

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
КАФЕДРА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Е. В. МЕДВЕДЕВА

ОСНОВЫ СХЕМОТЕХНИКИ

Методические указания и контрольные задания
для студентов заочной формы обучения
специальностей 210406 «Сети связи и системы коммутации»;
210403 «Защищенные системы связи»

Киров 2009

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Номер варианта выбирается по номеру зачетки из таблицы 1.

Таблица 1

№ варианта	№ темы						
	1	2	3	4		5	6
1.	1.1.	2.18.	3.1.	4.4.	4.19.	5.26	6.6.
2.	1.2.	2.19.	3.2.	4.5.	4.20.	5.25	6.7.
3.	1.3.	2.20.	3.3.	4.6.	4.21.	5.24	6.8.
4.	1.4.	2.21.	3.4.	4.7.	4.22.	5.23	6.9.
5.	1.5.	2.22.	3.5.	4.8.	4.23.	5.22	6.10.
6.	1.6.	2.23.	3.6.	4.9.	4.24.	5.21(a)	6.11.
7.	1.7.	2.24.	3.7.	4.10.	4.25.	5.20	6.12.
8.	1.8.	2.25.	3.8.	4.11.	4.26.	5.19	5.20
9.	1.9.	2.1.	3.25	4.12.	4.27.	5.18	5.16
10.	1.10.	2.2.	3.10.	4.15 (a)	4.1	5.15	5.27
11.	1.11.	2.3.	3.11.	4.15 (б)	4.2	5.14	5.28
12.	1.12.	2.4.	3.12.	4.16	4.3	5.13	5.26 (б)
13.	1.13.	2.5.	3.13.	4.17	4.13	5.12	5.29
14.	1.14.	2.6.	3.14.	4.18	4.14	5.11	5.30
15.	1.15.	2.7.	3.15.	4.28	4.19	5.10	6.7
16.	1.16.	2.8.	3.16.	4.29	4.20	5.9	6.8
17.	1.17.	2.9.	3.17.	4.30	4.21	5.8	6.9
18.	1.18.	2.10.	3.18.	4.31	4.22	5.7	6.10
19.	1.19.	2.11.	3.19.	4.32	4.25	5.6	6.11
20.	1.20.	2.12.	3.20.	4.33	4.27	5.5	6.12
21.	1.21.	2.13.	3.21.	4.1	4.6	5.4	6.1
22.	1.22.	2.14.	3.22.	4.2	4.9	5.3	6.2
23.	1.23.	2.15.	3.23.	4.3	4.10	5.2	6.3
24.	1.24.	2.16.	3.24.	4.13	4.11	5.1	6.4
25.	1.25.	2.17.	3.9	4.14	4.15	5.21(б)	6.5

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Вопросы и задачи к разделу 1

- 1.1. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Причины искажений АЧХ на нижних и верхних частотах. Какие параметры АЭУ можно определить по АЧХ?
- 1.2. Амплитудная характеристика (АХ). Причины искажений АХ при малых и больших входных напряжениях. Какие параметры АЭУ можно определить по АХ?
- 1.3. Переходная характеристика (ПХ). Причины искажений ПХ в области малых и больших времен. Какие параметры АЭУ можно определить по ПХ?
- 1.4. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Причины искажений АЧХ на нижних и верхних частотах. Какие параметры АЭУ можно определить по АЧХ?
- 1.5. Причины возникновения линейных искажений в усилителях. Способы уменьшения линейных искажений.
- 1.6. Причины возникновения нелинейных искажений в усилителях. Способы уменьшения нелинейных искажений.
- 1.7. Понятия входного и выходного сопротивления в усилителях. Каковы условия согласования по сопротивлениям усилителя с входным источником сигнала (предыдущим каскадом) и с нагрузкой (с последующим каскадом)?
- 1.8. Причины возникновения собственных шумов в усилителях. Характеристики шумов.
- 1.9. Понятия коэффициент шума, отношение сигнал-шум. Способы уменьшения шумовых параметров в усилителях.
- 1.10. Перечислите и дайте краткую характеристику статических параметров операционного усилителя.
- 1.11. Перечислите и дайте краткую характеристику динамических параметров операционного усилителя.
- 1.12. Перечислите и дайте краткую характеристику эксплуатационных параметров операционного усилителя.
- 1.13. Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя. Причины искажений АЧХ на верхних частотах. Какие параметры ОУ можно определить по АЧХ?

1.14. Амплитудная характеристика (АХ) операционного усилителя. Причины искажений АХ операционного усилителя. Какие параметры ОУ можно определить по АХ?

1.15. Особенности построения многокаскадных усилителей. Требования к входному, выходному и промежуточным каскадам.

1.16. Перечислите виды и особенности межкаскадных связей в усилителях.

1.17. Параметры многокаскадных усилителей: коэффициенты усиления; частотные, переходные и фазовые искажения; нелинейные искажения; коэффициент шума.

1.18. Поясните, как определить основные параметры усилителя на биполярном транзисторе графоаналитическим методом.

1.19. Поясните, как определить основные параметры усилителя на полевом транзисторе графоаналитическим методом.

1.20. Дайте характеристику усилителям, работающим в режимах класса А; В; АВ; С; Д.

1.21. Определить K_I , K_U , K_P усилителя, на входе которого $I_{BX} = 1$ мА, $P_{BX} = 10$ мВт, а на выходе $U_{ВЫХ} = 250$ мВ, $P_{ВЫХ} = 2,5$ Вт.

1.22. Определить сопротивление нагрузки усилителя, если общая потребляемая усилителем мощность 10 Вт, а ток в нагрузке $I_{ВЫХ} = 100$ мА при КПД, равном 90 %.

1.23. Коэффициент усиления трехкаскадного каскадного усилителя равен 8000. Найти коэффициент усиления каждого каскада, если коэффициент усиления каждого последующего каскада в 10 раз больше предыдущего.

1.24. Определить коэффициент нелинейных искажений и коэффициент гармоник усилителя при наличии в выходной цепи трех составляющих гармоник с амплитудами: $I_{m1} = 40$ мА; $I_{m2} = 1$ мА; $I_{m3} = 0,1$ мА.

1.25. В многокаскадном усилителе используются четыре усилителя с коэффициентами усиления 20 дБ, 30 дБ, 40 дБ и 10 дБ. Найти общий коэффициент усиления в относительных единицах.

2. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ. НИЗКОЧАСТОТНАЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ КОРРЕКЦИЯ

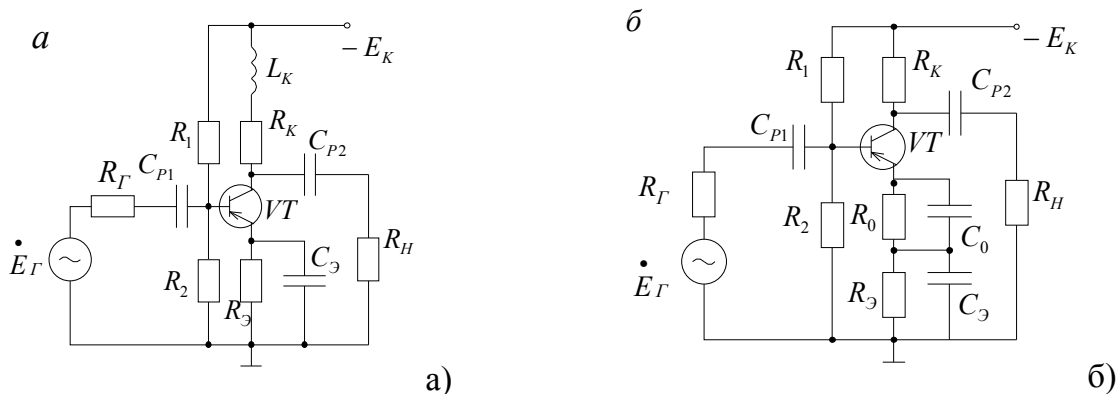


Рис.1

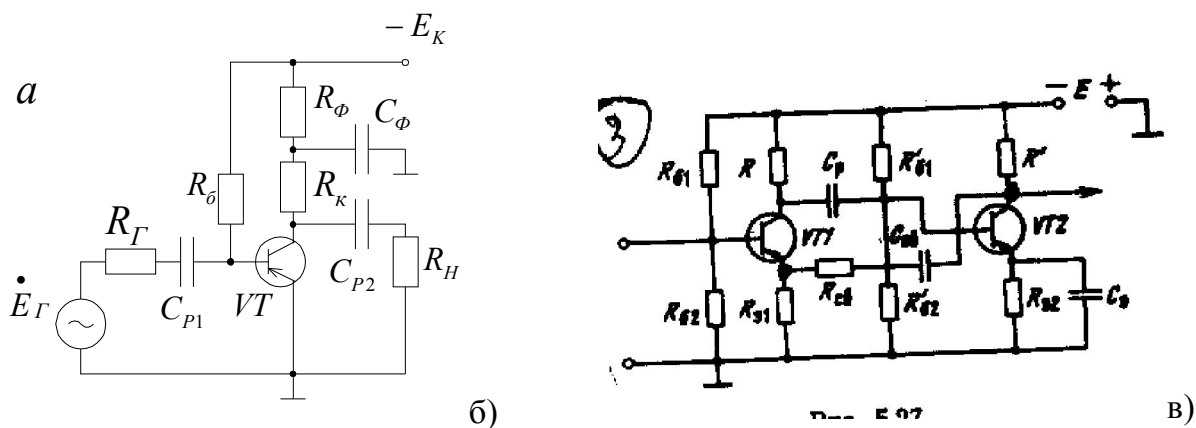


Рис.2

Вопросы и задачи к разделу 2

- 2.1. Понятия параллельной и последовательной обратной связи в усилителях.
- 2.2. Понятия отрицательной и положительной обратной связи в усилителях.
- 2.3. Понятия обратной связи в усилителе по току и напряжению.
- 2.4. Пояснить влияние обратной связи на коэффициент усиления. Как изменится коэффициент усиления, если петлевое усиление $K \cdot \chi < 0$; $0 < K \cdot \chi < 1$ и $K \cdot \chi > 1$.
- 2.5. Пояснить влияние отрицательной обратной связи на стабильность коэффициента усиления.
- 2.6. Пояснить влияние обратной связи на нелинейные искажения.
- 2.7. Пояснить влияние обратной связи на входное и выходное сопротивления усилителя с последовательной ООС по напряжению.
- 2.8. Пояснить влияние обратной связи на входное и выходное сопротивление усилителя с параллельной ООС по току.

