

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Методические указания

к выполнению контрольной работы
по дисциплине «Электронные приборы»
для студентов специальности
1 – 53 01 02 «Автоматизированные системы
обработки информации»
заочной формы обучения

УДК 621.382(075.8)

В методических указаниях к выполнению контрольной работы по дисциплине «Электронные приборы» разобраны задачи расчёта усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах, различных схем на операционных усилителях, ключевых схем, мультивибраторов и синтеза комбинационных схем. Также включены программа дисциплины «Электронные приборы», список рекомендуемой литературы, и вопросы к зачёту.

Методические указания предназначены для студентов специальности 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации» заочной формы обучения

Составители: Клопоцкий А.А., старший преподаватель,
Смаль А.С., старший преподаватель.

Введение

Методические указания написаны в соответствии с учебной программой «Электронные приборы» для специальностей 1-40 02 01 «Вычислительные машины системы и сети», 1-40 03 01 «Искусственный интеллект», 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации».

Цель преподавания дисциплины

Целью изучения учебной дисциплины «Электронные приборы» является формирование базовых знаний физических основ, принципа действия и характеристик полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, оптоэлектронных приборов, сверхвысокочастотных и квантовых приборов; подготовка к решению задач, связанных с рациональным выбором электронных приборов, их режимов работы и схем включения в различных устройствах.

Задачи изучения дисциплины

- приобретение знаний принципа действия, характеристик, параметров полупроводниковых, оптоэлектронных, сверхвысокочастотных и квантовых приборов, интегральных микросхем;
- приобретение знаний типовых схемотехнических решений аналоговых, импульсных и цифровых устройств различного функционального назначения;
- приобретение навыков решения ряда практических задач, связанных с расчетом основных характеристик и параметров электронных приборов и устройств на их основе.

В результате изучения учебной дисциплины «Электронные приборы» студент должен

знать:

- принцип действия, устройство, параметры, характеристики, режимы работы и модели электронных приборов;
- типовые схемы включения электронных приборов;
- современное состояние и перспективы развития электронных приборов и радиоэлектронных устройств на их основе;

уметь:

- осуществлять рациональный выбор соответствующих электронных приборов и их режимов при разработке радиоэлектронных устройств;
- выполнять расчет типовых радиоэлектронных устройств;
- экспериментально определять основные характеристики и параметры электронных приборов и устройств на их основе;

владеть:

- навыками моделирования и экспериментального исследования электронных приборов и устройств на их основе;
- навыками работы с технической литературой, справочниками, стандартами, технической документацией по электронным приборам.

Перечень дисциплин, знание которых необходимо для изучения курса

Учебный материал дисциплины базируется на знаниях студента, полученных от изучения дисциплин: «Высшая математика», «Физика», «Теория электрических цепей».

Общие требования к выполнению и оформлению контрольной работы

- Задания для контрольной работы выдаются преподавателем до начала лабораторно-экзаменационной сессии в общем виде без конкретных числовых значений.
- Контрольная работа выполняется во время лабораторно-экзаменационной сессии на практических занятиях, на которых и выдаются необходимые для расчётов значения соответствующих величин.

Целью контрольной работы является проверка усвоения студентами материала по программе дисциплины «Электронные приборы». Поэтому перед выполнением контрольной работы следует изучить соответствующие разделы курса по рекомендуемой литературе и подготовиться к ней до начала лабораторно-экзаменационной сессии:

- на обложке тетради (в клетку, 12 листов) указать наименование вуза, факультета, группы, дисциплины, свою фамилию и инициалы;
- в начале каждой задачи привести условие, исходные данные своего варианта задания и соответствующие принципиальные схемы, выполненные в соответствии с требованиями ЕСКД с помощью чертёжных инструментов;
- для каждой схемы пояснить назначение всех входящих в неё элементов;
- следует привести необходимые для решения задачи характеристики и параметры транзисторов и микросхем с указанием использованных справочников;
- привести необходимые расчётные формулы с пояснениями, оставив место для численных расчётов.

Задания к контрольной работе

Каждое задание по основным разделам курса состоит из нескольких задач. Варианты заданий и количество предлагаемых к решению в контрольной работе задач из этих заданий определяются преподавателем.

