30} = 400 \text{ МОм;}$$

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых ОУ}} \frac{1 + R_{\text{ОС}} / R_1}{K_{\text{УОУ}}} = 0,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 + 300 / 10,4}{30000} = 0,1 \text{ Ом.}$$

Поскольку по каталожным данным амплитуда выходного напряжения ОУ К140УД7 $U_{\text{вых max}} = \pm 10,5 \text{ В}$, то амплитуда входного напряжения, при котором не будет искажения сигнала,

$$U_{\text{вх max}} = U_{\text{вых max}} / K_U = 10,5 / 30 = 350 \text{ мВ,}$$

а амплитуда выходного тока

$$I_{\text{вых max}} = \frac{U_{\text{вых max}}}{R_{\text{н}}} + \frac{U_{\text{вых max}}}{R_{\text{ОС}}} = \frac{10,5}{5 \cdot 10^3} + \frac{10,5}{300 \cdot 10^3} \approx 2,1 \text{ мА.}$$

Задача 3.3. Начертить схему параллельного сумматора на ОУ для реализации операции $U_{\text{вых}} = 5U_1 + 2U_2 - 3U_3 - U_4$. Сопротивление

резистора обратной связи $R_{OC} = 100$ кОм. Рассчитать сопротивления резисторов в схеме и определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, если единичное входное напряжение $U = 100$ мВ.

Решение. Число положительных членов заданной функции определяет число неинвертирующих входов (2), а число отрицательных членов – число инвертирующих входов (2). Схема сумматора приведена на рис. 3.3. Коэффициенты усиления (весовые коэффициенты) по каждому входу

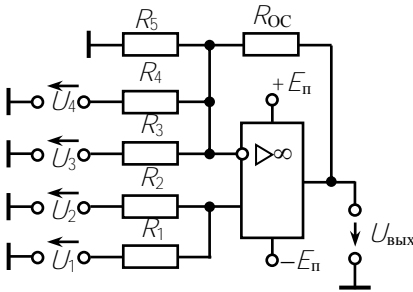


Рис. 3.3

по каждому входу $K_i = \pm R_{OC} / R_i$, где R_i – сопротивление в цепи данного входа.

По заданному значению R_{OC} и коэффициентам усиления входов ($K_1 = 5$, $K_2 = 2$, $K_3 = -3$, $K_4 = -1$) определяем $R_1 = R_{OC} / K_1 = 100 / 5 = 20$ кОм; $R_2 = R_{OC} / K_2 = 100 / 2 = 50$ кОм; $R_3 = R_{OC} / (-K_3) = 100 / 3 = 33,3$ кОм; $R_4 = R_{OC} / (-K_4) = 100$ кОм.

Необходимо уравнивать сопротивления по обоим входам, чтобы входные токи ОУ вызвали одинаковые падения напряжения и на входе ОУ отсутствовал разностный ток.

Входное сопротивление по инвертирующему входу:

$$\frac{1}{R_{\text{и}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_{OC}} = \frac{1}{33,3} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = 0,05 \frac{1}{\text{кОм}};$$

$$R_{\text{и}} = 20 \text{ кОм};$$

по неинвертирующему входу $R_1 \parallel R_2$,

$$R_{\text{н}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \cdot 50}{20 + 50} = 14,3 \text{ кОм}.$$

Чтобы сопротивления $R_{\text{и}}$ и $R_{\text{н}}$ были одинаковыми, нужно параллельно инвертирующему входу включить резистор R_5 :

$$\frac{R_5 R_{\text{и}}}{R_5 + R_{\text{и}}} = R_{\text{н}}, \quad R_5 = \frac{R_{\text{и}} R_{\text{н}}}{R_{\text{и}} - R_{\text{н}}} = 50 \text{ кОм}.$$

Выходное напряжение сумматора при $U = 100$ мВ

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} U_1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_2} U_2 - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_3} U_3 - \frac{R_{\text{ОС}}}{R_4} U_4 =$$

$$= 5U + 2U - 3U - U = 3U = 300 \text{ мВ.}$$

Задача 3.4. Определить выходное напряжение разностного усилителя (рис. 3.4) и общий его коэффициент усиления напряжения, если $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 20$ кОм, $R_{\text{ОС}} = 100$ кОм, $R_3 = 16,7$ кОм, $U_{\text{ВХ}1} = 20$ мВ, $U_{\text{ВХ}2} = 80$ мВ.

Решение. Используя выражения для коэффициентов усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам и метод суперпозиции, получаем выражение выходного напряжения усилителя:

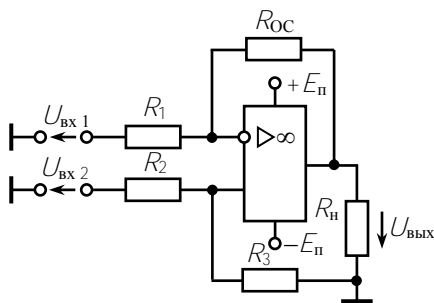


Рис. 3.4

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{U_{\text{И}}} U_{\text{ВХ}1} + K_{U_{\text{Н}}} U_{\text{ВХ}2} \frac{R_3}{R_3 + R_2} =$$

$$= -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} U_{\text{ВХ}1} + \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{\text{ВХ}2};$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -10 \cdot 20 + 5 \cdot 80 = 200 \text{ мВ.}$$

Коэффициент усиления

$$K_{U_{\text{РАЗН}}} = U_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{ВХ}2} - U_{\text{ВХ}1}) = 200 / (80 - 20) = 3,33.$$

Задача 3.5. Определить выходное напряжение в цепи (рис. 3.5), если входной ток $I_{ВХ} = 5 \text{ мкА}$, $R_{ОС} = 100 \text{ кОм}$.

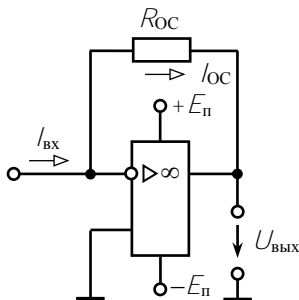


Рис. 3.5

Решение. Из схемы видно, что

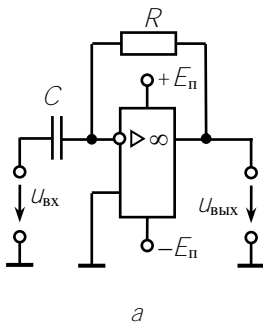
$$I_{ВХ} = I_{ОС} = -U_{ВЫХ} / R_{ОС},$$

откуда

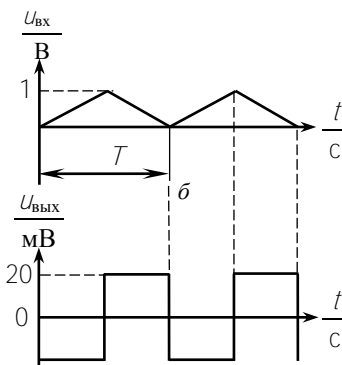
$$U_{ВЫХ} = -R_{ОС} I_{ВХ} = -100 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = -0,5 \text{ В}.$$

Данная схема является преобразователем тока источника сигнала в напряжение.

Задача 3.6. Входное напряжение дифференциатора на ОУ (рис. 3.6, а) изменяется так, как показано на рис. 3.6, б. Его амплитуда $U_{ВХ \text{ max}} = 1 \text{ В}$, период $T = 0,1 \text{ с}$. Сопротивление резистора обратной связи $R = 10 \text{ кОм}$. Рассчитать емкость C конденсатора, найти закон изменения $U_{ВЫХ}(t)$ и амплитуду $U_{ВЫХ \text{ max}}$.



а



б

Рис. 3.6

Решение. Для уменьшения погрешности дифференцирования необходимо, чтобы $\tau = RC \ll T$, поэтому

$$C = \frac{T}{100R} = \frac{0,1}{100 \cdot 10 \cdot 10^3} = 0,1 \text{ мкФ}.$$

Выходное напряжение определяется выражением $U_{\text{ВЫХ}} = -\tau \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$.

Его диаграмма приведена на рис. 3.6, в.

Амплитуда выходного напряжения

$$|U_{\text{ВЫХ max}}| = \tau \frac{U_{\text{ВХ max}}}{T/2} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{0,1/2} = 20 \text{ мВ.}$$

Задача 3.7. Рассчитать сопротивления R_1 , R_2 резисторов и емкость C конденсатора в схеме интегратора (рис. 3.7, а), если на его инвертирующий вход подано напряжение $U_{\text{ВХ}}(t)$ (рис. 3.7, б). Входное сопротивление усилителя $R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ МОм}$. Найти зависимость $U_{\text{ВЫХ}}(t)$. Сопротивлением источника входного сигнала пренебречь.