2.9. Пояснить влияние положительной и отрицательной обратной связи на АЧХ.

2.10. Пояснить влияние положительной и отрицательной обратной связи на ФЧХ

2.11. Причины потери устойчивости усилителей с ОС. В чем это выражается. Критерий Найквиста. Как повысить устойчивость усилителей.

2.12. Принцип работы усилителя с параллельной индуктивной высокочастотной коррекцией (рис.1а). Выбор параметров элементов ВЧ-коррекции. Влияние коэффициента ВЧ-коррекции на АЧХ.

2.13. Принцип работы усилителя с параллельной индуктивной высокочастотной коррекцией (рис.1а). Выбор параметров элементов ВЧ-коррекции. Влияние коэффициента ВЧ-коррекции на переходную характеристику.

2.14. Принцип работы усилителя с эмиттерной высокочастотной коррекцией (рис.1б). Выбор параметров элементов ВЧ-коррекции. Влияние коэффициента ВЧ-коррекции на АЧХ.

2.15. Принцип работы усилителя с низкочастотной коррекцией ($R_{\phi}C_{\phi}$ -фильтром) (рис.2а). Выбор параметров элементов НЧ-коррекции. Влияние коэффициента НЧ-коррекции на АЧХ.

2.16. Принцип работы усилителя с низкочастотной коррекцией ($R_{\phi}C_{\phi}$ -фильтром) (рис.2а). Выбор параметров элементов НЧ-коррекции. Влияние коэффициента НЧ-коррекции на переходную характеристику.

2.17. Принцип работы усилителя с низкочастотной коррекцией (с частотно-зависимой ООС) (рис.2б). Выбор параметров элементов НЧ-коррекции. Влияние коэффициента НЧ-коррекции на АЧХ.

2.18. При изменении напряжения питания от 11 до 12 В коэффициент усиления интегрального усилителя типа К140УД6 изменяется от $4,5 \cdot 10^3$ до $6 \cdot 10^3$. Для случая введения линейной цепи ООС с $\chi=0,01$ определить значение $K_{U \text{ ООС}}$ и нестабильность коэффициента усиления с ООС.

2.19. Усилитель низкой частоты, выполненный на основе интегрального усилителя постоянного тока типа КР1407УД2, имеет коэффициент нелинейных искажений $K_{НИ}=0,1$. Определить значение $K_{НИ \text{ ООС}}$ при условии, что после введения цепи ООС $K_{U \text{ ООС}}=100$. Исходное значение $K_U=50 \cdot 10^3$.

2.20. Коэффициент усиления усилителя типа К140УД7 равен $K_U=30 \cdot 10^3$, постоянная времени $\tau_B=1,59 \cdot 10^{-3}$. Определить глубину ООС и соответствующий ей коэффициент усиления $K_{U \text{ ООС}}$ из условия $f_{B \text{ ООС}}=10$ кГц.

2.21. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению усилителя, в котором действует последовательная ООС по напряжению, если напряжение на входе

усилителя без обратной связи $U_{ex} = 10$ мВ, выходное напряжение $U_{вых} = 1$ В, напряжение в цепи обратной связи $U_{oc} = 90$ мВ.

2.22. Найти коэффициент усиления по напряжению усилителя с последовательной ООС по напряжению, если коэффициент усиления по напряжению без ОС $K_u = 200$ и коэффициент передачи цепи ОС $\chi = 0,045$.

2.23. Рассчитать коэффициент усиления по напряжению усилителя, в котором действует последовательная ООС по току, если $U_{ex} = 1$ мВ, $U_{вых} = 2$ В, $U_{oc} = 9$ мВ.

2.24. Найти коэффициент усиления по напряжению усилителя с последовательной ООС по току, если коэффициент усиления по напряжению без ОС $K_u = 600$, $R_{oc} = 0,5$ Ом, $R_H = 6$ Ом, $R_{вых} \ll R_H$.

2.25. Рассчитать коэффициент гармоник в усилителе с последовательной ООС по току, если в усилителе без ОС коэффициент гармоник $K_G = 0,2$, коэффициент усиления по напряжению $K_u = 1000$, $R_{oc} = 0,5$ Ом, $R_H = 6$ Ом, $R_{вых} \ll R_H$.

3. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В УСИЛИТЕЛЯХ

Основные формулы

Схема усилительного каскада с заданием рабочей точки фиксированным током базы (рис. 3):

$$R_B = \frac{E_K - U_{БЭП}}{I_{БП}} \approx \frac{E_K}{I_{БП}}, \quad R_K = \frac{E_K - U_{КЭП}}{I_{КП}}. \quad (1)$$

Схема усилительного каскада с заданием рабочей точки фиксированным напряжением базы (рис. 4):

$$I_D \approx 5 \dots 10 I_{БП}, \quad R_1 = \frac{E_K - U_{БЭП}}{I_{БП} + I_D}, \quad R_2 = \frac{U_{БЭП}}{I_D}, \quad R_K = \frac{E_K - U_{КЭП}}{I_{КП}}. \quad (2)$$

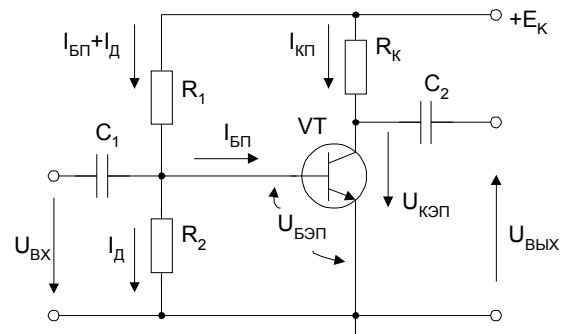
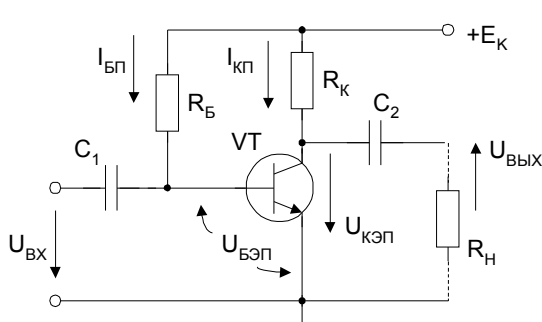


Рис. 3

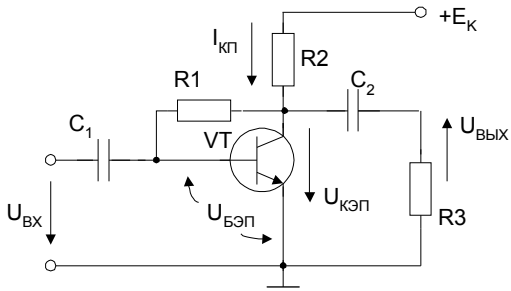


Рис. 5

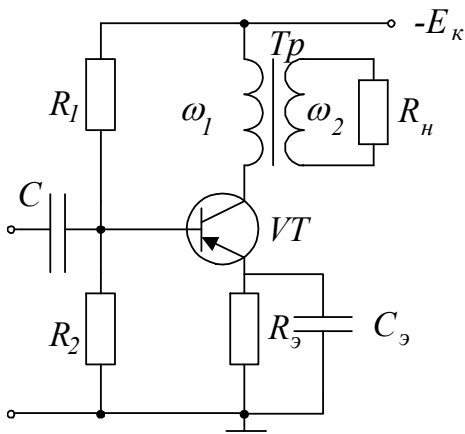


Рис. 7

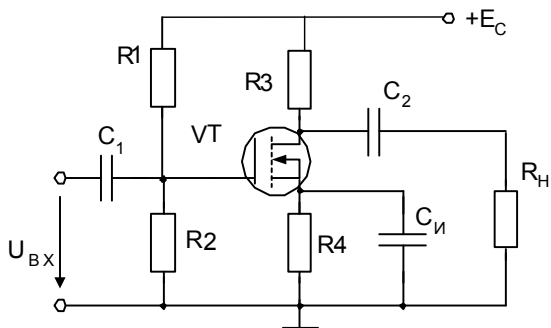


Рис. 10

Рис. 4

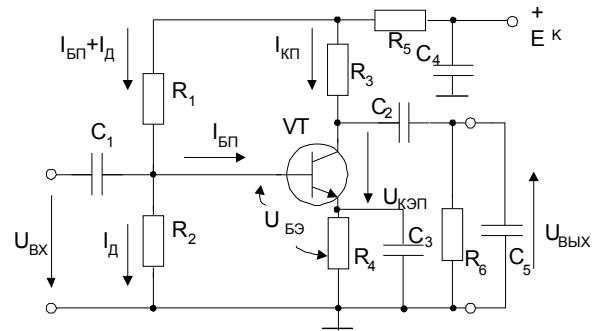


Рис. 6

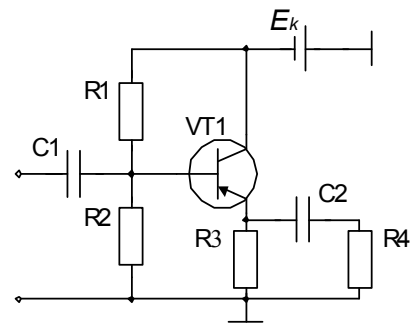
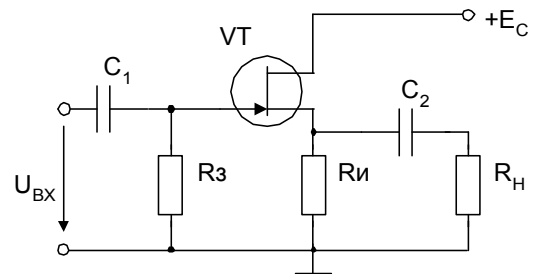