Задание 1. Расчёт усилительных каскадов (УК) на транзисторах

- а) привести схему усилительного каскада соответствующего заданному варианту;
- б) рассчитать напряжение питания $U_{п}$ усилительного каскада, задать рабочую точку и отметить её на вольт-амперных характеристиках транзистора;
- в) провести расчёт заданного УК по постоянному току, т.е. рассчитать значения сопротивлений резисторов, обеспечивающих выбранный рабочий режим транзистора;
- г) рассчитать значения ёмкостей конденсаторов используемых в УК;
- д) привести малосигнальную эквивалентную схему заданного усилительного каскада и рассчитать его параметры по переменному току:
 - входное и выходное сопротивления,
 - коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности,
 - коэффициент полезного действия (к.п.д.).

Задание 2. Расчёт схем на операционных усилителях (ОУ)

- а) привести схему заданного усилителя;
- б) рассчитать значения сопротивлений резисторов, обеспечивающих заданные коэффициенты усиления K_U и входные сопротивления $R_{вх}$, считая ОУ идеальным;
- в) рассчитать отклонения (в %) полученных значений величин от заданных при учёте параметров реальных операционных усилителей.

Задание 3. Расчёт транзисторного ключа.

Для заданного коэффициент насыщения $q_{нас.}$:

- а) привести схему транзисторного ключа;
- б) рассчитать значения сопротивлений резисторов;
- в) рассчитать времена включения и выключения ключа и его максимальную рабочую частоту;
- г) рассчитать среднюю потребляемую мощность ключа.

Принять максимальный ток коллектора $I_{К\max} = 0,5I_{К\max\text{ доп}}$, напряжение питания $U_{п} = 5\text{ В}$, сопротивление нагрузки гораздо больше выходного сопротивления ключа.

Замечание: значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов должны соответствовать стандартному ряду номинальных значений E24 (см. Приложение 4).

Методические указания к выполнению контрольной работы

Задание 1. Расчёт усилительных каскадов на транзисторах

Электронным усилителем называют устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию выходного сигнала, который по форме аналогичен входному сигналу, но превосходит его по мощности. Этот процесс преобразования осуществляется при помощи управляемых нелинейных элементов. В настоящее время в каскадах электронных усилителей различного назначения в качестве управляемого элемента широко используются биполярные и полевые транзисторы, поэтому электронные усилители с такими элементами называют транзисторными.

Исходными данными для расчёта могут являться различные параметры, например, выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$, сопротивление нагрузки R_H , максимальное напряжение на нагрузке U_{Hm} , максимальный ток в нагрузке I_{Hm} . Зная какую-либо пару заданных параметров, при необходимости можно найти остальные из следующих соотношений:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{Hm} I_{Hm}}{2} = \frac{U_{Hm}^2}{2R_H} = \frac{I_{Hm}^2 R_H}{2};$$
$$I_{Hm} = \frac{U_{Hm}}{R_H}.$$
(1.1)

Для нормальной работы любого усилительного каскада необходимо установить определённые токи и напряжения во входной и выходной цепях транзистора при отсутствии входного сигнала. Такой режим называют *режимом покоя*.

Точка, координаты которой на вольт-амперных характеристиках транзистора определяют напряжения и токи в его электродах, называется *рабочей*. При отсутствии входного сигнала эта точка называется *исходной рабочей точкой* (И.Р.Т.). Исходная рабочая точка определяет режим работы транзистора по постоянному току. Напряжения и токи, а также внешние по отношению к усилительному прибору электрические цепи, обеспечивающие заданное положение исходной рабочей точки, называются соответственно *напряжениями покоя*, *токами покоя* и *цепями смещения*.

Расчёт по постоянному току УК на биполярных транзисторах

На рис. 1.1 – 1.6 представлены усилительные каскады (УК) на биполярных транзисторах (БТ) с различными способами включения транзистора: рис. 1.1 – 1.4 – с общим эмиттером (ОЭ), рис. 1.5 – с общей базой (ОБ), рис. 1.6 – с общим коллектором (ОК).