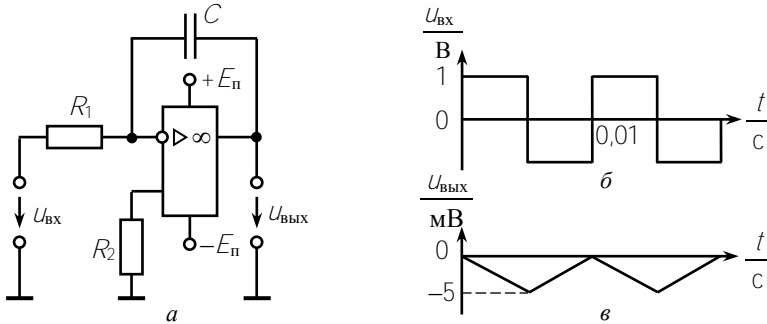


Рис. 3.7

Решение. Усилитель работает устойчиво, если $R_2 \ll R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ МОм}$. Кроме того, для баланса каскадов ОУ на постоянном токе, необходимо, чтобы $R_1 = R_2$. Поэтому выбираем $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Для уменьшения погрешности интегрирования принимаем $\tau = R_1 C \gg T = 0,01 \text{ с}$. Выбираем $\tau = 1 \text{ с}$, тогда

$$C = \tau / R_1 = 1 / 10 \cdot 10^3 = 100 \text{ мкФ.}$$

Зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{\tau} \int U_{\text{ВХ}} dt$ при $U_{\text{ВХ}}(0) = 0$ дана на рис. 3.7, в. Наибольшее значение $U_{\text{ВЫХ max}}$ будет при $t = T/2 = 0,005 \text{ с}$:

$$|U_{\text{ВЫХ max}}| = \frac{1}{\tau} U_{\text{ВХ max}} \Big|_0^{T/2} = \frac{U_{\text{ВХ max}} T}{2\tau} = \frac{1 \cdot 0,01}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 5 \text{ мВ.}$$

Задача 3.8. Рассчитать резонансную частоту и коэффициент усиления на резонансной частоте избирательного усилителя (рис. 3.8), если $R_1 = 20 \text{ кОм}$, $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$, $L = 100 \text{ мГн}$, $C = 100 \text{ пФ}$. Операционный усилитель считать идеальным. Записать уравнение мгновенного значения выходного сигнала резонансной частоты, если $U_{\text{ВХ}} = 2 \sin \omega_p t \text{ В}$.

Решение. Резонансную частоту находим из условия резонанса токов в контуре LC

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-12}}} = 50 \text{ кГц.}$$

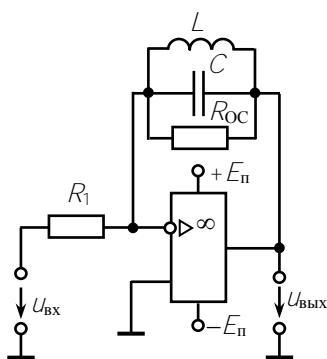


Рис. 3.8

Поскольку при резонансе комплексное сопротивление элементов обратной связи $Z_p = R_{\text{ОС}}$, то на резонансной частоте 50 кГц коэффициент усиления напряжения

$$K_U = -R_{\text{ОС}}/R_1 = -100/20 = -5.$$

Уравнение мгновенных значений выходного сигнала на частоте

$$\omega_p = 2\pi f_p = 2\pi \cdot 50 \cdot 10^3 = 314 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$$

имеет вид

$$u_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ } m} \sin(\omega_p t) = -10 \sin(314 \cdot 10^3 t) \text{ В,}$$

где $U_{\text{ВЫХ } m} = |K_U| U_{\text{ВХ } m} = 5 \cdot 2 = 10 \text{ В}$.

Задача 3.9. В схеме компаратора на ОУ (рис. 3.9, а) входной сигнал инвертирующего входа изменяется по синусоидальному закону

с амплитудой $U_{\text{вх}} m = 2$ В. Опорное напряжение, подаваемое на неинвертирующий вход, $U_{\text{оп}} = 1$ В; ЭДС источника питания ОУ $E_{\text{п}} = 5$ В. Построить зависимость $u_{\text{вых}}(t)$, считая ОУ идеальным.

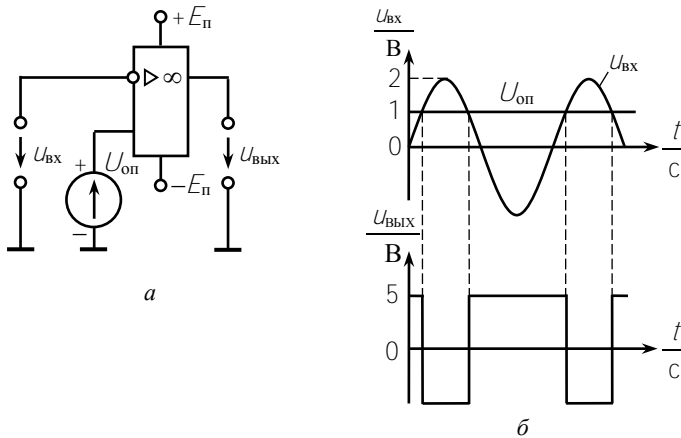


Рис. 3.9

Решение. Выходное напряжение ОУ без отрицательной обратной связи зависит от соотношения напряжений на его входах и достигает уровня насыщения ($U_{\text{вых}} = \pm E_{\text{п}}$) даже при незначительной разности $u_{\text{вх}} - U_{\text{оп}}$. Например, при $K_{\text{УОУ}} = 2500$ ОУ насыщается при $|u_{\text{вх}} - U_{\text{оп}}| = E_{\text{п}} / K_{\text{УОУ}} = 5/2500 = 2,0$ мВ. В идеальном ОУ $K_{\text{У}} = \infty$ и $|u_{\text{вх}} - U_{\text{оп}}| = 0$.

Если соотношение входных напряжений $u_{\text{вх}} > U_{\text{оп}}$, то $u_{\text{вых}} = -E_{\text{п}} = -5$ В; если же $u_{\text{вх}} < U_{\text{оп}}$, то $u_{\text{вых}} = +5$ В. Данная схема осуществляет сравнение напряжений $u_{\text{вх}}$ и $U_{\text{оп}}$. Диаграммы напряжений приведены на рис. 3.9, б.

Задача 3.10. Определить пороговые напряжения срабатывания и отпускания и ширину зоны гистерезиса триггера Шмидта на ОУ, максимальное выходное напряжение которого $U_{\text{вых max}} = \pm 10$ В (рис. 3.10, а), если $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 500$ Ом, $U_{\text{оп}} = 1$ В. Начертить передаточную характеристику.

Решение. В схеме применена положительная обратная связь с помощью резисторов R_1, R_2 . Напряжение $u_{\text{н}}$ на неинвертирующем входе ОУ обусловлено действием двух напряжений: $u_{\text{вых}}$ и $U_{\text{оп}}$.

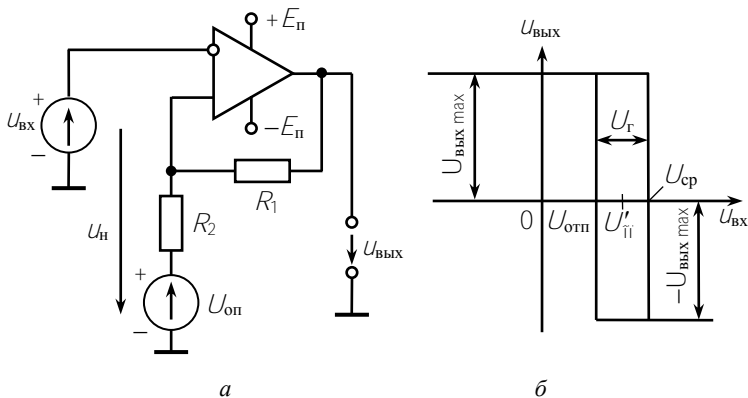


Рис. 3.10

Найдем U_H методом наложения, учитывая, что резисторы R_1, R_2 выполняют роль делителя напряжения:

$$\begin{aligned}
 U_H = U_{\text{сп}} &= U_{\text{оп}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + |U_{\text{вых max}}| \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \\
 &= 1 \cdot \frac{10}{10,5} + 10 \cdot \frac{0,5}{10,5} = 1,43 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

Если $U_{\text{вх}} < U_H = U_{\text{сп}}$, то на выходе компаратора $U_{\text{вых}} = +U_{\text{вых max}}$. При $U_{\text{вх}} = U_{\text{сп}}$ произойдет переключение компаратора в состояние $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вых max}}$, а возвращение в состояние $U_{\text{вых}} = +U_{\text{вых max}}$ — при снижении $U_{\text{вх}}$ до напряжения отпущения

$$\begin{aligned}
 U_H = U_{\text{отп}} &= U_{\text{оп}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - |U_{\text{вых max}}| \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \\
 &= 1 \cdot \frac{10}{10,5} - 10 \cdot \frac{0,5}{10,5} = 0,47 \text{ В.}
 \end{aligned}$$

Передаточная характеристика $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ изображена на рис. 3.10, б, где $U'_{\text{оп}} = U_{\text{оп}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

Ширина зоны гистерезиса

$$U_{\Gamma} = U_{\text{ср}} - U_{\text{отп}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 2|U_{\text{вых max}}| = 0,96 \text{ В.}$$

Контрольные задачи

Задача 3.11. Рассчитать инвертирующий усилитель на основе ОУ типа К140УД1А с коэффициентом усиления напряжения $K_U = -10$ (см. рис. 3.1). Паспортные данные К140УД1А: $E_{\Pi} = \pm 6,3 \text{ В}$, $K_{U_{\text{ОУ}}} = 2500$, $U_{\text{вых max}} = \pm 3,5 \text{ В}$, $R_{\text{вх ОУ}} = 0,6 \text{ МОм}$, $R_{\text{вых ОУ}} = 0,7 \text{ кОм}$, $I_{\text{вх}} = 5 \text{ мкА}$, $\Delta I_{\text{вх}} = 1,5 \text{ мкА}$. Входное сопротивление проектируемого усилителя должно быть не меньше 10 кОм , выходное сопротивление – не больше 100 Ом . Усилитель работает от источника сигнала с ЭДС $E_{\Gamma} = 0,5 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $R_{\Gamma} = 1 \text{ кОм}$ на нагрузку сопротивлением $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$. Определить выходной ток ОУ.