Рис. 8



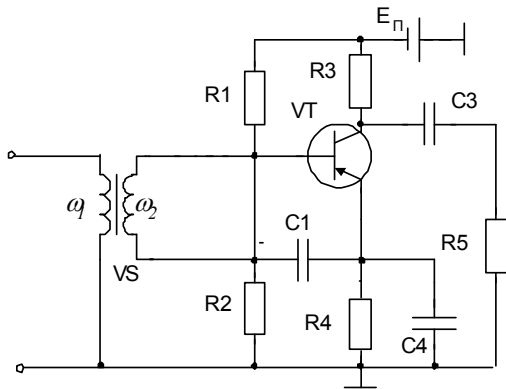


Рис. 11

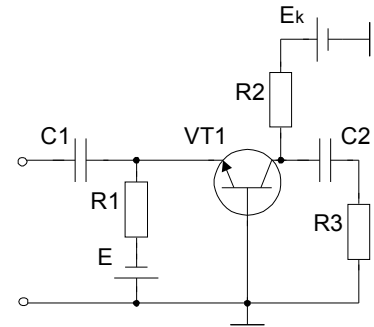


Рис. 12

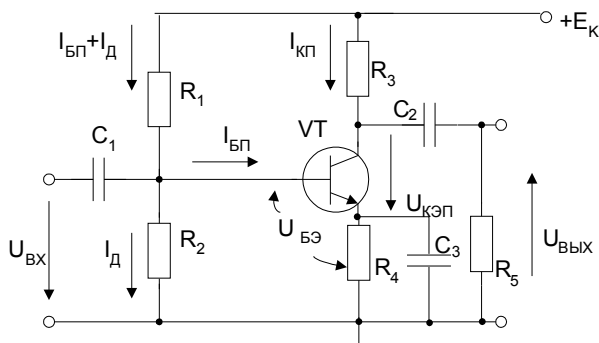


Рис. 13

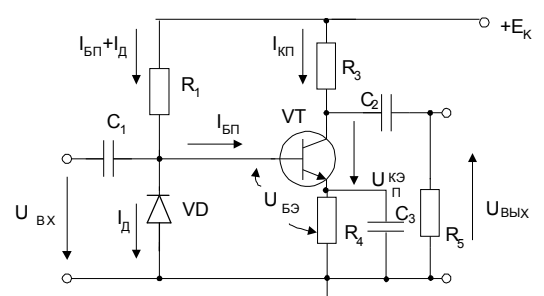


Рис. 14

Пример. Вычислить сопротивление R_1 в усилителе по схеме рис. 5, если напряжение питания равно 15 В, напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ} = 0,6$ В, ток коллектора $I_{к0} = 10$ мА, коэффициент передачи тока транзистора $h_{21Э} = 50$, сопротивление $R_2 = 1$ кОм.

Решение. Сопротивление $R_1 = \frac{E_n - I_{к0}R_2 - U_{бэ}}{I_{к0} / h_{21Э}} = \frac{15 - 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 - 0,6}{10 \cdot 10^{-3} / 50} =$

22 кОм.

Вопросы и задачи к разделу 3

3.1. Пояснить механизм работы термостабилизации в усилителе с параллельной ООС по напряжению (рис. 5 - цепь R_1R_2) (Как изменение температуры влияет на выходной ток?). Каковы преимущества и недостатки данной схемы.

3.2. Пояснить механизм работы термостабилизации в усилителе с последовательной ООС по току (рис.13 – цепь R_4C_3) (Как изменение температуры влияет на выходной ток?). Каковы преимущества и недостатки данной схемы.

3.3. Пояснить механизм работы термостабилизации в усилителе с комбинированной ООС по току (рис.6 - цепь R_4C_3 и R_1R_5) (Как изменение

температуры влияет на выходной ток?). Каковы преимущества и недостатки данной схемы.

3.4. Пояснить механизм работы термокомпенсации в усилителе (рис.14) (Как изменение температуры влияет на выходной ток?). Каковы преимущества и недостатки данной схемы.

3.5. Схема задания рабочей точки в усилителе на биполярном транзисторе с фиксированным напряжением. Пояснить назначение элементов в схеме. Как влияет на положение рабочей точки на ВАХ изменение входного напряжения.

3.6. Схема задания рабочей точки в усилителе на биполярном транзисторе с фиксированным током. Пояснить назначение элементов в схеме. Как влияет на положение рабочей точки на ВАХ изменение входного напряжения.

3.7. Схемы задания рабочей точки в усилителе на МДП-транзисторе с индуцированным каналом. Пояснить назначение элементов в схеме. Как влияет на положение рабочей точки на ВАХ изменение входного напряжения.

3.8. Схемы задания рабочей точки в усилителе на МДП-транзисторе со встроенным каналом. Пояснить назначение элементов в схеме. Как влияет на положение рабочей точки на ВАХ изменение входного напряжения.

3.9. Схемы задания рабочей точки в усилителе на полевом транзисторе с управляющим p-n переходом. Пояснить назначение элементов в схеме. Как влияет на положение рабочей точки на ВАХ изменение входного напряжения.

3.10. В схеме усилительного каскада с заданием рабочей точки фиксированным током базы от питающего напряжения E_K и заземленным эмиттером (рис. 3) определить R_K и R_B при следующих условиях: $h_{21Э} = 50$; $U_{КЭП} = 5$ В; $I_{КП} = 2$ мА; $E_K = 9$ В.

3.11. Решить задачу 3.1 при условии, что в эмиттерную цепь включен резистор с сопротивлением 100 Ом.

3.12. В схеме усилительного каскада с заданием рабочей точки фиксированным напряжением базы и заземленным эмиттером (рис. 4) определить R_1 и R_2 при следующих условиях: $h_{21Э} = 50$; $U_{КЭП} = 10$ В; $I_{КП} = 500$ мА; $E_K = 12$ В; $U_{БЭП} = 1$ В.

3.13. Решить задачу 3.3 при условии, что в эмиттерную цепь включен резистор с сопротивлением 10 Ом.

3.14. Рассчитать напряжение источника питания E_K в усилителе по схеме рис. 4, если напряжение между базой и эмиттером 0,34 В, ток коллектора $I_K = 1,9$ мА, ток базы $I_Б = 0,1$ мА, сопротивления $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $R_K = 500$ Ом.

3.15. Определить сопротивление R_5 в усилителе по схеме рис. 6, если напряжение источника питания $E_K = 20$ В, напряжение между базой и эмиттером транзистора равно 0,19 В, ток коллектора $I_K = 2,9$ мА, ток базы $I_{\delta} = 0,1$ мА, сопротивления $R_1 = 11$ кОм, $R_2 = 4,7$ кОм и $R_4 = 1,32$ кОм.

3.16. Вычислить напряжение питания E_K в усилителе по схеме рис. 5, если напряжение между коллектором и эмиттером транзистора равно 9,3 В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,6$ В, статический коэффициент передачи тока $h_{21\epsilon} = 50$ и сопротивления $R_1 = 100$ кОм, $R_2 = 1$ кОм.

3.17. Найти сопротивление резистора R_2 в усилителе по схеме рис. 7, если напряжение источника питания $E_K = 9$ В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,2$ В, ток базы $I_{\delta} = 0,1$ мА, сопротивление резистора $R_1 = 8$ кОм.

3.18. Определить сопротивление R_1 в усилителе по схеме рис. 8, если напряжение источника питания $E_K = 12$ В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,36$ В, ток базы $I_{\delta} = 0,32$ мА, ток коллектора $I_K = 2,8$ мА, сопротивления $R_2 = 2$ кОм и $R_3 = 720$ Ом.

3.19. Вычислить сопротивление R_2 в усилителе по схеме рис. 8, если напряжение источника питания $E_K = 12$ В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,36$ В, ток базы $I_{\delta} = 0,32$ мА, ток коллектора $I_K = 2,8$ мА, сопротивления $R_1 = 3$ кОм и $R_3 = 720$ Ом.

3.20. Рассчитать сопротивление R_4 в усилителе по схеме рис. 6, если напряжение источника питания $E_K = 14$ В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,3$ В, ток базы $I_{\delta} = 0,12$ мА, ток коллектора $I_K = 3$ мА, сопротивления $R_1 = 6,2$ кОм и $R_2 = 2$ кОм.

3.21. Чему равен ток коллектора транзистора в усилителе по схеме рис. 11, если напряжение источника питания $E_K = 9$ В, напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,33$ В, ток базы $I_{\delta} = 0,1$ мА, сопротивления $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $R_4 = 500$ Ом?

3.22. Каково напряжение питания в усилителе по схеме рис. 6, если напряжение между базой и эмиттером $U_{\delta\epsilon} = 0,2$ В, ток коллектора $I_K = 3$ мА, ток базы $I_{\delta} = 0,1$ мА, сопротивления $R_1 = 8,2$ кОм, $R_2 = 3,6$ кОм и $R_4 = 540$ Ом?

3.23. Чему равно напряжение источника питания в усилителе по схеме рис. 9, если напряжение между затвором и истоком равно 1В, ток стока 1 мА, сопротивления $R_1 = 100$ кОм, $R_2 = 100$ кОм и $R_4 = 1$ кОм?

3.24. Каков ток стока транзистора в усилителе по схеме рис. 10, если напряжение источника питания $E_c = 12$ В, напряжение между затвором и истоком $U_{зи} = 2$ В, сопротивления $R_1 = 4$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $R_3 = 3$ кОм?

3.25. Определить напряжение источника питания E_c в усилителе по схеме рис. 9, если напряжение между стоком и истоком $U_{си} = 6$ В, напряжение между истоком и затвором $U_{зи} = 1$ В, ток стока 10 мА, ток делителя напряжения 0,1 мА, сопротивления $R_2 = 4$ кОм и $R_3 = 2$ кОм. В режиме обогащения или обеднения работает транзистор при этих условиях?