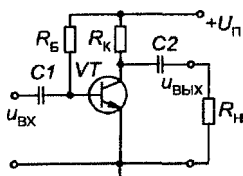


Рисунок 1.1 – Схема УК с ОЭ с фиксированным током базы

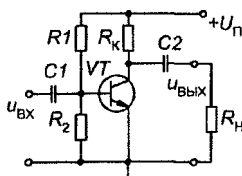


Рисунок 1.2 – Схема УК с ОЭ с фиксированным напряжением база-эмиттер

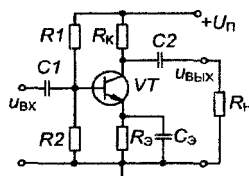


Рисунок 1.3 – Схема УК с ОЭ с эмиттерной стабилизацией

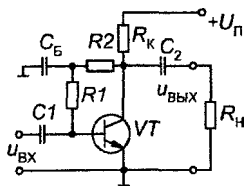


Рисунок 1.4 – Схема УК с ОЭ с коллекторной стабилизацией

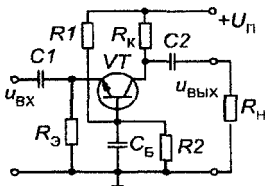


Рисунок 1.5 – Схема УК с ОБ

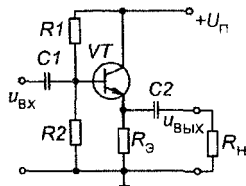


Рисунок 1.6 – Схема УК с ОК

В этих каскадах транзистор VT совместно с резистором R_K (или R_3 в схеме на рис.1.6) образуют управляемый делитель напряжения. С помощью остальных резисторов реализуют цепи, обеспечивающие начальный режим работы транзистора. Разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$ служат для предотвращения попадания постоянного тока по цепи от источника питания в цепь источника сигнала и в нагрузку.

В усилительных каскадах на биполярных транзисторах сопротивление резистора R_K (или R_3 для схемы с ОК (рис. 1.6)) выбирают таким, чтобы максимальный ток коллектора не превышал допустимого значения для используемого транзистора.

Для обеспечения малых нелинейных искажений выходного сигнала в схемах усилительных каскадов с ОЭ и ОБ (рисунки 1.1 – 1.5) следует принимать

$$R_K = (0,3 \dots 0,6) R_H; \quad (1.2)$$

для схемы с ОК (рис. 1.6) $R_3 = (0,5 \dots 0,8) R_H. \quad (1.3)$

Так как по переменному току резистор R_K (резистор R_3 для схемы с ОК (рис. 1.6)) и нагрузка R_H оказываются включёнными параллельно, то

$$I_{K m} = \frac{U_{H m}}{R_K \parallel R_H} \text{ (или } I_{3 m} = \frac{U_{H m}}{R_3 \parallel R_H} \text{ для схемы (рис. 1.6))}, \quad (1.4)$$

где « \parallel » обозначает параллельное соединение резисторов, т.е.

$$R_K \parallel R_H = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}, \text{ или } R_3 \parallel R_H = \frac{R_3 \cdot R_H}{R_3 + R_H}.$$

Поскольку $I_B \ll I_K$, то для схемы с ОК (рис.1.6) можно считать $I_K = I_C - I_B \approx I_C$.

После определения максимального амплитудного значения тока коллектора задают:

– ток коллектора покоя $I_{K0} = (1,2 \dots 1,4) I_{K m}; \quad (1.5)$

– напряжение коллектор-эмиттер покоя $U_{KЭ0} = (1,2 \dots 1,5) U_{H m} + U_{KЭ \min}; \quad (1.6)$

– напряжение источника питания $U_{П} \geq U_{KЭ0} + I_{K0} R_K$ (или R_3 (рис.1.6)). (1.7)

Здесь $U_{KЭ \min}$ – напряжение, соответствующее работе транзистора в режиме насыщения, для маломощных транзисторов $U_{KЭ \min} = (0,5 \dots 1,0) В$ или $(1 \dots 2) В$ для мощных.

В схемах УК с ОЭ с эмиттерной стабилизацией (рис. 1.3) и с ОБ (рис. 1.5) из-за дополнительного падения напряжения на резисторе R_3 значение напряжения питания принимают на $(5 \dots 15)\%$ выше, чем в других схемах.