Задача 3.12. Инвертирующий усилитель (см. рис. 3.1) с сопротивлением $R_1 = 10 \text{ кОм}$ и $R_{\text{ОС}} = 1 \text{ МОм}$ имеет следующие параметры ОУ: $K_{U_{\text{ОУ}}} = 10^4$, $R_{\text{вх ОУ}} = 300 \text{ кОм}$, $R_{\text{вых ОУ}} = 700 \text{ Ом}$. Рассчитать K , $R_{\text{вх}}$, $R_{\text{вых}}$ усилителя: а) полагая ОУ идеальным ($R_{\text{вх ОУ}} = \infty$; $K_{U_{\text{ОУ}}} = \infty$); б) с учетом неидеальных параметров ОУ.

Задача 3.13. Ограничится ли выходной сигнал в инвертирующем усилителе (см. рис. 3.1), если $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$?

Максимальное выходное напряжение ОУ $U_{\text{вых max}} = \pm 8 \text{ В}$.

В каком режиме работает ОУ?

Задача 3.14. В цепи, приведенной на рис. 3.11, $R_1 = 20 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_3 = 25 \text{ кОм}$, $R_{\text{ОС}} = 100 \text{ кОм}$, $U_1 = U_2 = U_3 = 10 \text{ мВ}$.

Определить $U_{\text{вых}}$ и R_4 .

Задача 3.15. В цепи рис. 3.2 $R_1 = 5 \text{ кОм}$, $U_{\text{вх}} = 10 \text{ мВ}$, $U_{\text{вых}} = 0,11 \text{ В}$. Определить $R_{\text{ОС}}$ и R_2 .

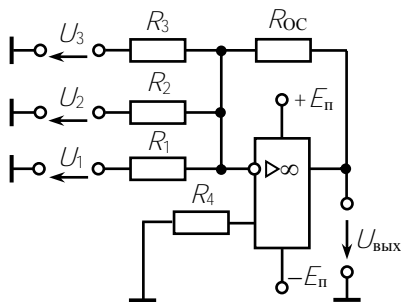


Рис. 3.11

Задача 3.16. В цепи (рис. 3.12)

$U_{\text{вх}} = 1$ В. Определить $U_{\text{вых}}$.

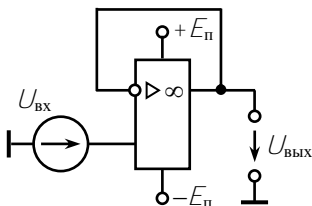


Рис. 3.12

Задача 3.17. При каком соотношении сопротивлений резисторов в схеме разностного усилителя (см. рис. 3.4) коэффициенты усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам будут одинаковы?

Задача 3.18. Определить выходной ток ОУ (см. рис. 3.4), если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 5$ кОм, $R_1 = R_2 = 10$ кОм, $R_3 = R_{\text{ОС}} = 50$ кОм, $U_{\text{вх}1} = 2$ В, $U_{\text{вх}2} = 3$ В.

Принять $R_{\text{вых ОУ}} = 0$; $K_{\text{У ОУ}} = \infty$.

Задача 3.19. Для разностного усилителя (см. рис. 3.4) определить $U_{\text{вых}}$, если $U_{\text{вх}1} = 0,1$ В, $U_{\text{вх}2} = -0,3$ В, $R_{\text{ОС}} = R_3 = 400$ кОм, $R_1 = R_2 = 20$ кОм.

Задача 3.20. Какое максимальное напряжение $U_{\text{вх} \text{ р}} = U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}$ можно подать на вход разностного усилителя, рассмотренного в задаче 3.19, чтобы выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ не ограничивался, если выходное напряжение ОУ ограничивается значением ± 10 В?

Задача 3.21. В цепь инвертирующего входа ОУ включен фотодиод VD (рис. 3.13). При некоторой освещенности ток фотодиода $I_{\text{ф}} = 10$ мкА. Рассчитать $R_{\text{ОС}}$, при котором выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 1$ В.

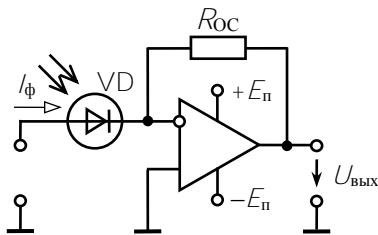


Рис. 3.13

Задача 3.22. Решить задачу 3.6, при условии, что входное напряжение изменяется по закону, показанному на рис. 3.14.

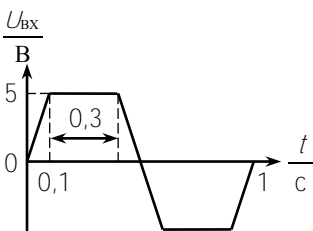


Рис. 3.14

Задача 3.23. В избирательном усилителе (см. рис. 3.8) рассчитать емкость C конденсатора и сопротивление $R_{\text{ОС}}$ резистора, чтобы максимальный коэффициент усиления $K_{\text{У}} = 100$

был при частоте сигнала 500 кГц, если $R_1 = 10$ кОм, $L = 100$ мГн.

Задача 3.24. Как изменится напряжение на выходе компаратора, рассмотренного в задаче 3.9, при изменении полярности источника опорного напряжения?

Задача 3.25. Рассчитать напряжение срабатывания и отпускания, а также ширину зоны гистерезиса в компараторе с параметрами, указанными в задаче 3.10, при $U_{оп} = 0$. Построить передаточную характеристику $U_{вых}(U_{вх})$.

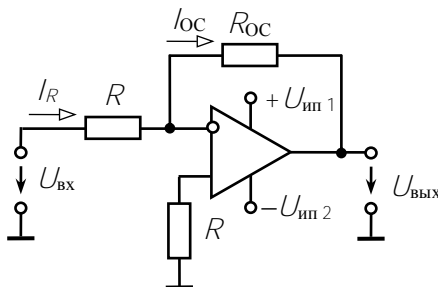
Задача 3.26. Неинвертирующий усилитель на ОУ имеет последовательную отрицательную ОС по напряжению за счет резистора $R_{ОС} = 100$ кОм (рис. 3.2). Сопротивление цепи неинвертирующего входа $R_2 = 10$ кОм. Коэффициент усиления ОУ $K_{ОУ} = 6000$, входное и выходное сопротивления соответственно $R_{вх ОУ} = 0,4$ МОм, $R_{вых ОУ} = 0,7$ кОм. Определить входное $R_{вх ОС}$ и выходное $R_{вых ОС}$ сопротивления, коэффициент усиления $K_{ОС}$ неинвертирующего усилителя. Изменится ли $K_{ОС}$ при изменении $K_{ОУ}$?

Ответы к контрольным задачам

- 3.11. $R_1 = 10$ кОм, $R_{ОС} = 110$ кОм, $R_2 = 10$ кОм, $R_{вх} = 10$ кОм,
 $R_{вых} = 3,27$ Ом, $I_H = 0,7$ мА, $I_{вых} = 0,732$ мА.
- 3.12. а) $K_U = -100$, $R_{вх} = 10$ кОм, $R_{вых} = 0$,
б) $K_U = -99$, $R_{вх} = 10,1$ кОм; $R_{вых} = 7$ Ом.
- 3.13. Сигнал ограничится; $U_{вых} = K_U U_{вх} = \pm 10$ В $> U_{вых \max} = \pm 8$ В.
- 3.14. $U_{вых} = -190$ мВ, $R_4 = 5$ кОм.
- 3.15. $R_{ОС} = 50$ кОм, $R_2 = 4,55$ кОм.
- 3.16. $U_{вых} = 1$ В.
- 3.17. $R_2 = R_1$, $R_3 = R_{ОС}$, $K_U = R_{ОС} / R_1 = R_3 / R_2$.
- 3.18. $I_{вых} = 1,1$ мА.
- 3.19. $U_{вых} = -8$ В.
- 3.20. $|U_{вх \max}| \leq 0,5$ В.
- 3.21. $R_{ОС} = 100$ кОм.
- 3.22. $C = 0,1$ мкФ, $U_{вых \max} = 50$ мВ.
- 3.23. $C = 1$ пФ, $R_{ОС} = 1000$ кОм.
- 3.25. $U_{ср} = +0,47$ В, $U_{отп} = -0,47$ В, $U_{Г} = 0,94$ В.

**Тест 3.1 для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов
Вариант 1**

1. Найти напряжение $U_{\text{вых}}$ на выходе усилителя и ток I_{OC} , если $U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ В}$, $R = 1 \text{ кОм}$, $R_{\text{OC}} = 50 \text{ кОм}$. Питание операционного усилителя осуществляется от двух источников напряжения: $U_{\text{ип1}} = +10 \text{ В}$ и $U_{\text{ип2}} = -10 \text{ В}$.



2. Составить устройство на базе операционного усилителя для реализации функции $U_{\text{вых}} = -K_U (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}})$. Определить параметры цепи, если известны $R_{\text{OC}} = 20 \text{ кОм}$, $K_U = 5$.