4. УСИЛИТЕЛИ НА ТРАНЗИСТОРАХ

4.1. Усилители на биполярных транзисторах Основные формулы

Эквивалентная схема замещения каскада с общим эмиттером по переменному току (рис. 13):

$$R_{ex} = R_d \parallel (r_3 + (1 + \beta)r_э), \quad R_{вых} = R_k \parallel r_k, \quad R_d = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$u_{ex} = R_{ex} I_{ex}, \quad u_{вых} = R_n \parallel R_k \cdot I_k, \quad I_{ex} = \frac{E_\Gamma}{R_\Gamma + R_{ex}},$$

$$K_I = \beta \frac{R_n \parallel R_k}{R_n}, \quad K_U = -\beta \frac{R_n \parallel R_k}{R_\Gamma + R_{ex}}.$$

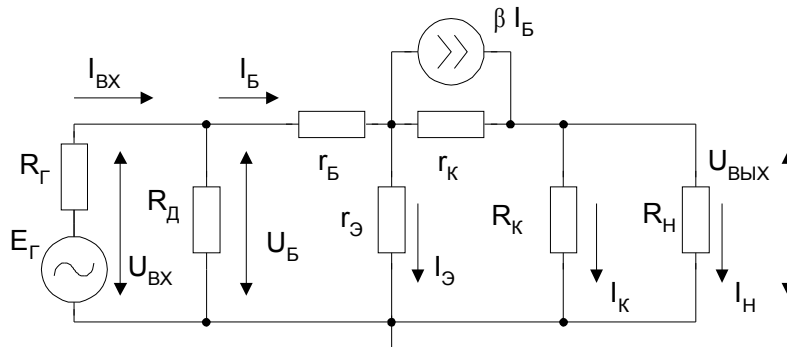


Рис. 15

Эквивалентная схема замещения каскада с общей базой по переменному току (рис. 15):

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{д}} \parallel (r_{\text{э}} + (1 - \alpha)r_{\text{э}}), \quad R_{\text{вых}} = R_{\text{к}}, \quad R_{\text{д}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$u_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} I_{\text{вх}}, \quad u_{\text{вых}} = R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}} \cdot I_{\text{к}}, \quad I_{\text{вх}} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}},$$

$$K_I = \alpha \frac{R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}}}{R_{\text{н}}}, \quad K_U = \alpha \frac{R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{вх}}}.$$

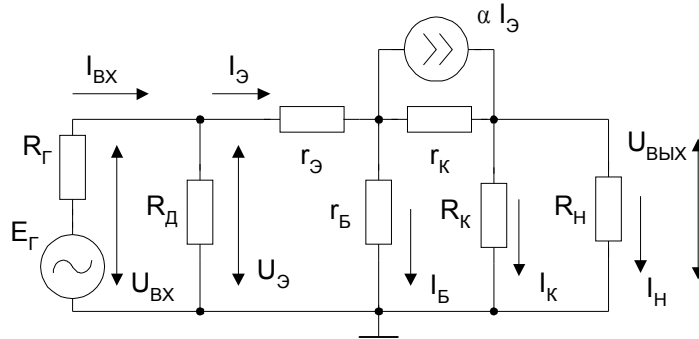


Рис. 16

Эквивалентная схема замещения каскада с общим коллектором по переменному току (рис. 16):

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{д}} \parallel (r_{\text{б}} + (1 + \beta)(r_{\text{э}} + R_{\text{э}} \parallel R_{\text{н}})), \quad R_{\text{вых}} = R_{\text{э}} \parallel r_{\text{э}}, \quad R_{\text{д}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$K_I = (1 + \beta) \frac{R_{\text{н}} \parallel R_{\text{э}}}{R_{\text{н}}}, \quad K_U = (1 + \beta) \frac{R_{\text{э}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}}.$$

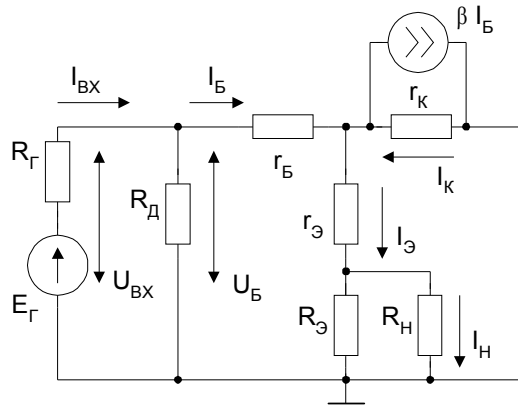


Рис. 17

Пример. В схеме усилителя с ОЭ определить $U_{\text{вых}}$ и $R_{\text{вых}}$, если $U_{\text{вх}} = 6$ мВ;
 $R_{\text{вн.э}} = 200$ Ом; $R_{\text{к}} = 2$ кОм; $R_{\text{б}} \gg h_{11\text{э}}$; $h_{21\text{э}} = 60$; $h_{11\text{э}} = 1$ кОм; $h_{22\text{э}} = 15 \cdot 10^{-5}$ См.

Решение. Входной ток $I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / (R_{\text{вх}} + R_{\text{г}})$;

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{б}} \parallel r_{\text{вх}} \approx r_{\text{вх}} \approx h_{11\text{э}} = 1 \text{ кОм (при } R_{\text{б}} \gg h_{11\text{э}}); \quad I_{\text{вх}} = 6 / (1 + 0,2) = 5 \text{ мкА.}$$

Выходной ток $I_{\text{вых}} = I_{\text{ex}} \cdot h_{21э} = 5 \cdot 60 = 0,3 \text{ мА}$.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{вых}}$.

Выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = r_{\text{вых mp}} \parallel R_{\text{к}}$, где $r_{\text{вых mp}} = 1/h_{21э}$;
 $R_{\text{вых}} = 2 \cdot 6,667 / 8,667 = 1,538 \text{ кОм}$; $U_{\text{вых}} = 1,538 \cdot 0,3 \approx 0,46 \text{ В}$.

Вопросы и задачи к разделу 4.1.

4.1. Принцип работы усилительного каскада с общим эмиттером (ОЭ) по переменному току. Назначение элементов в схеме. Схема замещения. Основные параметры (коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления).

4.2. Принцип работы усилительного каскада с общим коллектором (ОК) по переменному току. Назначение элементов в схеме. Схема замещения. Основные параметры (коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления).

4.3. Принцип работы усилительного каскада с общей базой (ОБ) по переменному току. Назначение элементов в схеме. Схема замещения. Основные параметры (коэффициенты усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления).

4.4. Определить выходное сопротивление усилителя (рис. 3), если $R_{\text{к}} = 2 \text{ кОм}$, $h_{22э} = 15 \cdot 10^{-5} \text{ См}$. Определить входное сопротивление усилителя, если $E_{\text{с}} = 0,1 \text{ В}$; $I_{\text{ex}} = 2 \text{ мА}$; $R_{\text{с}} = 10 \text{ Ом}$ (параметры источника сигнала).

4.5. Рассчитать сопротивления $R_{\text{б}}$, R_{ex} , $R_{\text{вых}}$ усилителя с ОЭ (рис. 3) при следующих заданных параметрах: $E_{\text{к}} = 10 \text{ В}$; $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$; $U_{\text{кo}} = 3,5 \text{ В}$; $U_{\text{бo}} = 350 \text{ мВ}$; $I_{\text{бo}} = 150 \text{ мкА}$; $h_{21э} = 56$; $h_{1б} = 330 \text{ Ом}$; $h_{22э} = 62 \cdot 10^{-6} \text{ См}$; $h_{12э} = 0$.

4.6. Вычислить сопротивления R_1 , R_2 , R_{ex} , $R_{\text{вых}}$, K_u , K_I усилителя с ОЭ (рис. 2) при следующих заданных параметрах: $E_{\text{к}} = 10 \text{ В}$; $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$; $R_{\text{с}} = 0,1 \text{ кОм}$; $U_{\text{кo}} = 3,5 \text{ В}$; $U_{\text{бo}} = 350 \text{ мВ}$; $I_{\text{бo}} = 150 \text{ мкА}$; $h_{21б} = 56$; $h_{11э} = 330 \text{ Ом}$; $h_{22э} = 62 \cdot 10^{-6} \text{ См}$; $h_{12э} = 0$. Нагрузкой служит аналогичный каскад.

4.7. Определить K_u в схеме усилителя с ОЭ, если $I_{\text{кo}} = 10 \text{ мА}$; $R_{\text{к}} = 500 \text{ Ом}$; $U_{\text{ex}} = 0,1 \text{ В}$.

4.8. В схеме усилителя с ОЭ определить U_{ex} , если $I_{\text{ex}} = 2 \text{ мА}$; $R_{\text{ex}} = 200 \text{ Ом}$; $R_{\text{вн.2}} = 50 \text{ Ом}$.

4.9. В схеме усилителя с ОБ (рис. 12) вычислить все параметры по

переменному току при следующих условиях: $R_{вн.э} = 50 \text{ Ом}$; $R_k = 5 \text{ кОм}$; $R_9 = 10 \text{ кОм}$; $R_H = 5 \text{ кОм}$; $h_{219} = 49$; $h_{119} = 1,5 \text{ кОм}$; $h_{229} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ См}$; $h_{129} = 5 \cdot 10^{-4}$.

4.10. В схеме эмиттерного повторителя определить все параметры по переменному току при следующих исходных данных: $R_{вн.э} = 1 \text{ кОм}$; $R_1 = 1 \text{ МОм}$; $R_9 = 2 \text{ кОм}$; $R_H = 2 \text{ кОм}$; $r_{\bar{o}} = 400 \text{ Ом}$; $h_{219} = 49$; $r_9 = 25 \text{ Ом}$.

4.11. В схеме с ОК $R_1 = 39 \text{ кОм}$, $R_2 = 62 \text{ кОм}$ (входной делитель), $R_9 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 2 \text{ кОм}$, $R_H = 100 \text{ Ом}$, $r_{\bar{o}} = 50 \text{ Ом}$, $r_9 = 5 \text{ Ом}$, $r_{к9} = 10 \text{ кОм}$, $\beta = 80$. Рассчитать емкость разделительных конденсаторов C_1 и C_2 , если допустимый коэффициент частотных искажений M_H на частоте 100 Гц составляет 1,1.

4.12. В схеме с ОЭ $R_1 = 62 \text{ кОм}$, $R_2 = 3 \text{ кОм}$ (входной делитель), $R_k = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 2 \text{ кОм}$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, $r_{\bar{o}} = 50 \text{ Ом}$, $r_9 = 5 \text{ Ом}$, $r_{к9} = 10 \text{ кОм}$, $\beta = 80$. Рассчитать емкость разделительных конденсаторов C_1 и C_2 , если допустимый коэффициент частотных искажений M_H на частоте 100 Гц составляет 1,1.