При задании напряжения питания следует округлять полученное значение до большего целого значения.

Задавшись напряжением питания, уточняют напряжение покоя (рис.1.1., 1.2, 1.4, 1.6)

$$U_{KЭ0} = U_{П} - I_{K0} R_K > U_{Hm} \text{ (или } R_{Э} \text{ вместо } R_K \text{ (рис.1.6));} \quad (1.8)$$

а для схем на рис. 1.3, 1.5 используют формулу

$$U_{KЭ0} = U_{П} - I_{K0} (R_K + R_{Э}) > U_{Hm} + U_{KЭ \min}, \quad (1.9)$$

где принимают

$$R_{Э} = (0,05 \dots 0,1) R_K \quad (1.10)$$

Далее на семействе выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора отмечают исходную рабочую точку (И.Р.Т.) с координатами $(U_{KЭ0}; I_{K0})$ и находят ток базы покоя I_{B0} (рис. 1.7, б). Если И.Р.Т. не попадает ни на одну из показанных на графике выходных характеристик, применяют метод интерполяции, используя две ближайшие к И.Р.Т. характеристики. На входной ВАХ отмечают И.Р.Т. в соответствии с найденным значением I_{B0} и определяют напряжение база-эмиттер покоя $U_{БЭ0}$ (рис. 1.7, а). Затем определяют максимальный ток коллектора $I_{K \max}$, для этого на выходных ВАХ по двум точкам $(U_{П}; 0)$ и $(U_{KЭ0}; I_{K0})$ строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.7, б).

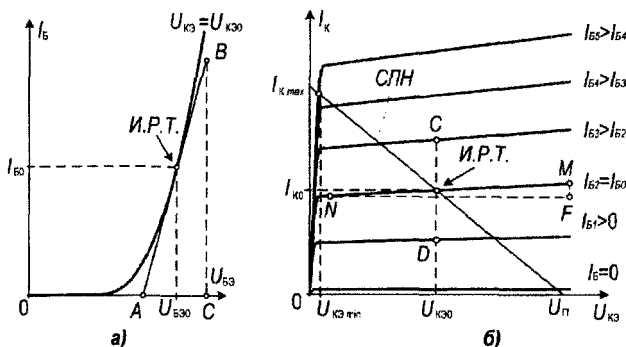


Рисунок 1.7 – Входные (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики транзистора

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий

$$U_{KЭ \max \text{ доп.}} > U_{П}; \quad I_{K \max \text{ доп.}} > I_{K \max}; \quad P_{K \max \text{ доп.}} > I_{K0} U_{KЭ0}. \quad (1.11)$$

Если условия (1.11) не выполняются, то следует либо увеличить сопротивление резистора R_K (или $R_{Э}$ в схеме (рис.1.6)), либо уменьшить напряжение питания, напряжение покоя между коллектором и эмиттером транзистора.

Требуемые значения токов покоя I_{K0} , I_{B0} и напряжений $U_{KЭ0}$, $U_{БЭ0}$ обеспечивают с помощью источника питания и резисторов цепей смещения. На практике получили распространение два способа обеспечения заданного положения рабочей точки биполярного транзистора по постоянному току независимо от схемы включения транзистора

по переменному току: схема с фиксированным током базы (рис.1.1, 1.4) и схема с фиксированным потенциалом базы (рис.1.2, 1.3, 1.5, 1.6).

В схеме на рис. 1.1 режим по постоянному току задаётся с помощью резисторов R_B , R_K и источника питания U_{Π} . Смещение эмиттерного перехода осуществляется за счёт протекания тока базы I_{B0} от источника питания U_{Π} через резистор R_B , значение сопротивления которого рассчитывают по формуле

$$R_B = \frac{U_{\Pi} - U_{E30}}{I_{B0}}. \quad (1.12)$$

В схеме на рис. 1.2 режим покоя обеспечивается фиксированием напряжения U_{E30} между базой и эмиттером транзистора с помощью источника питания и делителя напряжения на резисторах R_1 , R_2 . Значения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 определяют по формулам:

$$R_1 = \frac{U_{\Pi} - U_{E30}}{I_{\Delta} + I_{B0}}; \quad R_2 = \frac{U_{E30}}{I_{\Delta}}, \quad (1.13)$$