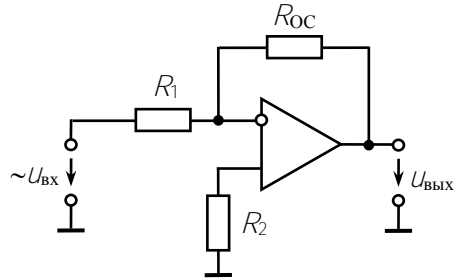
3. Ограничится ли выходной сигнал в инвертирующем усилителе, если $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_{\text{OC}} = 20 \text{ кОм}$? Максимальное значение выходного напряжения ОУ $U_{\text{вых max}} = \pm 15 \text{ В}$. В каком режиме работает операционный усилитель?

4. Составить устройство на базе операционного усилителя для реализации функции $U_{\text{вых}} = -2U_{\text{вх1}} - 3U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}}$. Определить параметры цепи, если $R_{\text{OC}} = 20 \text{ кОм}$.

5. Для разностного усилителя определить $U_{\text{вых}}$, если $U_{\text{вх1}} = 0,2 \text{ В}$, $U_{\text{вх2}} = -0,2 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = R_{\text{OC}} = R_3 = 20 \text{ кОм}$.

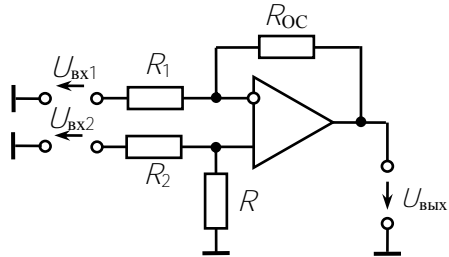
Вариант 2

1. На вход инвертирующего усилителя на основе ОУ подано синусоидальное напряжение с амплитудой $U_{вх.м} = 1$ В. Максимальное значение выходного напряжения ОУ $U_{вых\ max} = \pm 3$ В. Начертить совмещенные диаграммы входного и выходного напряжений, если $R_1 = 5$ кОм, $R_{oc} = 50$ кОм. Указать амплитуды напряжений $U_{вх.м}$, $U_{вых.макс}$.

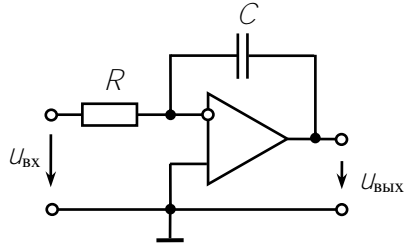


2. Определить сопротивление резистора R и выходное напряжение $U_{вых}$, если:

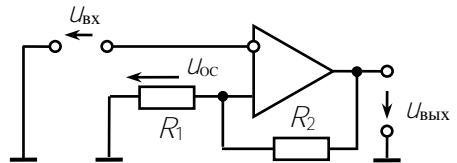
$U_{вх1} = 20$ мВ, $U_{вх2} = 230$ мВ,
 $R_{oc} = 1$ МОм, $R_1 = 10$ кОм,
 $R_2 = 20$ кОм.



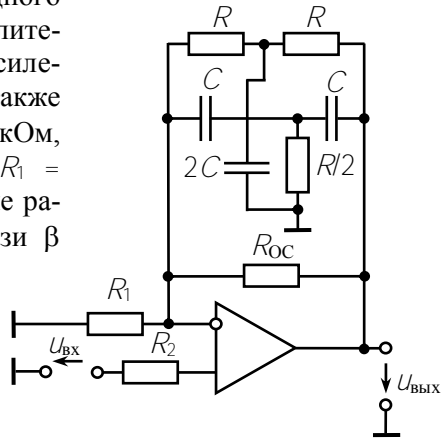
3. На вход интегратора на основе ОУ в момент времени t_0 подано синусоидальное напряжение $u_{вх} = 2\sin\omega t$ В. Начертить совмещенные диаграммы входного и выходного напряжений, если $u_{вых}(0) = 0$, $R = 10$ кОм, $C = 100$ мкФ. Указать значения амплитуд $U_{вх\ m}$ и $U_{вых\ макс}$.



4. Напряжение на выходе схемы может принимать одно из двух значений $U_{вых} = \pm 10$ В, $U_{вх} = 4\sin\omega t$ В, $R_1 = 2$ кОм, $R_2 = 8$ кОм. Начертить совмещенные диаграммы $u_{вх}(t)$ и $u_{вых}(t)$. Указать амплитудные значения напряжений. В момент времени t_0 принять $U_{вых} = +10$ В.



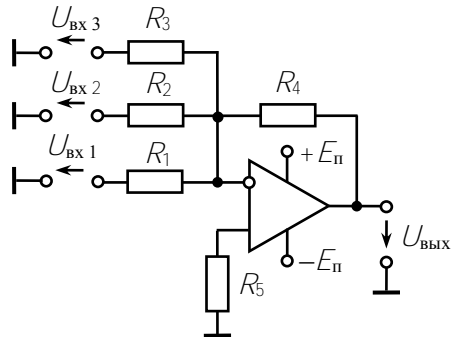
5. Рассчитать частоту входного сигнала f_0 в избирательном усилителе, при которой коэффициент усиления напряжения максимален, а также значение $K_{U \max}$, если $R = 24 \text{ кОм}$, $C = 1,1 \text{ нФ}$, $R_{oc} = 1 \text{ МОм}$, $R_1 = 10 \text{ кОм}$. Чему при этом режиме равен коэффициент обратной связи β двойного Т-образного моста?



Вариант 3

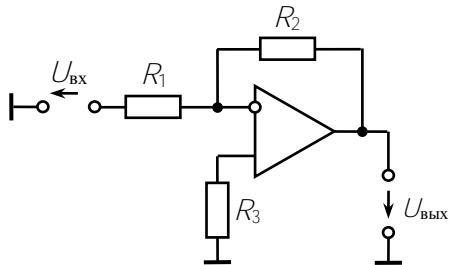
1. В инвертирующем сумматоре $R_1 = 20 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_3 = 15 \text{ кОм}$, $R_4 = 10 \text{ кОм}$, $U_{вх1} = U_{вх2} = U_{вх3} = 100 \text{ мВ}$.

Определить $U_{ввых}$ и сопротивление резистора R_5 .



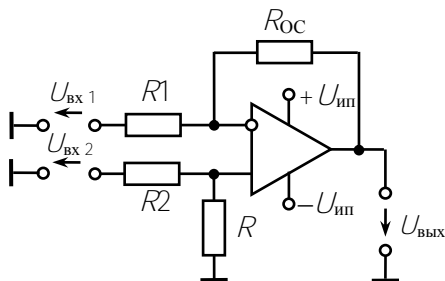
2. В инвертирующем усилителе $R_1 = 5 \text{ кОм}$, $U_{вх} = 10 \text{ мВ}$, $U_{ввых} = -0,5 \text{ В}$.

Определить R_2 и R_3 .



3. Какое максимальное напряжение $U_{\text{вх1}}$ можно подать на вход разностного усилителя, чтобы выходной сигнал не ограничивался, если $U_{\text{вх2}} = 0,5$ В.

Напряжение источников питания $U_{\text{ип}} = \pm 10$ В, $R_{\text{ОС}} = R_1 = R_2 = R_3 = 50$ кОм.



4. Начертить схему устройства на ОУ для реализации функции

$$U_{\text{вых}} = K_U (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх3}}).$$

Определить параметры схемы, если $R_{\text{ОС}} = 50$ кОм, $K_U = 10$.

5. На операционном усилителе построить устройство, инвертирующее фазу сигнала без изменения его амплитуды.

Рассчитать сопротивление резисторов схемы, если $R_{\text{ОС}} = 1,2$ кОм.

4. ИМПУЛЬСНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Задачи с решениями

Задача 4.1. Определить период T , частоту f и скважность Q последовательности импульсов (рис. 4.1), если $t_{и} = 100$ мкс, а $t_{п} = 1$ мс.

Решение. Вычисляем:

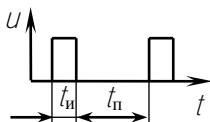


Рис. 4.1

$$T = t_{и} + t_{п} = 0,1 + 1 = 1,1 \text{ мс};$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,1 \cdot 10^{-3}} = 909 \text{ Гц};$$

$$Q = \frac{T}{t_{и}} = \frac{1,1}{0,1} = 11.$$

Задача 4.2. Схема электронного ключа на транзисторе КТ315А приведена на рис. 4.2. Параметры элементов схемы: $E_K = 12$ В,

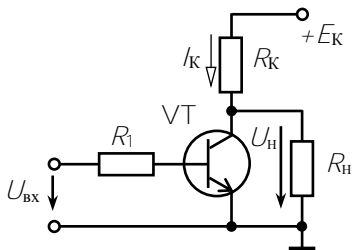


Рис. 4.2

$h_{21} = 50$, $R_K = 2$ кОм, $R_H = 5$ кОм, $R_1 = 10$ кОм. Определить $U_{вх}$ и U_H при работе транзистора в режимах отсечки и насыщения. Напряжением $U_{БЭ}$ и тепловым током I_{K0} пренебречь.