4.2.. Усилители на полевых транзисторах Основные формулы

Усилительный каскад с общим истоком (рис. 18,19):

$$R_{\text{вх}} = R_{\bar{d}}, \quad R_{\text{ввых}} = R_c \parallel r_i, \quad R_{\bar{d}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{H \approx} = R_c \parallel R_H, \quad K_U = \frac{S r_i R_{H \approx}}{r_i + R_{H \approx}}.$$

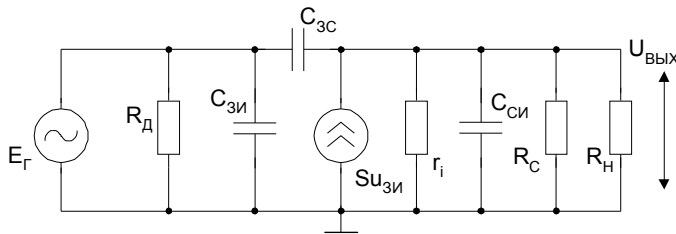


Рис. 18

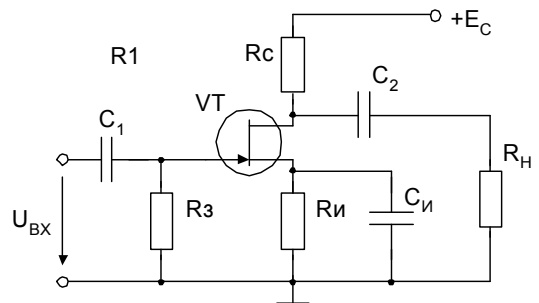


Рис. 19

Усилительный каскад с общим стоком (рис. 20,21)

$$R_{\text{вх}} = R_3, \quad R_{\text{ввых}} = \frac{R_c}{R_c S + 1}, \quad R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

$$R_{H \approx} = R_H \parallel R_c, \quad K_U = \frac{S R_{H \approx}}{S R_{H \approx} + 1}.$$

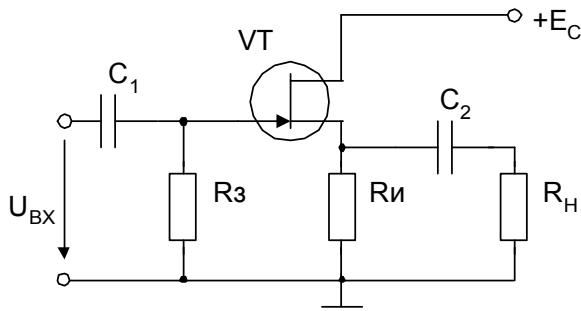


Рис. 20

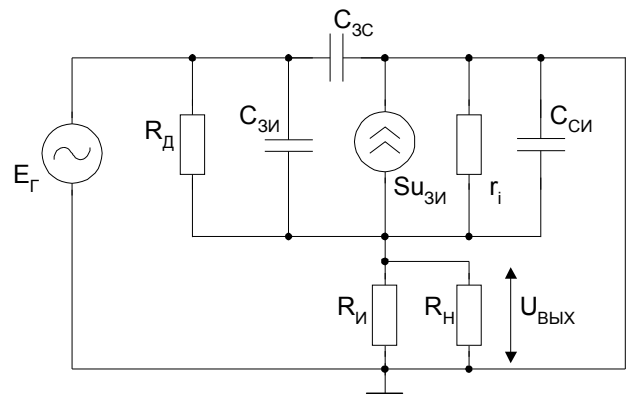


Рис. 21

Вопросы и задачи к разделу 4.2

4.13. Принцип работы усилительного каскада с общим истоком (ОИ) по переменному току. Назначение элементов в схеме. Схема замещения. Основные параметры (коэффициенты усиления по напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления).

4.14. Принцип работы усилительного каскада с общим стоком (ОС) по переменному току. Назначение элементов в схеме. Схема замещения. Основные параметры (коэффициенты усиления по напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления).

4.15. В усилительном каскаде с ОИ на ПТ (рис. 19) $R_3 = 560 \text{ кОм}$, $R_C = 3 \text{ кОм}$, $R_{И} = 1 \text{ кОм}$, $R_{Н} = 10 \text{ кОм}$, $S = 10 \text{ мА/В}$. Резистор $R_{И}$ не шунтирован конденсатором. Определить параметры по переменному току.

а) на ПТ с p-n переходом;

б) для МДП транзистора со встроенным каналом ($r_i = 0,5 \text{ МОм}$).

4.16. В задаче 4.15 определить K_U , если нагрузкой служит аналогичный каскад.

4.17. В задаче 4.15 $R_{И}$ отсутствует. Определить: 1) K_U ; 2) K_U при условии $R_{Н} \gg R_C$.

4.18. В схеме истокового повторителя на ПТ (рис. 20) с p-n переходом $R_3 = 2 \text{ МОм}$, $R_{И} = 2 \text{ кОм}$, $R_{Н} = 100 \text{ Ом}$, $S = 12 \text{ мА/В}$. Определить параметры по переменному току.

4.3. Специальные типы усилителей

Основные формулы

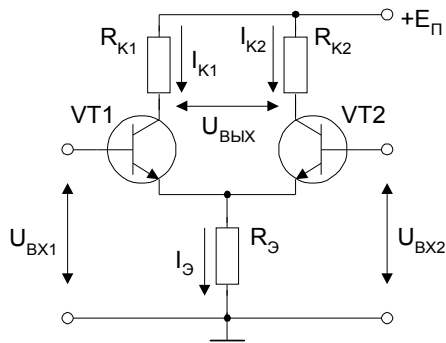


Рис. 22

Ток эмиттера:

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К1}} + I_{\text{К2}}.$$

Коэффициент усиления полезного сигнала:

$$K_{\text{д}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \beta \frac{2R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\text{Г}} + 2r_{\text{э}}}. \quad (3)$$

Входной ток (ток базы 1-го и 2-го транзисторов):

$$I_{\text{БХ}} = \frac{E_{\text{Г}}}{R_{\text{Г}} + 2(r_{\text{Б}} + (1 + \beta)r_{\text{Э}})}. \quad (4)$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала:

$$K_{\text{с}} = \frac{2\beta R_{\text{к}}}{R_{\text{Г}} + 2(r_{\text{Б}} + (1 + \beta)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}))}. \quad (5)$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{с}}}. \quad (6)$$

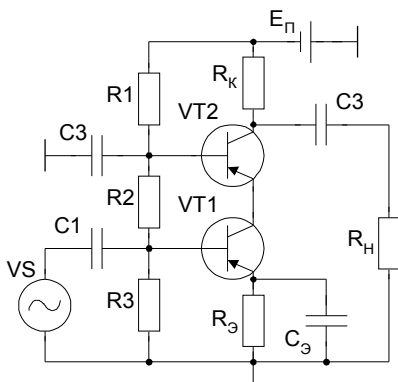


Рис. 23. Каскодный усилитель

$$K_u = \beta_1 \alpha_2 \frac{R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\text{Г}} + R_{\text{эх}}} \quad (7)$$

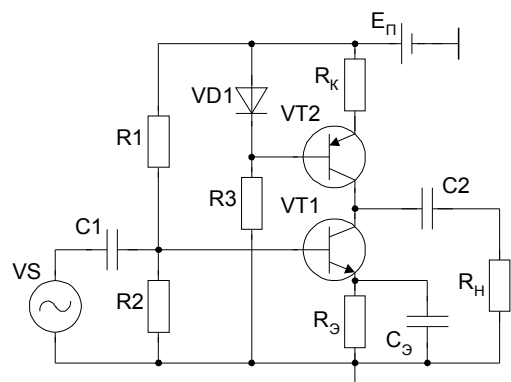


Рис. 24. Усилитель с динамической нагрузкой

$$K_u = \beta \frac{r_{\text{к2}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\text{Г}} + R_{\text{эх}}} \quad (8)$$

Двухтактный трансформаторный усилитель мощности (рис. 25):

$P_H = \eta_{mp2} P_{вых}$ - мощность,

рассеиваемая на нагрузке,

$\eta_{mp2} \approx 0,8 - 0,9$ -

КПД трансформатора;

$P_{вых} = \frac{U_{km} I_{km}}{2}$ - мощность сигнала

в коллекторной цепи транзистора;

$\eta = \eta_k \eta_{mp2}$ - КПД каскада;

$\eta_k = \frac{P_{вых}}{P_{ин}} = \frac{\pi U_{km}}{4 E_k}$ - КПД

в коллекторной цепи транзистора.

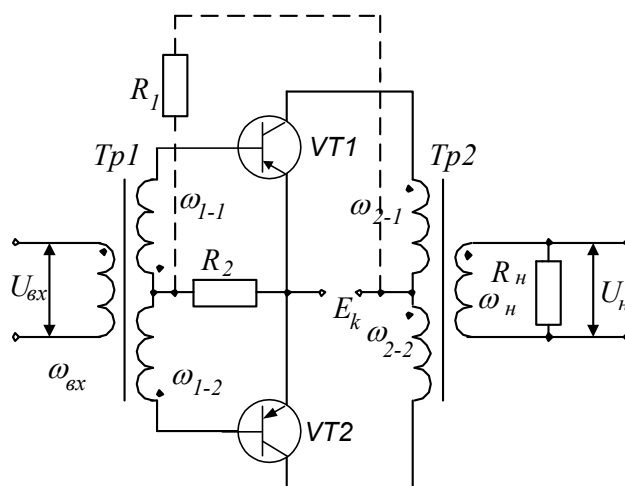


Рис. 25

Двухтактный бестрансформаторный усилитель мощности (рис. 26):

$P_H \approx E_k^2 / 8R_H$ - мощность,

рассеиваемая на нагрузке

$\eta = \frac{\pi U_{km}}{4 E_k}$ - КПД каскада.

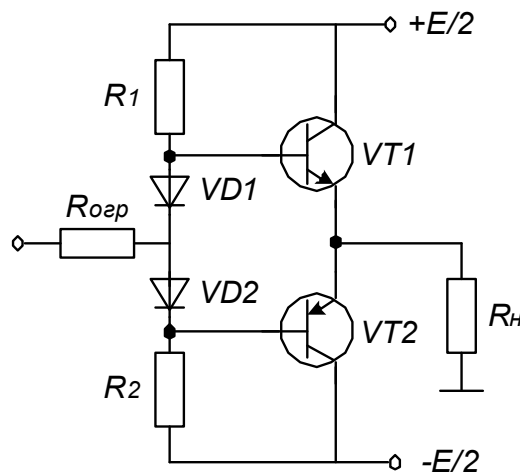


Рис. 26

Пример. В схеме дифференциального усилителя на двух идентичных n-p-n транзисторах $VT1$ и $VT2$ $R_{к2} = 3$ кОм ($R_{к1}$ отсутствует и коллектор $VT1$ подключен к E_k), $R_э = 5,1$ кОм (рис. 21), $\beta = 100$, $r_э = 100$ Ом, $R_Г$ и $r_Б \ll r_э(1 + \beta)$. При $U_{вх1} = 1$ В и $U_{вх2} = 1,1$ В определить $U_{вых}$ схемы, снимаемое с коллектора $VT2$.