где I_{Δ} – ток делителя, который протекает через резистор R_2 , обычно принимают

$$I_{\Delta} = (1 \dots 3) I_{B0}. \quad (1.14)$$

Недостатками схем (рис.1.1 и 1.2) является сильная зависимость положения исходной рабочей точки от различных дестабилизирующих факторов (например, изменения температуры, напряжения питания и т.п.), поэтому на практике для стабилизации положения И.Р.Т. часто используют отрицательную обратную связь (ООС).

В схеме с ОЭ с эмиттерной стабилизацией (рис. 1.3) обеспечивают последовательную ООС по току путём включения резистора R_3 между эмиттером транзистора VT и общим проводом. В схеме с коллекторной стабилизацией (рис. 1.4) осуществляют параллельную ООС по напряжению, подключая последовательно соединённые резисторы R_1 , R_2 к коллектору транзистора VT . Для устранения ООС по переменному току резистор R_3 шунтируют конденсатором C_3 , а резисторы R_1 , R_2 – конденсатором C_B .

В схеме с эмиттерной стабилизацией (рис. 1.3) значения сопротивлений резисторов рассчитывают по формулам:

$$R_3 = (0,05 \dots 0,1) R_K \text{ (см. (1.10));} \quad (1.15)$$

$$R_1 = \frac{U_{\Pi} - U_E}{I_{\Delta} + I_{B0}}; \quad R_2 = \frac{U_E}{I_{\Delta}}, \quad (1.16)$$

где потенциал базы

$$U_E = U_{E30} + (I_{K0} + I_{B0}) R_3; \quad (1.17)$$

I_{Δ} – ток делителя, который выбирается из условия обеспечения необходимой стабильности режима работы. Обычно принимают

$$I_{\Delta} = (2 \dots 10) I_{B0}. \quad (1.18)$$

Желательно также, чтобы ток делителя не превышал 10...15% тока коллектора, т.е.

$$I_{\Delta} \leq (0,1 \dots 0,15) I_{K0}. \quad (1.19)$$

В схеме с коллекторной стабилизацией (рис.1.4) значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 рассчитывают по формулам:

$$R_1 + R_2 = (U_{K30} - U_{E30}) / I_{B0}; \quad R_2 = (0,9 \dots 1,5) R_1. \quad (1.20)$$

В схеме с ОБ (рис. 1.5) по постоянному току реализована последовательная ООС по току (эмиттерная стабилизация), поэтому значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 , R_3 рассчитывают по формулам (1.15)–(1.19).

В схеме с ОК (рис. 1.6) по постоянному току также реализована последовательная ООС по току, поэтому для расчёта значений сопротивлений резисторов R_1 , R_2 используют формулы (1.16) – (1.19).

Замечание: для транзисторов $p-n-p$ -типа полярности напряжений и направления протекания токов меняются на противоположные. В расчётные формулы значения соответствующих величин должны подставляться без учёта их знаков.

Расчёт параметров УК на БТ по переменному току

На рис. 1.8 приведены малосигнальные схемы замещения усилительных каскадов с различными включениями биполярных транзисторов для переменного сигнала.

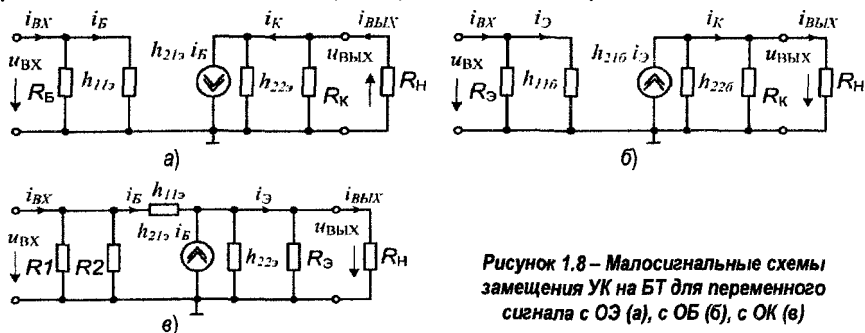


Рисунок 1.8 – Малосигнальные схемы замещения УК на БТ для переменного сигнала с ОЭ (а), с ОБ (б), с ОК (в)