Решение. Для кремниевых транзисторов пороговое значение $U_{БЭ} = 0,6$ В, поэтому для режима отсечки $U_{вх} \leq 0,6$ В. При этом

$$I_K = 0; \quad U_H = \frac{E_K R_H}{R_K + R_H} = \frac{12 \cdot 5}{2 + 5} = 8,6 \text{ В}.$$

В режиме насыщения $U_{КЭ} \approx 0$, поэтому $U_H \approx 0$. Находим

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} = \frac{12}{2} = 6 \text{ мА}; \quad I_B = \frac{I_K}{h_{21}} = \frac{6}{50} = 0,12 \text{ мА};$$

$$U_{вх} \geq R_1 I_B = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 1,2 \text{ В}.$$

Задача 4.3. Схема мультивибратора на транзисторах VT1 и VT2 приведена на рис. 4.3. Определить длительность импульса $t_{и}$ и период T для выхода 2, если $R_1 = R_2 = 20 \text{ кОм}$, $C_1 = 0,01 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$.

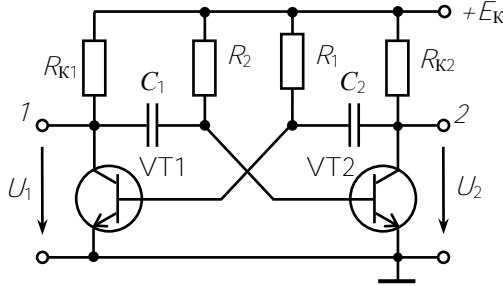


Рис. 4.3

Решение. Длительность импульса

$$t_{и2} \approx 0,7 C_1 R_2 = 0,7 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 0,14 \text{ мс.}$$

Длительность паузы

$$t_{п2} = t_{и1} \approx 0,7 C_2 R_1 = 0,7 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 1,4 \text{ мс.}$$

Определяем период и частоту:

$$T = t_{и2} + t_{п2} = 0,14 + 1,4 = 1,54 \text{ мс;}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,54 \cdot 10^{-3}} = 649 \text{ Гц.}$$

Задача 4.4. На рис. 4.4 приведена схема симметричного мультивибратора на ОУ. Определить длительность $t_{и}$ и частоту f импульсов, если $R_{ОС} = 10 \text{ кОм}$; $C = 0,01 \text{ мкФ}$; $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Решение. Для схемы на ОУ длительность импульса

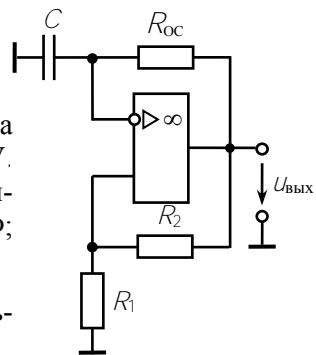


Рис. 4.4

$$t_{\text{и}} = R_{\text{OC}} C \ln(1 + 2R_1 / R_2) =$$

$$= 10 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} \ln(1 + 2 \cdot 10 / 10) = 0,11 \text{ мс.}$$

Находим период и частоту

$$T = 2t_{\text{и}} = 0,22 \text{ мс;}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,22 \cdot 10^{-3}} = 4,5 \text{ кГц.}$$

Задача 4.5. Рассчитать сопротивления резисторов несимметричного мультивибратора на ОУ (рис. 4.5, а) и емкость конденсатора C для получения импульсов прямоугольной формы с частотой $f = 1$ кГц, скважностью $Q = 4$. Выходное напряжение ОУ $U_{\text{вых.мах}} = \pm 3$ В, напряжение обратной связи $u_{\text{OC}} = \pm 1$ В. Принять сопротивления резисторов $R_1 = R_4 = 10$ кОм.

Начертить диаграммы входных $u_C(t)$, $u_{\text{OC}}(t)$ и выходного $u_{\text{вых}}(t)$ напряжений в установившемся режиме.

Решение. Конденсатор C и резисторы R_1 , R_2 образуют интегрирующую RC – цепь: при зарядке конденсатора открыт диод VD1 и ток проходит через R_1 , при разряде – открыт VD2 , ток идет через R_2 . Источником напряжения является выходная цепь ОУ с $u_{\text{вых}}(t) = \pm U_{\text{вых.мах}}$, также ОУ выполняет функции ключа и компаратора,

который сравнивает u_C с $u_{\text{OC}} = \pm U_{\text{вых.мах}} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$. В результате перезарядки конденсатора на выходе формируются периодически повторяющиеся импульсы прямоугольной формы (рис. 4.5, б).

Период импульсов $T = 1/f = 1/1 \cdot 10^3 = 1$ мс. Так как скважность $Q = T/t_{\text{и}}$, то длительности импульсов и паузы

$$t_{\text{и}} = T/Q = 1/4 = 0,25 \text{ мс; } t_{\text{п}} = 0,75 \text{ мс.}$$

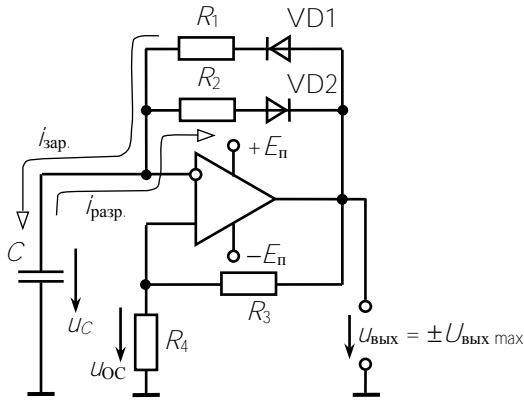
Рассматривая процессы заряда и разряда конденсатора, получим

$$t_{\text{и}} = R_1 C \ln(1 + 2R_4 / R_3),$$

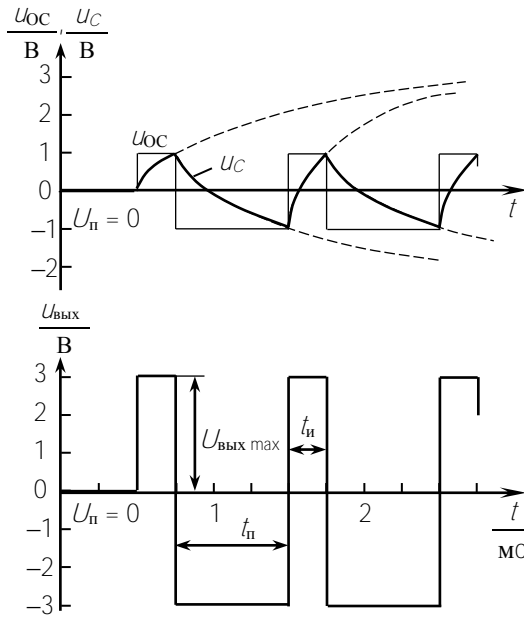
$$t_{\text{п}} = R_2 C \ln(1 + 2R_4 / R_3).$$

Из последних выражений очевидно: $\frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{п}}} = \frac{R_1}{R_2}$,

откуда $R_2 = 30 \text{ кОм}$.



а



б

Рис. 4.5

Напряжение обратной связи

$$U_{OC} = U_{\text{ВЫХ. max}} \frac{R_4}{R_3 + R_4},$$

т.е. $1 = 3 \frac{10}{R_3 + 10}, \quad R_3 = 20 \text{ кОм.}$

Емкость конденсатора

$$C = t_{\text{и}} / R_1 \ln(1 + 2R_4 / R_3) = 0,25 \cdot 10^{-3} / 10 \cdot 10^3 \ln 2 = 36 \text{ нФ.}$$

Задача 4.6. Схема генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) приведена на рис. 4.6. Параметры элементов схемы: $E_K = 12 \text{ В}$, $R_K = 50 \text{ кОм}$, $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$. Определить амплитуду выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ} m}$ и среднюю скорость нарастания прямого

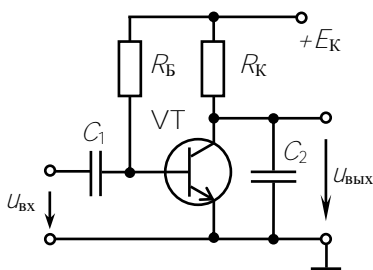


Рис. 4.6

хода $K = U_m / t_{\text{и}}$, если на вход поступают отрицательные импульсы длительностью $t_{\text{и}} = 1 \text{ мс}$.

Решение. При отсутствии входного импульса транзистор насыщен $U_{КЭ} = 0$, $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. С приходом отрицательного импульса транзистор переходит в режим отсечки и конденсатор емкостью C_2 начинает заряжаться с постоянной време-

ни

$$\tau = R_K C_2 = 50 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ мс.}$$

После окончания импульса транзистор опять переходит в режим насыщения и C_2 быстро разряжается. При $\tau \gg t_{\text{и}}$, $U_{\text{ВЫХ}}$ нарастает практически пропорционально времени, т.е. конденсатор заряжается постоянным током $I_K = E_K / R_K$. Тогда

$$U_{\text{ВЫХ} m} = \frac{Q}{C_2} = \frac{I_K t}{C_2} = \frac{E_K t}{R_K C_2},$$

амплитуда импульса соответствует $t = t_{и}$,

$$U_{\text{вых } m} = \frac{E_K t_{и}}{R_K C_2} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \text{ В};$$

$$K = \frac{U_{\text{вых } m}}{t_{и}} = \frac{2,4}{10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^3 \text{ В/с.}$$

Задача 4.7. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего логическую функцию

$$F = X_1 + \overline{X_2 X_3}.$$

Решение. Логический элемент 2И-НЕ реализует функцию $F_1 = \overline{X_2 X_3}$.