Решение. В соответствии с принципом суперпозиции

$$U_{вых} = U_{вх1} K_1 + U_{вх2} K_2,$$

где $K_1 = U_{вых} / U_{вх1} \Big|_{U_{вх2} = 0}$; $K_2 = U_{вых} / U_{вх2} \Big|_{U_{вх1} = 0}$;

1) по отношению к $U_{\text{вх}1}$ транзистор $VT1$ включен по схеме с ОК, а транзистор $VT2$ включен по схеме с ОБ:

$$K_1 = K_{u_{ок}} \cdot K_{u_{об}}; K_{u_{ок}} = (1 + \beta)(R_3 \parallel r_3) / (r_б + (R_3 \parallel r_3)(1 + \beta)) \approx 1;$$

$$K_{u_{об}} = \alpha R_k / R_{\text{вх}} \approx \alpha R_k / r_3 = 3/0,1 = 30; K_1 = 1 \cdot 30;$$

2) по отношению к $U_{\text{вх}2}$ транзистор $VT2$ включен по схеме с ОЭ:

$$K_{u_{об}} = -R_k / r_3 = -30;$$

$$3) U_{\text{вых}} = 1 \cdot 30 + 1,1 \cdot (-30) = -3 \text{ В.}$$

Вопросы и задачи к разделу 4.3

4.19. Принцип работы усилителя с динамической нагрузкой. Назначение элементов в схеме. Коэффициент усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления.

4.20. Принцип работы усилителя с каскодным включением транзисторов. Назначение элементов в схеме. Коэффициент усиления по току, напряжению, мощности, входное и выходное сопротивления. Частотные свойства усилителя.

4.21. Принцип работы дифференциального каскада (классическая схема). Назначение элементов в схеме. Понятия дифференциального и синфазного входных сигналов. Коэффициенты передачи дифференциального и синфазного сигналов (полный коэффициент усиления, для одного плеча усилителя, с нагрузкой и при разомкнутой нагрузке). Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

4.22. Принцип работы дифференциального каскада со стабилизацией эмиттерного тока. Назначение элементов в схеме. Коэффициенты передачи дифференциального и синфазного сигналов. Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

4.23. Принцип работы дифференциального каскада на составных транзисторах. Назначение элементов в схеме. Коэффициенты передачи дифференциального и синфазного сигналов. Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

4.24. Принцип работы дифференциального каскада с токовым зеркалом в качестве активной нагрузки. Назначение элементов в схеме. Коэффициенты передачи дифференциального и синфазного сигналов. Коэффициент ослабления синфазного сигнала.

4.25. Принцип работы однотактных трансформаторных усилителей мощности (ОТУМ). Схема. Назначение элементов. Режим работы транзистора в ОТУМ. Выбор транзисторов. Параметры: выходная мощность, КПД усилителя; нелинейные и линейные искажения.

4.26. Принцип работы двухтактных трансформаторных усилителей мощности (ДТУМ). Схема. Назначение элементов. Режим работы транзистора в ДТУМ. Выбор транзисторов. Параметры: выходная мощность, КПД усилителя; нелинейные и линейные искажения.

4.27. Принцип работы двухтактных бестрансформаторных усилителей мощности (ДБУМ). Схема. Назначение элементов. Режим работы транзистора в ДБУМ. Выбор транзисторов. Параметры: выходная мощность, КПД усилителя; нелинейные и линейные искажения.

4.28. Определить коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОЭ и динамической нагрузкой (рис. 23), если оба транзистора идентичны и имеют параметры: $h_{11Э} = 1,5 \text{ кОм}$, $h_{12Э} = 8,8 \cdot 10^{-4}$, $h_{21Э} = 49$, $h_{22Э} = 40 \text{ мкСм}$, $R_{Г} = 50 \text{ Ом}$, $R_{Н} = 10 \text{ кОм}$, $R_1 = 20 \text{ кОм}$, $R_2 = 2 \text{ кОм}$, $R_3 = 470 \text{ Ом}$.

4.29. Для каскодного усилителя (рис. 22) определить коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления при условиях задачи 6.1 и $R_{К} = 2 \text{ кОм}$ и $R_3 = 2 \text{ кОм}$.

4.30. В схеме дифференциального усилителя на двух идентичных п-р-п транзисторах $VT1$ и $VT2$ $R_{К1} = R_{К2} = 3 \text{ кОм}$, $R_3 = 5,1 \text{ кОм}$ (рис. 21), $\beta = 100$, $r_3 = 100 \text{ Ом}$, $R_{Г}$ и $r_Б \ll r_3(1 + \beta)$. При $U_{ВХ1} = 1 \text{ В}$ и $U_{ВХ2} = 1,1 \text{ В}$ определить $U_{ВЫХ}$ (между коллекторами $VT1$ и $VT2$), синфазную ошибку, коэффициент передачи синфазной ошибки.

4.31. Решить задачу 6.3 при $R_{К1} = 3 \text{ кОм}$, $R_{К2} = 3,1 \text{ кОм}$.

4.32. В схеме дифференциального усилителя на двух идентичных п-р-п транзисторах $VT1$ и $VT2$, $R_{К1} = R_{К2} = 3 \text{ кОм}$ в цепь эмиттера установлен генератор стабильного тока с $R_{\text{вых ГСЧ}} = 300 \text{ кОм}$. Рассчитать коэффициент ослабления синфазных сигналов, если $r_3 = 50 \text{ Ом}$.

4.33. Решить задачу 6.3 при условии, что резисторы $R_{К}$ заменены схемой «токовое зеркало» с $R_{\text{вых ТЗ}} = 500 \text{ кОм}$, а нагрузка $R_{Н} = 10 \text{ кОм}$ подключена к коллектору только одного транзистора.

5. СХЕМЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Основные формулы

Инвертирующий усилитель:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_{\text{вх}}.$$

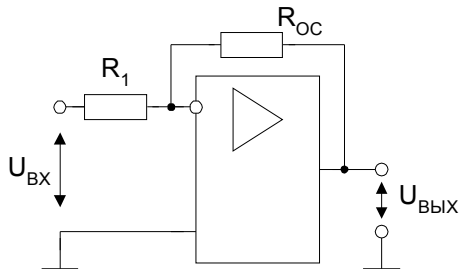


Рис. 27

Неинвертирующий усилитель:

$$U_{\text{вых}} = \left(1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}\right) U_{\text{вх}}.$$

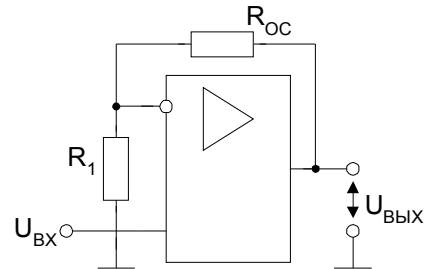


Рис. 28

Инвертирующий сумматор:

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{oc}} \left(\frac{U_{\text{вх1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх2}}}{R_2} + \dots + \frac{U_{\text{вхn}}}{R_n} \right).$$

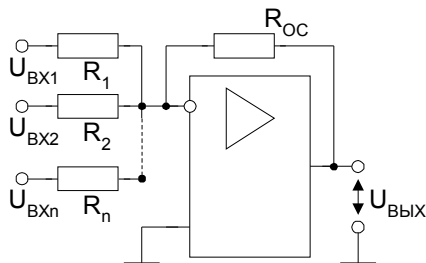


Рис. 29

Неинвертирующий сумматор:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{oc}} + R_1}{nR_1} (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}}).$$

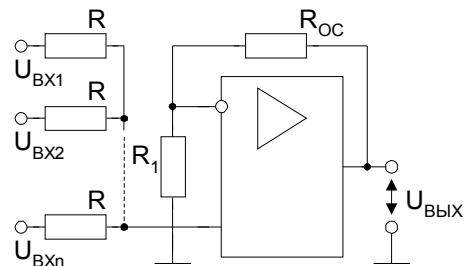


Рис. 30

Дифференциатор:

$$U_{\text{вых}} = -RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}.$$

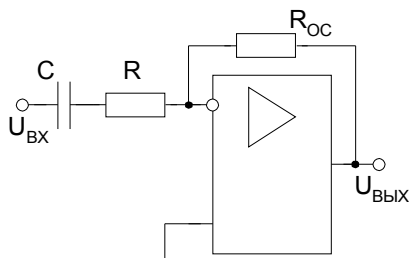


Рис. 34

Вычитающее устройство:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх2}} \frac{R_2 + R_1}{R_1} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_{\text{вх1}} \frac{R_2}{R_1}.$$

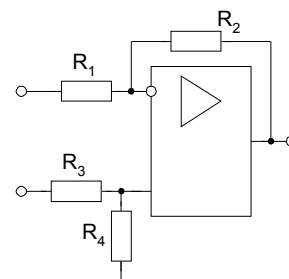


Рис. 35

Интегратор:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}} dt + U_{\text{вых}0}.$$

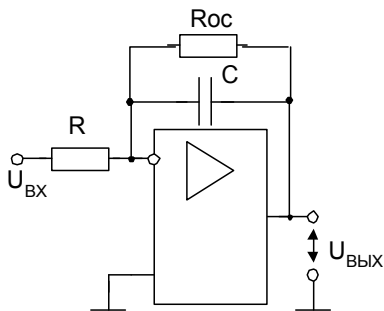


Рис. 36

Усилитель переменного напряжения:

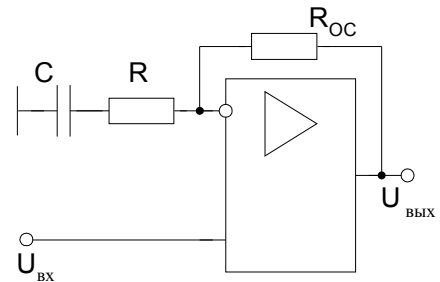


Рис. 37

Вопросы и задачи к разделу 5.1

5.1. Схема инвертирующего усилителя (на ОУ). Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление. АЧХ.