Представленная на рис. 1.8, а малосигнальная схема является обобщённой схемой замещения по переменному сигналу схем УК с ОЭ, показанных на рис. 1.1 – 1.4. При рассмотрении же конкретного каскада необходимо учесть, что в схемах на рис. 1.2–1.3 рабочая точка задаётся с помощью делителя напряжения $R_1 - R_2$, и по переменному сигналу эти резисторы оказываются включёнными параллельно, поэтому в малосигнальных схемах каскадов с ОЭ (рис. 1.2–1.3) резистор R_B следует заменять на параллельно соединённые резисторы R_1 , R_2 (так, как показано на рис. 1.8, в).

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.21)$$

В схеме на рис. 1.4 используется коллекторная стабилизация положения рабочей точки с помощью резисторов R_1 , R_2 . Поскольку конденсатор C_B на рабочей частоте шунтирует эти резисторы, устраняя ООС по переменному току, то в малосигнальной схеме данного каскада резистор R_B следует заменить резистором R_1 :

$$R_B = R_1, \quad (1.22)$$

а резистор R_C – на параллельно соединённые резисторы R_K и R_2 :

$$R_C = R_K \parallel R_2 = \frac{R_K \cdot R_2}{R_K + R_2}. \quad (1.23)$$

Для схемы с ОЭ в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис. 1.8, а):
входное сопротивление

$$R_{BX} = R_B \parallel h_{11э}; \quad (1.24)$$

выходное сопротивление

$$R_{BЫX} = R_K \parallel \left(1/h_{22э}\right) = \frac{R_K}{1 + R_K h_{22э}}; \quad (1.25)$$

коэффициент усиления по напряжению

$$|K_U| = \frac{h_{21э}}{h_{11э}} \frac{R_K}{1 + R_K h_{22э} + (R_K/R_H)}. \quad (1.26)$$

При расчёте параметров какой-либо из схем усилительных каскадов с общим эмиттером, показанных на рис. 1.2 – 1.4, необходимо принимать во внимание соответствующие замечания (1.21) – (1.23).

Для схемы с ОБ в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис. 1.8, б):
входное сопротивление

$$R_{BX} = R_э \parallel h_{11б}; \quad (1.27)$$

выходное сопротивление

$$R_{BЫX} = R_K \parallel \left(1/h_{22б}\right) = \frac{R_K}{1 + R_K h_{22б}}; \quad (1.28)$$

коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{h_{21б}}{h_{11б}} \frac{R_K}{1 + R_K h_{22б} + \frac{R_K}{R_H}}. \quad (1.29)$$

Для схемы с ОК в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис. 1.8, в):
входное сопротивление

$$R_{BX} = R1 \parallel R2 \parallel \left(h_{11э} + (1 + h_{21э})R_{экв.}\right); \quad (1.30)$$

выходное сопротивление

$$R_{BЫX} = R_э \parallel \left(\frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}}\right) \parallel \left(\frac{1}{h_{22э}}\right); \quad (1.31)$$

коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = (1 + h_{21э}) \frac{R_{экв.}}{h_{11э} + (1 + h_{21э})R_{экв.}}, \quad (1.32)$$

где $R_{экв.} = R_э \parallel R_H \parallel \left(1/h_{22э}\right)$.

Для всех схем усилительных каскадов:

коэффициент усиления по току

$$K_I = K_U \frac{R_{BX}}{R_H}. \quad (1.33)$$

коэффициент усиления по мощности

$$K_P = K_U K_I. \quad (1.34)$$

к.п.д. $\eta = \frac{P_H}{P_n} = \frac{U_{Hm}^2 / (2R_H)}{U_n (I_{K0} + I_{E0} + I_D)}$ (для схем на рис. 1.1 и 1.4 $I_D = 0$). (1.35)

Здесь h_{11} – дифференциальное входное сопротивление, h_{21} – коэффициент прямой передачи по току, h_{22} – дифференциальная выходная проводимость транзистора.