Логический элемент 2ИЛИ выполняет функцию $F = X_1 + F_1$.

Функциональная схема приведена на рис. 4.7.

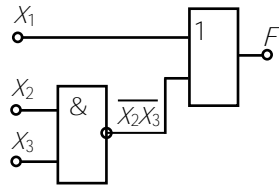


Рис. 4.7

Задача 4.8. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего логическую функцию

$$F = \overline{X_1 \overline{X_2} + X_1 X_2 + \overline{X_3}}.$$

Решение. При реализации функции без преобразований надо последовательно выполнить следующие операции:

$$F_1 = \overline{X_2}; \quad F_2 = X_1 F_1;$$

$$F_3 = \overline{X_1 X_2}; \quad F_4 = \overline{X_3};$$

$$F = \overline{F_2 + F_3 + F_4}.$$

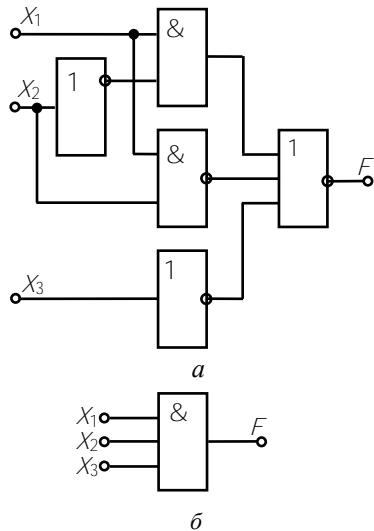


Рис. 4.8

Схема устройства показана на рис. 4.8, а. Схему можно существенно упростить, если преобразовать заданную функцию, используя законы алгебры логики:

$$\begin{aligned}
 F &= \overline{X_1 X_2} + \overline{X_1 X_2} + \overline{X_3} = \\
 &= \overline{X_1 X_2} \overline{X_1 X_2} \overline{X_3} = (\overline{X_1} + \overline{X_2}) X_1 X_2 X_3 = \\
 &= \overline{X_1} X_1 X_2 X_3 + X_2 X_1 X_2 X_3 = X_1 X_2 X_3.
 \end{aligned}$$

Схема устройства для преобразованной функции показана на рис. 4.8, б. Подставив различные значения X_i , можно убедиться в том, что обе схемы реализуют одну и ту же функцию.

Задача 4.9. Составить схему шифратора, преобразующего число из десятичного кода в двоично-десятичный.

Решение. Каждый разряд десятичного числа может содержать один из 10 знаков (от 0 до 9). Поэтому шифратор должен иметь 10 входов. В двоичном коде любая десятичная цифра может быть представлена четырехразрядным двоичным числом. Следовательно, шифратор должен иметь 4 выхода. Таблица состояний шифратора (табл. 4.1) позволяет записать уравнения логических функций для каждого выхода:

Т а б л и ц а 4.1

X	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
0	0	0	0	0
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	1	1	0	0
4	0	0	1	0
5	1	0	1	0
6	0	1	1	0
7	1	1	1	0
8	0	0	0	1

9	1	0	0	1
---	---	---	---	---

$$Y_0 = X_1 + X_3 + X_5 + X_7 + X_9;$$

$$Y_1 = X_2 + X_3 + X_6 + X_7;$$

$$Y_2 = X_4 + X_5 + X_6 + X_7;$$

$$Y_3 = X_8 + X_9.$$

Условное обозначение шифратора и его схема, построенная по указанным уравнениям, приведены на рис. 4.9, а, б.

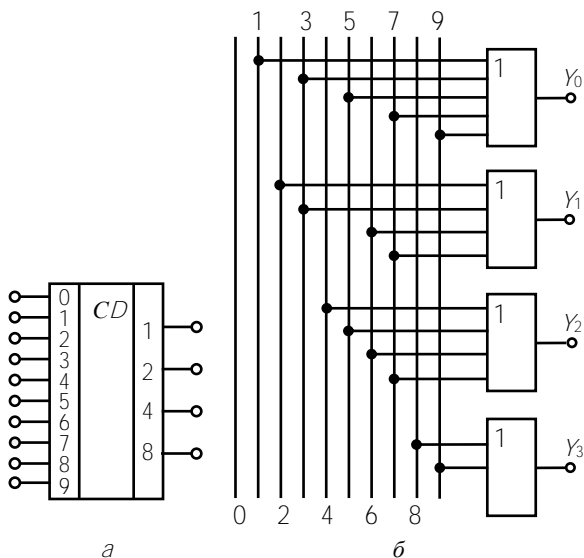


Рис. 4.9

Задача 4.10. Построить на любых логических элементах простейшее устройство для сравнения двух 2-разрядных двоичных чисел. При их равенстве устройство должно вырабатывать сигнал 1, при неравенстве – 0.

Решение. Двухразрядный компаратор реализует логическую функцию

$$F = (\overline{a_0 \oplus b_0})(\overline{a_1 \oplus b_1}) = \overline{(a_0 \oplus b_0) + (a_1 \oplus b_1)}.$$

Схема компаратора представлена на рис. 4.10

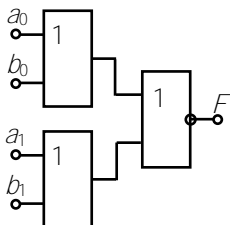


Рис. 4.10

Задача 4.11. Составить схему дешифратора для перевода чисел из двоично-десятичного кода в десятичный.

Решение. Схема содержит 4 входа и 10 выходов. Составим таблицу состояний (табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

X	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
X_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
X_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
X_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
X_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

По таблице состояний запишем уравнения логических функций для каждого выхода:

$$Y_0 = \overline{X_0} \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3}$$

$$Y_1 = X_0 \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3}$$

.....

$$Y_7 = X_0 X_1 X_2 \overline{X_3}$$

$$Y_8 = \overline{X_0} \overline{X_1} \overline{X_2} X_3$$

$$Y_9 = X_0 \overline{X_1} \overline{X_2} X_3$$

Схема дешифратора на логических элементах ИЛИ–НЕ и его условное обозначение показаны на рис. 4.11, *а*, *б* соответственно.

Задача 4.12. Составить схему мультиплексора для передачи сигналов от четырех источников по одной линии.

Решение. Схема должна содержать 4 входа и 1 выход. Кроме того, она должна включать блок управления точника (адрес). Это удобно выполнить в виде дешифратора. В нем номер любого источника двухразрядным выбирается A_0 . В качестве используются эле- каждый из кото- рых управляет выходом дешифратора. Вы- объединяются ИЛИ, на выход

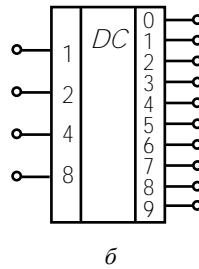
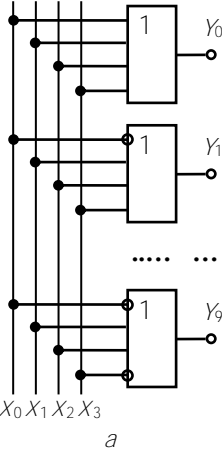


Рис. 4.11

включать выборки источника. Этот блок можно представить в виде двоичного кода из четырех бит. Число, заданное на входах A_1 , ключей элементов И, управляет выходом дешифратора. Ключи элементов

ИЛИ, на выход которого подключается линия связи. Схема мультиплексора приведена на рис. 4.12, *а*, а его условное обозначение на рис. 4.12, *б*.

Пусть на входы A_0 , A_1 подан сигнал 01 (адрес источника D_1). Высокий уровень с выхода дешифратора поступает на вход Э1, и сигнал на его выходе повторяет сигнал источника D_1 . Через Э4 он поступает в линию связи. Все остальные элементы закрыты.

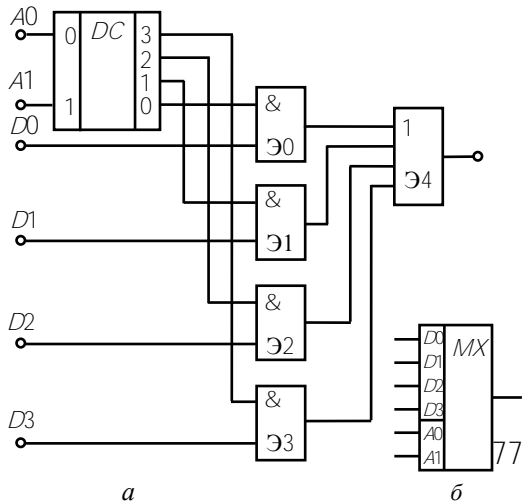


Рис. 4.12

Задача 4.13. Составить таблицу состояний для RS -триггера на элементах ИЛИ–НЕ, схема которого приведена на рис. 4.13.

Решение. При $S = R = 0$ состояние элементов зависит от сигналов на выходах Q и \bar{Q} . Пусть $Q = 0$. Тогда логический элемент Э2 имеет на входах 00 и на выходе $\bar{Q} = 1$. Логический элемент Э1 имеет на входах 01 и на выходе $Q = 0$, т.е. схема сохраняет предыдущее состояние. При $S = 1, R = 0$ на выходе элемента Э2 всегда $\bar{Q} = 0$. На входе Э1 оба сигнала 00, на выходе сигнал $Q = 1$.