5.2. Схема неинвертирующего усилителя (на ОУ). Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление. АЧХ. Неинвертирующий повторитель.

5.3. Схема инвертирующего сумматора на ОУ. Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Зависимость выходного напряжения от входного. Инвертирующий повторитель.

5.4. Схема неинвертирующего сумматора на ОУ. Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Зависимость выходного напряжения от входного.

5.5. Схема вычитающего устройства на ОУ. Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Зависимость выходного напряжения от входного.

5.6. Схема инвертирующего интегратора на ОУ. Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Зависимость выходного напряжения от входного. Выбор постоянной интегрирования. Отличие реальной схемы от идеальной.

5.7. Схема инвертирующего дифференциатора на ОУ. Назначение элементов. Выбор параметров элементов в схеме. Зависимость выходного напряжения от входного. Отличие реальной схемы от идеальной.

5.8. Активные фильтры на ОУ. Передаточная функция фильтра нижних частот (ФНЧ) первого порядка. Пример схемы. Пояснить назначение элементов в

схеме, как параметры элементов схемы влияют на коэффициент передачи, частоту среза, крутизну среза АЧХ.

5.9. Активные фильтры на ОУ. Передаточная функция фильтра нижних частот (ФНЧ) второго порядка. Пример схемы. Пояснить назначение элементов в схеме, как параметры элементов схемы влияют на коэффициент передачи, частоту среза, крутизну среза АЧХ.

5.10. Активные фильтры на ОУ. Передаточная функция фильтра верхних частот (ФВЧ) первого порядка. Пример схемы. Пояснить назначение элементов в схеме, как параметры элементов схемы влияют на коэффициент передачи, частоту среза, крутизну среза АЧХ.

5.11. Активные фильтры на ОУ. Передаточная функция фильтра верхних частот (ФВЧ) второго порядка. Пример схемы. Пояснить назначение элементов в схеме, как параметры элементов схемы влияют на коэффициент передачи, частоту среза, крутизну среза АЧХ.

5.12. Активные фильтры на ОУ. Передаточная функция полосового фильтра первого порядка. Пример схемы. Пояснить назначение элементов в схеме, как параметры элементов схемы влияют на коэффициент передачи, частоту среза, крутизну среза АЧХ.

5.13. Пример схемы однопорогового компаратора. Передаточная характеристика. Пояснить принцип работы с помощью временных диаграмм.

5.14. Пример схемы двухпорогового компаратора. Передаточная характеристика. Пояснить принцип работы с помощью временных диаграмм.

5.15. Пример схемы гистерезисного компаратора. Передаточная характеристика. Пояснить принцип работы с помощью временных диаграмм.

5.16. В инвертирующем усилителе на ОУ $R_1 = 10$ кОм, $R_{OC} = 500$ кОм, $K_{U_{OY}} = 10000$, $R_{ВХОУ} = 1$ МОм; $R_{ВЫХОУ} = 50$ Ом, $R_H = 100$ кОм. Определить коэффициент усиления, $R_{ВХ}$ и $R_{ВЫХ}$ усилителя. Что нужно сделать, чтобы получить инвертирующий повторитель напряжения?

5.17. В неинвертирующем усилителе с параметрами задачи 8.1 определить коэффициент усиления, $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$ усилителя и глубину ООС. Что нужно сделать, чтобы получить повторитель напряжения?

5.18. В неинвертирующем сумматоре $U_{ВХ1} = 0,5$ В, $U_{ВХ2} = 1$ В, $R_1 = 100$ кОм, $R_{OC} = 100$ кОм, суммирующие резисторы $R = 20$ кОм. Определить значение $U_{ВЫХ}$ и тока в цепи обратной связи.

5.19. В схеме интегратора на ОУ $R = 2$ МОм, $C = 2,5$ нФ, максимальное выходное напряжение операционного усилителя $U_{вых max} = 3$ В. На вход интегратора поступает идеальный положительный прямоугольный импульс длительностью 5 мс и амплитудой 3 В. Нарисовать выходной импульс. Как

изменится форма выходного импульса: а) при уменьшении R в два раза; б) при увеличении C в два раза? Составить таблицы выходных напряжений при $t = 1; 2; 3; 4; 5$ мс.

5.20. В схеме усилителя переменного напряжения на ОУ (рис. 39) $R_1 = 16$ кОм, $C = 1$ мкФ, $R_{OC} = 1,6$ МОм, $K_{U_{OY}} = 50000$, $R_{ВЫХОУ} = 75$ Ом, $R_{ВХОУ} = 1$ МОм. Определить коэффициент усиления, $R_{ВХ}$ и $R_{ВЫХ}$ усилителя на частоте 20 Гц и 5 кГц.

5.21. Разработать схему усилителя, реализующую на выходе выражение вида: а) $U_{ВЫХ} = 10U_{ВХ1} + 6U_{ВХ2} + 0,5U_{ВХ3}$; б) $U_{ВЫХ} = 16U_{ВХ1} + U_{ВХ2} - 4U_{ВХ3} - 2U_{ВХ4}$.

5.22. Рассчитать активный фильтр НЧ по схеме на рис. 36 со следующими параметрами: полоса пропускания $0 \dots 20$ Гц; $K_U = 100$.

5.23. Рассчитать активный фильтр ВЧ (рис. 34) с $K_U = 50$, $f_{cp} = 500$ Гц, $\tau_{OY} = 15,9 \cdot 10^{-3}$ с.

5.24. Интегратор будет использоваться в качестве фильтра низких частот, у которого $f_1 = 3$ кГц и $K = 20$. Определить R , R_{oc} и C .

5.25. В дифференциаторе $R_{oc} = 0,1$ МОм, $C = 0,1$ мкФ. На вход подается синусоидальное напряжение амплитудой 3 В и частотой 60 Гц, т.е. $U = 3 \cdot \sin(2\pi 60t)$. Каковы величина и форма выходного напряжения?

5.26. В дифференциаторе $R_{oc} = 10$ кОм, $C = 0,1$ мкФ. Каким будет выходной сигнал, если на вход дифференциатора подается:

а) треугольная волна (рис. 40) с параметрами $t_1 = 5 \cdot 10^{-4}$, $t_2 = 1 \cdot 10^{-3}$;

б) прямоугольная волна с амплитудой 5 В и частотой следования 5 кГц (рис. 41), причем время нарастания и спада импульсов равны 1 мкс.

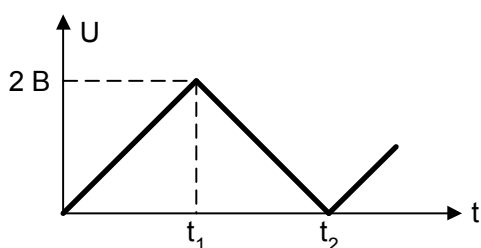


Рис. 38

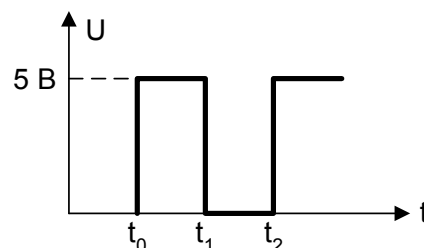


Рис. 39

5.29. Для экспоненциального усилителя (рис. 38) найти выходное напряжение при условии $I_{o0} = 1$ мкА, $R = 20$ кОм, $U_{ex} = 0,16$ В.

5.30. Определить параметры интегратора с тремя входами, построенного на базе инвертирующего усилителя, при следующих условиях: $U_{ex1} = 0,2$ В; $U_{ex2} = -0,3$ В; $U_{ex3} = 0,05$ В; $U_{вых max} = 5$ В; $t_u = 100$ мс.

5.31. На входе дифференциатора с тремя входами, построенного на базе инвертирующего усилителя, действуют напряжения: $U_{ex1} = 0,002 \sin \omega t$,

$U_{ex2} = 3 \text{ В}$, $U_{ex3} = 0,01 \text{ В}$. Определить значение выходного напряжения при условии: $C_1 = C_2 = C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_{oc} = 68 \text{ кОм}$, $\omega = 10\pi$.

5.32. На вход неинвертирующего интегратора подается прямоугольный импульс длительностью 5 мс, амплитудой 1 В. Сопротивления в цепи обратной связи R_{oc} и R_1 равны. Сопротивление на входе интегратора $R = 20 \text{ кОм}$. Емкость $C = 0,1 \text{ мкФ}$. Чему равно выходное напряжение через 5 мс? Через сколько времени прекратится процесс интегрирования?

6.1. ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ

Основные формулы

В ключе на биполярном транзисторе (рис. 40):

- в режиме отсечки:
запирающее напряжение

$$U_{ex\text{ зап}} = U_{БЭ} + I_{КО} R_B;$$

выходное сопротивление

$$R_{вых\text{ отс}} \approx r_{T\text{ отс}} \parallel R_k,$$

где $r_{T\text{ отс}} = |U_{КЭ}| / I_{КО}$ - сопротивление транзистора по постоянному току;

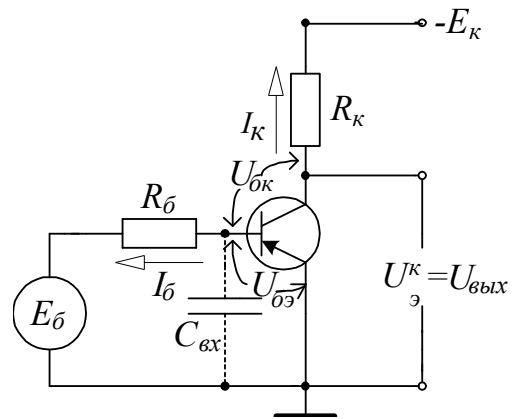


Рис. 40

- в режиме насыщения: $I_{КН} \approx (E_K - U_{КЭН}) / R_K$; $I_{БН} \approx I_{КН} / \beta$;

выходное сопротивление $R_{вых\text{ нас}} \approx r_{T\text{ нас}} \parallel R_k$,

где $r_{T\text{ нас}} = U_{КЭН} / I_{КН}$ - сопротивление транзистора постоянному току.