Дифференциальные h -параметры для различных схем включения обозначаются соответствующими буквами: «б» – для схемы с ОБ, «э» – с ОЭ, «к» – с ОК. Значения h -параметров приводятся в справочниках (см., например, Приложение 1 или [9, 10]), либо приближённо определяются графоаналитическим методом по статическим вольт-амперным характеристикам транзисторов. Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.

Рассмотрим определение h -параметров для транзистора, включённого по схеме с ОЭ, с помощью представленных на рис. 1.7 соответствующих входных (а) и выходных (б) вольт-амперных характеристик.

Для определения параметров $h_{22э}$ и $h_{21э}$ используют семейство выходных ВАХ (рис. 1.7, б). Через рабочую точку (И.Р.Т) проводят касательную MN (на рис. 1.7, б она совпадает с прямолинейным участком ВАХ, соответствующей входному току $I_{Б0} = I_{Б2}$), строят треугольник FMN и находят

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{MF}{FN} = \frac{I_{КМ} - I_{КФ}}{U_{КЭФ} - U_{КЭН}}. \quad (1.36)$$

Чтобы найти коэффициент передачи тока $h_{21э}$, используют значения токов коллектора в точках C , D и соответствующих значений токов базы $I_{Б3}$, $I_{Б1}$:

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{I_{КC} - I_{КD}}{I_{Б3} - I_{Б1}}. \quad (1.37)$$

Для определения параметра $h_{11э}$ через рабочую точку (И.Р.Т.) проводят касательную AB к входной вольт-амперной характеристике (рис. 1.7, а). После этого строят треугольник ABC и находят

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{CA}{BC} = \frac{U_{БЭC} - U_{БЭA}}{I_{Б3} - I_{БC}}. \quad (1.38)$$

Если известны h -параметры транзистора при включении его по схеме с общим эмиттером ($h_{11э}$, $h_{21э}$, $h_{22э}$), то можно найти h -параметры транзистора при включении его по схеме с общей базой по следующим приближённым формулам:

$$h_{11б} \approx \frac{h_{11э}}{1 + h_{21э}}; \quad h_{21б} \approx \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}}; \quad h_{22б} \approx \frac{h_{22э}}{1 + h_{21э}}. \quad (1.39)$$

Расчёт по постоянному току УК на полевых транзисторах

На рис. 1.9, 1.10 представлены УК на полевых транзисторах (ПТ): рис. 1.9, а – с общим истоком (ОИ) на ПТ с управляющим $p-n$ -переходом (ПТУП), рис. 1.9, б – с ОИ на ПТ с изолированным затвором (ПТИЗ), рис. 1.10 – с общим стоком (ОС).

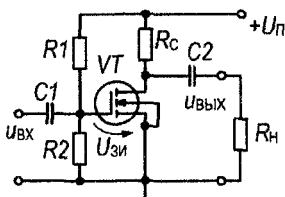
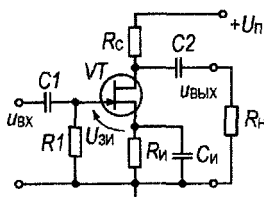


Рисунок 1.9 – Схемы УК с ОИ на ПТУП – а; на ПТИЗ – б

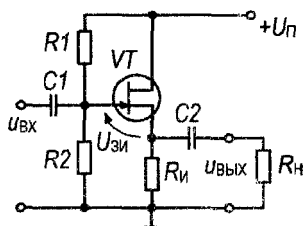


Рисунок 1.10 – Схема УК с ОС

В этих каскадах транзистор VT совместно с резистором R_C (или R_I в схеме с общим стоком рис.1.10) образуют управляемый делитель напряжения. С помощью осталь-

ных резисторов реализуют цепи, обеспечивающие начальный режим работы транзистора. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 служат соответственно для предотвращения проникновения постоянной составляющей сигнала на затвор транзистора и на выход усилительного каскада.