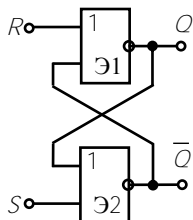


Рис. 4.13

Т а б л и ц а 4.3

S	R	Q	\bar{Q}
0	0	Q_0	\bar{Q}_0
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	x	x

ное состояние).

Сигналы $S = 0, R = 1$

устанавливают элемент Э1 при любом предшествующем состоянии в состояние $Q = 0$, а Э2 – в состояние $\bar{Q} = 1$. Если $R = S = 1$, то $Q = \bar{Q} = 0$, что недопустимо для триггера. Эти сигналы запрещены (табл. 4.3, где x – неопределенное состояние).

Задача 4.14. Составить схему T -триггера на основе D -триггера, срабатывающего по переднему фронту синхроимпульса. Начертить временную диаграмму его работы.

Решение. С приходом синхроимпульса D -триггер устанавливается в состояние $Q = D$. Поэтому соединяем его вход D с выходом \bar{Q} . Схема приведена на рис. 4.14, а, а временные диаграммы – на рис. 4.14, б.

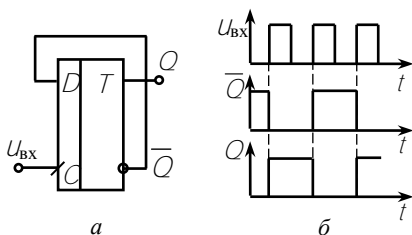


Рис. 4.14

ступающей по одному D входу на четыре выхода: X_0, X_1, X_2, X_3 . Отметим, что демультиплексор реализует опе-

Задача 4.15. Составить схему демультиплексора для управляемой передачи информации, по-

рацию противоположную той, которую осуществляет мультиплексор.

Решение. В общем случае число выходных линий N определяется количеством адресных входов n и равно $N = 2^n$. Так как по условию число выходов $N = 4$, то необходимое число адресных входов $n = 2$: A_0, A_1 . Функционирование демультиплексора осуществляется в соответствии с табл. 4.4.

Из нее следует, что информация D , поступающая на вход в соответствии с кодом адреса, передается на одну из выходных линий X_i . При этом на остальные линии информация не поступает и на них поддерживается уровень логического «0».

Логические функции демультиплексора по таблице истинности 4.4. имеют вид:

$$X_0 = \overline{A_0} \cdot \overline{A_1} \cdot D;$$

$$X_1 = \overline{A_0} \cdot A_1 \cdot D;$$

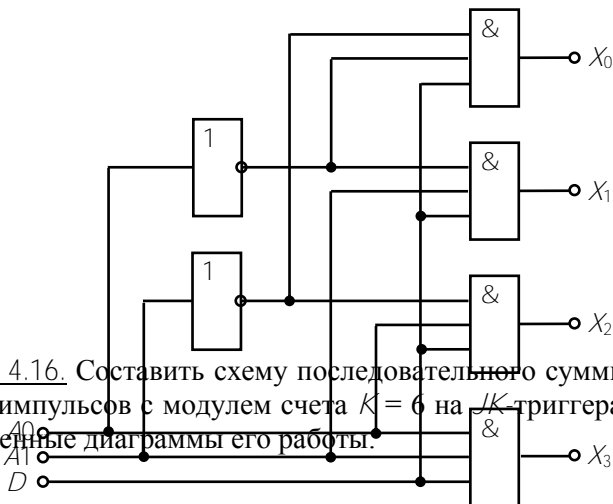
$$X_2 = A_0 \cdot \overline{A_1} \cdot D;$$

$$X_3 = A_0 \cdot A_1 \cdot D.$$

Т а б л и ц а 4.4

A_0	A_1	X_0	X_1	X_2	X_3
0	0	D	0	0	0
0	1	0	D	0	0
1	0	0	0	D	0
1	1	0	0	0	D

Структурная схема демультиплексора представлена на рис. 4.15. Она включает два инвертора и четыре элемента И.



Задача 4.16. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов с модулем счета $K = 6$ на JK-триггерах. Начертить временные диаграммы его работы.

Рис. 4.15

Решение. Последовательный счетчик должен содержать N триггеров, так чтобы число возможных состояний схемы 2^N было равно или больше модуля счета K .

При $N = 3$ $2^3 = 8 > K = 6$. Два состояния схемы избыточны. Схема должна переходить в исходное состояние $Q_3 Q_2 Q_1 = 000$ после шестого импульса, когда $Q_3 Q_2 Q_1 = 110$. Это достигается с помощью комбинационной схемы, подающей при таком наборе выходных сигналов сигнал на входы R . Схема счетчика приведена на рис. 4.16, а, а временные диаграммы – на рис. 4.16, б.

Например, после прихода пятого импульса в счетчике записано число $Q_3 Q_2 Q_1 = 101_2 = 5_{10}$.

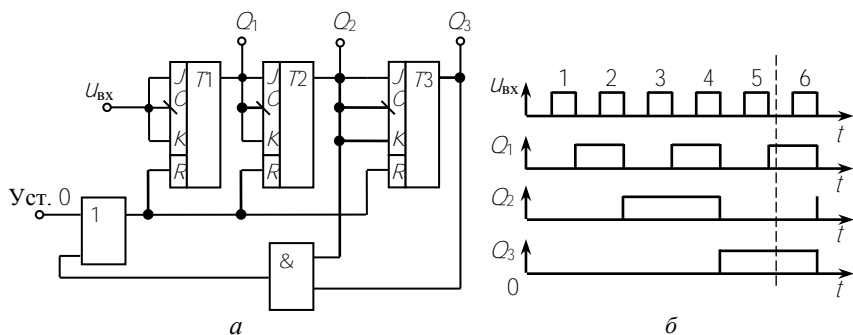


Рис. 4.16

Контрольные задачи

Задача 4.17. Определить период T , длительность импульса $t_{и}$ и паузы $t_{п}$, если частота следования импульсов $f = 10$ кГц, а скважность $Q = 10$.

Задача 4.18. Используя условие задачи 4.2, начертить форму выходного напряжения, если на вход схемы поступают прямоугольные импульсы с амплитудой $U_m = 2$ В, частотой $f = 1$ кГц и скважностью $Q = 5$.

Задача 4.19. Определить емкости C_1 и C_2 конденсаторов для получения на выходе мультивибратора (см. рис. 4.3) симметричных импульсов с частотой $f = 10$ кГц, если $R_1 = R_2 = 10$ кОм.

Задача 4.20. В схеме мультивибратора на ОУ (см. рис. 4.4) $R = 10$ кОм, $C = 0,01$ мкФ, $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 30$ кОм. Рассчитать частоту импульсов. Объяснить с помощью временной диаграммы изменение частоты при изменении R_2 .

Задача 4.21. Определить емкость конденсатора в схеме ГЛИН (см. рис. 4.6), если $U_{\text{вых } m} = 6$ В, $E_K = 24$ В, $R_K = 10$ кОм и $t_{\text{и}} = 1$ мс.

Задача 4.22. Составить таблицы истинности для функций, реализуемых логическими элементами 2И–НЕ, 3ИЛИ–НЕ. Дать условное обозначение этих элементов.

Задача 4.23. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего функцию:

$$\text{а) } F_1 = \bar{X}_1 + X_2 + \bar{X}_3; \quad \text{б) } F_2 = X_1 X_2 + X_3.$$

Задача 4.24. Составить функциональную схему устройства, реализующего логические функции $F_1 = \bar{X}$, $F_2 = X_1 + X_2$, $F_3 = X_1 X_2$ на логических элементах а) 2И–НЕ; б) 2ИЛИ–НЕ.

Задача 4.25. Составить функциональную схему на логических элементах 2И–НЕ, реализующую функцию $F = X_1 X_2 + \bar{X}_3 X_4$.

Задача 4.26. На рис. 4.17 приведена структурная схема логического устройства. Записать уравнение логической функции, реализуемой этим устройством. При каком наборе входных сигналов $F = 1$?

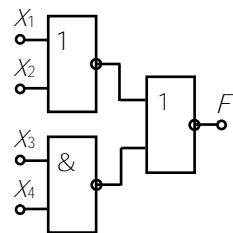


Рис. 4.17

Задача 4.27. Записать функцию и составить схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется единица, если на всех трех или на любых двух входах имеется единица).

Задача 4.28. Составить схему шифратора для преобразования числа из восьмеричного кода в двоичный.

Задача 4.29. Записать логическую функцию F , которую реализует устройство (рис. 4.18.). Минимизировать ее. Упростить схему, используя только одну микросхему К155ЛР1 (2И/ИЛИ-НЕ).

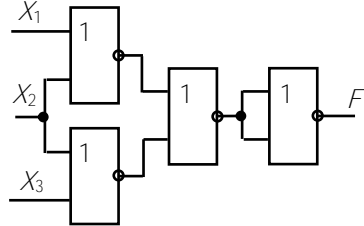


Рис. 4.18.

Задача 4.30. Составить схему дешифратора для перевода числа из двоичного кода в восьмеричный.

Задача 4.31. Составить схему мультиплексора для передачи информации от трех источников по одной линии.

Задача 4.32. Используя схемы мультиплексора и демultipлексора, составить схему передачи информации от трех источников трем приемникам по одной линии связи.

Задача 4.33. Составить таблицу состояний для RS -триггера на элементах И-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера.