Динамические параметры:

- длительность фронта нарастания импульса

$$t_{зф} = \tau_{ex} \ln \frac{E_б^+ + |E_б^-|}{|E_б^-| - |U^*|}, \quad (9)$$

где U^* - напряжение отпирания,

$E_б^+$, $E_б^-$ - значения управляющего напряжения;

$\tau_{ex} = (R_{Г} + R_б)C_{ex}$, $C_{ex} = C_э + C_к$;

- длительность фронта нарастания импульса:

$$t_{\Phi} = \tau_A \cdot \ln \frac{I_{\bar{\sigma}}^+}{I_{\bar{\sigma}}^+ - I_{\bar{\sigma}H}}, \quad (10)$$

где $\tau_A = \tau_{\beta} + (\beta + 1)C_{KB}R_K$, $\tau_{\beta} = 1/2\pi f_{\beta}$,

$I_{\bar{\sigma}}^+$ соответствует воздействию $E_{\bar{\sigma}}^+$;

- время рассасывания:

$$t_p = \tau_H \cdot \ln \frac{I_{\bar{\sigma}}^+ + |I_{\bar{\sigma}}^-|}{I_{\bar{\sigma}H} + |I_{\bar{\sigma}}^-|}, \quad (11)$$

где постоянная времени накопления $\tau_H < \tau_A$;

- длительность среза импульса:

$$t_{\Phi}^- = \tau_A \cdot \ln \frac{I_{\bar{\sigma}H} + |I_{\bar{\sigma}}^-|}{|I_{\bar{\sigma}}^-|}. \quad (12)$$

Пример. Транзисторный ключ на *n-p-n* транзисторе имеет параметры: $R_K = 5,1$ кОм; $R_{\bar{\sigma}} = 10$ кОм; $E_K = 20$ В; $\beta = 50$; $I_{K0} = 10$ мкА. Определить $U_{\text{ВЫХ}}$ при $E_{\bar{\sigma}} = 0$ В и при $E_{\bar{\sigma}} = 1$ В.

Решение: а) при разомкнутом ключе (r_k пренебрегаем) $E_{\bar{\sigma}} = 0$ В;

$$I_k = I_{k0}^* = I_{k0}(1 + \beta) = 10 \cdot 10^{-6}(1 + 50) = 0,51 \text{ мА};$$

$$U_{\text{вых}} = E_k - I_{k0}^* = 20 - 0,51 \cdot 5,1 = 17,4 \text{ В}.$$

б) при разомкнутом ключе $E_{\bar{\sigma}} = 1$ В;

$$I_{\bar{\sigma}} \approx E_{\bar{\sigma}} / R_{\bar{\sigma}} = 1/10 \cdot 10^3 = 0,1 \text{ мА (при условии } U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}} = 0);$$

если предположить, что транзистор работает в активном режиме, то

$$I_k = \beta I_{\bar{\sigma}} + I_{k0}(1 + \beta) = 50 \cdot 10^{-4} + 10 \cdot 10^{-6}(1 + 50) = 5,51 \text{ мА};$$

$$U_{\text{вых}} = E_k - I_k = 20 - 5,51 \cdot 5,1 = -8,1 \text{ В}.$$

Такое значение нереально, следовательно, транзистор находится в насыщении, т.е. $U_{\text{вых}} \approx 0$.

Задачи к разделу 6.1

6.1. Схема транзисторного ключа на биполярном транзисторе. Режимы работы ТК (режим отсечки, насыщения и активный режимы).

6.2. Переходные процессы в транзисторном ключе на биполярном транзисторе. Привести временные диаграммы работы транзисторного ключа. Как

определить по временным диаграммам время задержки фронта, время нарастания фронта, время спада фронта, время рассасывания носителей заряда.

6.3. Переходные процессы в транзисторном ключе на биполярном транзисторе. Статические и динамические параметры в транзисторном ключе.

6.4. Методы повышения быстродействия транзисторных ключей на БТ.

6.5. Переходные процессы в транзисторном ключе на полевом транзисторе. Привести временные диаграммы работы транзисторного ключа. Как определить по временным диаграммам время нарастания фронта, время спада фронта.

6.6. Переходные процессы в транзисторном ключе на полевом транзисторе. Статические и динамические параметры в транзисторном ключе.

6.7. Транзисторный ключ на $n-p-n$ транзисторе имеет параметры: $R_K = 5,1$ кОм, $R_B = 10$ кОм, $E_K = 20$ В, $\beta = 10$, $I_{KO} = 10$ мкА. Определить, при каком минимальном значении E_B транзистор войдет в режим насыщения.

6.8. В транзисторном ключе по схеме с ОЭ на $p-n-p$ транзисторе определить в режиме отсечки выходное сопротивление транзистора и ключа $r_{T\text{отс}}$ и $r_{\text{вых отс}}$. Исходные данные: $E_K = 10$ В; $I_{KBO} = 125$ мкА; $R_B = 2$ кОм; $R_K = 4$ кОм; $h_{21Э} = 30$; $U_{KЭ\text{нас}} = 100$ мВ.

6.9. Для задачи 9.3 определить в режиме насыщения I_{KH} , I_{BH} , выходные сопротивления транзистора $r_{T\text{нас}}$ и ключа $r_{\text{вых нас}}$.

6.10. При условиях задачи 9.3 определить параметры импульса на выходе ключа: $\tau_{\text{вх}}$ и задержку фронта $\tau_{\text{зф}}$, если $C_{Э} = 5$ пФ; $C_K = 10$ пФ; $E_{\delta}^+ = 0$ В; $E_{\delta}^- = -3$ В; $f_{\text{ГРОЭ}} = 10$ МГц; $I_{\delta}^+ = 1$ мА; $I_{\delta}^- = -1$ мА; напряжение отпирания $U_{\text{отп}} = -0,6$ В.

6.11. При условиях задач 9.3 и 9.5 определить параметры импульса на выходе ключа: а) постоянную времени в активном режиме τ_A и фронт t_{ϕ}^+ ; б) время рассасывания заряда t_p и срез t_{ϕ}^- . Время накопления заряда принять $\tau_H = \tau_A/2$.

6.12. Транзисторный ключ на $p-n-p$ транзисторе имеет параметры: $R_K = 1$ кОм; $R_B = 1$ кОм; $E_K = 20$ В; $\beta = 50$; $I_{KO} = 10$ мкА. Определить $U_{\text{вых}}$ при $E_B = -1$ В и при $E_B = +1$ В.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Домрачев, Е.И. Одиночные усилительные каскады / Е.И. Домрачев, Е.В. Медведева. - ВятГУ, ФПМТ, каф. РЭС. - Киров, 2001г.- 54с.
2. Домрачев, Е.И. Аналоговые электронные устройства: учеб. пос. Ч. 2 / Е.И. Домрачев, Е.В. Медведева. - ВятГУ, ФПМТ, каф. РЭС. - Киров, 2002.– 48 с.
3. Алексеев, А.Г. Усилительные устройства: сборник задач и упражнений. Учеб. пос. для вузов. / под ред. Г.В. Войшвилло. - М.: Радио и связь, 1986. -160с.
4. Расчет электронных схем. Учеб. пособие для вузов/ Г.И. Изьюрова, Г.В. Королев, А.А.Терехов и др.- М. : Высш. школа, 1989.
5. Кубицкий, А.А. Задачи и упражнения по электронным усилителям. - Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1986.
6. Бобров, И. И. Расчет дискретных и микроэлектронных усилителей: Учеб. пособие / И. И. Бобров, Пермск. гос. техн. ун-т. - Пермь, 1998. - 169с.
7. Джонс, М. Х. Электроника-практический курс / Пер. с англ. Е. В. Воронова, А. Л. Ларина. - М.: Постмаркет, 1999. - 528с.
8. Головатенко-Абрамова, М. П. Задачи по электронике / Головатенко-Абрамова, М.П. Лapidес А. М. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 108с.
9. Быстров, Ю.А. Электронные цепи и устройства / Ю.А. Быстров, И.Г. Мироненко, Г.С. Хижа. М.: Высш. шк. 1999. – 512 с.
10. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: учеб. / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. - 2-е изд. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 320 с.
11. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учеб. для студ. вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. Г. Глудкин, А. И. Гуров; Под ред. О. П. Глудкина. - М.: Горячая Линия-Телеком, 2000. – 768 с.
12. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. пособ. для вузов. / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2004, 2005 – 622 с.
13. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства: учеб. - СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.
14. Хоровиц, Пауль. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл,. - 6-е изд., перераб. - М.: Мир, 2001, 2003. – 704 с.
15. Кучумов, А. И. Электроника и схемотехника: учеб. пособие. - 2-е изд. , перераб. И доп. - М.: "Гелиос АРВ", 2004. – 336 с.
16. Игумнов, Д.В. Полупроводниковые усилительные устройства / Д.В. Игумнов, Г.П. Костюнина. – М.: Радио и связь, 1997. –268 с.
17. Усилительные устройства: Уч. для вузов / Под ред. О.В. Головина. М.: Радио и связь, 1993.

18. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 (1980) - 488с.
19. Ибрагим, К.Ф. Основы электронной техники: элементы, схемы, системы/ Пер. с англ. – М. : Мир, 1997.-400 с.
20. Калякин, А.И. Электроника: Основы аналоговой схемотехники: Учеб. пособие для вузов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1996. – 177 с.
21. Ленк, Дж. Д. Справочник по расчету электронных схем. - Вища шк.: Киевский ун-т, 1983. – 240 с.
22. Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие. /Ю.И. Волощенко и др./ Под.ред. Г.Д. Петрухина. - МАИ, 1993. – 416 с.
23. Скаржепа, В.А., Луценко А.Н. Электроника и микросхемотехника. / В.А. Скаржепа, А.Н. Луценко - Киев.: Вища шк., 1989. - 430 с.
24. Достал, И. Операционные усилители. - М.: Мир, 1982.
25. Фолкенберри, Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС / Пер. с англ. - М.: Мир, 1985.
26. Хьюлсман Л.П. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер.с англ. / Л.П. Хьюлсман, Ф.Е. Аллен - М.: Радио и связь, 1984 – 384с.
27. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам / Д. Джонсон, Д. Джонсон, Г. Мур; пер. с англ. М. Н. Микшиса; под ред. И. Н. Теплюка. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 128с.
28. Алексенко, А. Г. Основы микросхемотехники. - 3-е изд. - М.: Лаборатория Базовых Знаний: ФИЗМАТЛИТ: ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002. – 448 с.
29. Разевиг, В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-CAP 7. - М.: Горячая линия-Телеком, 2003. - 368с.