Задача 4.34. Какой сигнал установится на выходах Q и \bar{Q} JK -триггера, если к приходу синхроимпульса: а) $J = 1, K = 0$; б) $K = 1, J = 0$; в) $K = 1, J = 1$?

Задача 4.35. Составить схему компаратора двух двоичных четырехразрядных чисел, используя любые логические элементы и схемы.

Задача 4.36. Составить схему T -триггера на основе JK -триггера, привести временные диаграммы его работы.

Задача 4.37. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на D -триггерах с модулем счета $K = 8$. Начертить временные диаграммы его работы.

Задача 4.38. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на JK -триггерах с модулем счета $K = 5$. Начертить временные диаграммы его работы. Каково состояние выходов счетчика после прихода трех импульсов?

Ответы к контрольным задачам

4.17. $T = 0,1$ мс, $t_{\text{и}} = 0,01$ мс, $t_{\text{п}} = 0,09$ мс.

4.19. $C_1 = C_2 = 7,1$ нФ.

4.21. $C_2 = 0,4$ мкФ.

4.26. $X_1 = X_3 = X_4 = 1$, $X_2 = X_3 = X_4 = 1$.

4.27. $Y = X_1 X_2 + X_2 X_3 + X_1 X_3$

4.34. а) $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$, б) $Q = 0$, $\bar{Q} = 1$, в) $Q_{n+1} = \bar{Q}_n$.

4.38. $Q_3 Q_2 Q_1 = 011$.

**Тест 4.1 для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов**

Вариант 1

1. Преобразовать логическую функцию

$$F = (X_1 + \overline{X_2} + \overline{X_3}) + \overline{(X_3 + X_4)} + (X_6 + \overline{X_7})$$

для реализации на элементах 2И–НЕ. Начертить схему на заданных логических элементах.

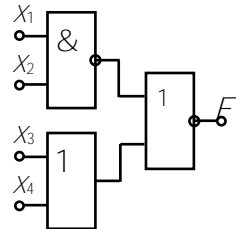
2. Используя логические элементы 3И, НЕ, составить комбинационную схему, вырабатывающую на выходе сигнал логической единицы только при поступлении на ее входы заданной комбинации входных сигналов 0101001. Записать логическую функцию, отражающую работу устройства.

3. Преобразовать логическую функцию

$$F = \overline{X_1 \overline{X_2} X_3 X_4 + X_5 \overline{X_6} X_7}$$

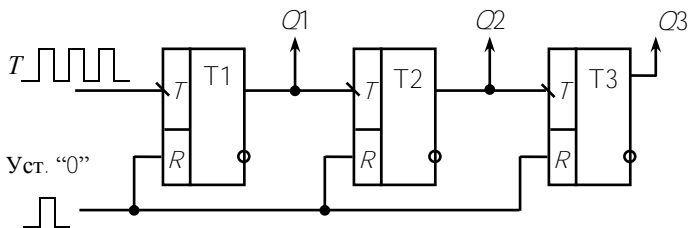
для реализации на элементах 2ИЛИ, 2И, НЕ. Начертить схему на заданных элементах.

4. Записать уравнение функции, которую реализует данная схема. При каких сочетаниях входных сигналов $F = 1$?



5. Составить функциональную схему на логических элементах 2И–НЕ, реализующую функцию $F = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2$.

6. Схема какого цифрового устройства дана на рисунке? Каковы состояния выходов триггеров $Q1$, $Q2$, $Q3$ после подачи на основной T -вход третьего импульса?



Вариант 2

1. Минимизировать логическую функцию

$$F = \overline{\overline{X_1 + X_2 + X_3 + X_1}}$$

с помощью тождеств алгебры логики для реализации схемы на ЛЭ 2И–НЕ. Начертить схему на заданных логических элементах.

2. В базисе 2И–НЕ разработать комбинационное устройство с четырьмя входами, которое дает на выходе $F = 1$ при подаче на входы чисел 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 в двоичном коде. При подаче на входы других чисел $F = 0$.

3. Составить схему на логических элементах 2ИЛИ–НЕ для подключения электродвигателя с двух мест: непосредственно у машины ($X_1 = 1$); с диспетчерского пункта ($X_2 = 1$); напряжение питания двигателя $U = U_{ном}$ ($X_3 = 1$).

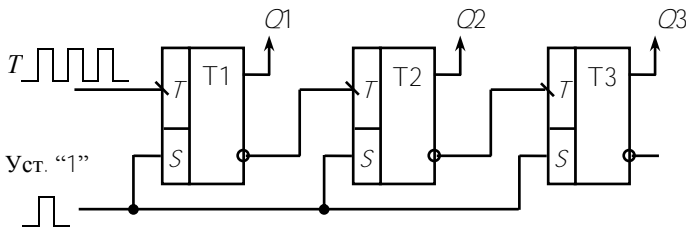
4. Создать схему мультиплексора $2 \rightarrow 1$ (логического переключателя) для передачи информации от двух источников (D_0, D_1) на выход F в соответствии с кодом адреса (A или \bar{A}). Предварительно записать логическую функцию работы мультиплексора, минимизировать ее по правилам алгебры логики для реализации схемы на логических элементах 2И–НЕ.

Начертить условное графическое обозначение мультиплексора.

5. По таблице истинности составить схему асинхронного RS -триггера, начертить его условное графическое обозначение.

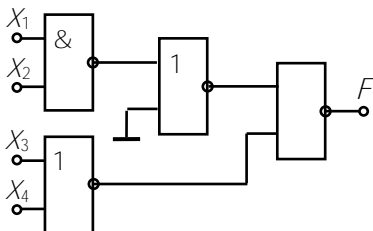
\bar{S}	\bar{R}	Q_{n+1}
1	1	Q_n
0	1	1
1	0	0
0	0	Не определено

6. Схема какого цифрового устройства дана на рисунке? Каковы состояния выходов триггеров Q_1, Q_2, Q_3 после подачи на основной T -вход третьего импульса?



Вариант 3

1. Записать уравнение функции, которую реализует данная схема. При каких сочетаниях входных сигналов $F = 1$?

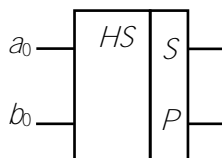


2. Наборное поле кодированного замка состоит из 6-ти кнопок. Составить комбинационную схему на элементах 2И–НЕ, позволяющую открывать замок при нажатии 1, 4, 5-ой кнопок (на 1, 4, 5-ый входы схемы поданы сигналы логической единицы). Записать уравнение логической функции.

3. Составить схему демультиплексора для управляемой передачи информации, поступающей по одному D входу на два выхода: X_0, X_1 .

4. Используя логические элементы 2ИЛИ–НЕ, построить схему контроля исправности технологического агрегата (сигнал на выходе схемы $F = 1$), если информация о нормальном функционировании агрегата поступает параллельно от двух цифровых датчиков в виде логических единиц.

5. Составить схему полусумматора на логических элементах.



6. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на JK -триггерах с модулем счета $K = 7$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М. : ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
3. Расчет электронных схем. Примеры и задачи / Г.И. Изъюрова [и др.]. – М. : Высшая школа, 1987. – 335 с.
4. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс) : учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
5. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М. : Высшая школа, 2005. – 790 с.
6. Прянишников, В.А. Электроника : полный курс лекций. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 415 с.
7. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : в 2 ч. / У. Титце, К. Шенк ; пер. с нем. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Ч. 1. – 832 с.
8. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : в 2 ч. / У. Титце, К. Шенк ; пер. с нем. – М. : ДМК Пресс, 2007. – Ч. 2. – 942 с.
9. Галкин, В.И. Полупроводниковые приборы : справочник / В.И. Галкин, А.Л. Булычев, В.А. Прохоренко. – Минск : Беларусь, 1987. – 285 с.
10. Цифровые интегральные микросхемы : справочник / М.И. Богданович [и др.]. – Минск : Беларусь, 1991. – 493 с.
11. Аналоговые интегральные микросхемы : справочник / А.Л. Булычев [и др.]. – Минск : Беларусь, 1993.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ВЫПРЯМИТЕЛИ	3
Задачи с решениями	3
Контрольные задачи	22
Ответы к контрольным задачам	24
Тест 1.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	25
2. ТРАНЗИСТОРЫ И УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ	29
Задачи с решениями	29
Контрольные задачи	42
Ответы к контрольным задачам	47
Тест 2.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	48
3. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	51
Задачи с решениями	51
Контрольные задачи	61
Ответы к контрольным задачам	63
Тест 3.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	64
4. ИМПУЛЬСНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА	68
Задачи с решениями	68
Контрольные задачи	80
Ответы к контрольным задачам	83
Тест 4.1 для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов	84
ЛИТЕРАТУРА	87

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Сборник задач с контрольными тестами
для студентов неэлектротехнических специальностей*

В 6 частях

Часть 6

ЭЛЕКТРОНИКА

Составители:

БЛАДЫКО Юрий Витальевич
РОЗУМ Таисия Терентьевна
ГАВРИЛЕНКО Сергей Демьянович
МИХАЛЬЦЕВИЧ Георгий Александрович

Технический редактор *О.В. Песенько*
Компьютерная верстка *Т.А. Мархель, И.Н. Михневич*

Подписано в печать 29.01.2013. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,11. Уч.-изд. л. 4,00. Тираж 200. Заказ 831.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.