Для схемы УК с общим истоком на полевом транзисторе с управляющим переходом (рис. 1.9, а) сопротивление резистора R_C выбирают таким, чтобы максимальный ток стока не превышал начальный ток $I_{C \text{ нач.}}$, а для схемы на полевом транзисторе с изолированным затвором ((рис. 1.9, б)) – максимально допустимого значения тока стока $I_{C \text{ max доп.}}$ для данного транзистора. Такое же требование должно выполняться и для УК на ПТ с общим стоком (рис. 1.10), но по отношению к сопротивлению резистора R_H .

В целях получения максимального усиления по напряжению в схемах усилительных каскадов с общим истоком (рис. 1.9) следует принимать

$$R_C = (0,3 \dots 0,6) R_H; \quad (1.40)$$

для схемы с ОС (рис. 1.10) $R_H = (0,5 \dots 0,8) R_H. \quad (1.41)$

Так как по переменному току резистор R_C (резистор R_H для схемы с ОС (рис. 1.10)) и нагрузка R_H оказываются включёнными параллельно, то

$$I_{Cm} = \frac{U_{Hm}}{R_C \parallel R_H} \text{ (или } I_{Cm} = \frac{U_{Hm}}{R_H \parallel R_H} \text{ для схемы на рис. 1.10),} \quad (1.42)$$

где « \parallel » обозначает параллельное соединение резисторов, т.е.

$$R_C \parallel R_H = \frac{R_C R_H}{R_C + R_H} \text{ или } R_H \parallel R_H = \frac{R_H R_H}{R_H + R_H}.$$

После определения максимального амплитудного значения тока стока задают:

– ток стока покоя $I_{C0} = (1,2 \dots 1,8) I_{Cm}; \quad (1.43)$

– напряжение сток–исток покоя $U_{Cи0} = (1,2 \dots 1,5) U_{Hm} + U_{Cи \text{ min}}, \quad (1.44)$

где $U_{Cи \text{ min}}$ равно напряжению отсечки $|U_{Cз \text{ i об.}}|$ полевого транзистора с управляющим переходом (с $p-n$ -затвором) (рис. 1.9, а) или пороговому напряжению $U_{зи \text{ пор}}$ полевого транзистора с изолированным затвором и индуцированным каналом (рис. 1.9, б).

Напряжение источника питания для схемы УК с ОИ на ПТУП (рис. 1.9, а):

$$U_{п} \geq U_{Cи0} + I_{C0} R_C + |U_{зи0}|, \quad (1.45)$$

где $U_{зи0} = U_{зи \text{ отс.}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{C0}}{I_{C \text{ нач.}}}} \right), \quad (1.46)$

а для схем усилительных каскадов на ПТИЗ (а также на ПТУП в схеме с ОС (рис. 1.10))

$$U_{п} \geq U_{Cи0} + I_{C0} R_C \text{ (или } R_H \text{ вместо } R_C \text{ для УК с ОС).} \quad (1.47)$$

При задании напряжения питания следует округлять полученное значение до большего целого значения.

После задания напряжения питания, уточняют напряжение сток-исток покоя для схемы УК с ОИ на ПТУП

$$U_{СИ0} = U_{П} - I_{C0} R_C - |U_{ЗИ0}| > U_{Нм} + U_{СИ\min}, \quad (1.48)$$

для схем УК на ПТИЗ (а также на ПТУП в схеме с ОС)

$$U_{СИ0} = U_{П} - I_{C0} R_C > U_{Нм} + U_{СИ\min} \text{ (или } R_{И} \text{ вместо } R_C \text{ для УК с ОС)}. \quad (1.49)$$

Далее на семействе выходных вольт-амперных характеристиках (ВАХ) транзистора отмечают исходную рабочую точку (И.Р.Т.) с координатами $(U_{СИ0}; I_{C0})$ и находят напряжение затвор-исток покоя $U_{ЗИ0}$ (рис. 1.11). Если И.Р.Т. не попадает ни на одну из показанных на графике выходных характеристик, применяют метод интерполяции, используя две ближайшие к И.Р.Т. характеристики. Затем определяют максимальный ток стока $I_{C\max}$, для этого на выходных ВАХ по двум точкам $(U_{П}; 0)$ и $(U_{СИ0}; I_{СК0})$ строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.11).

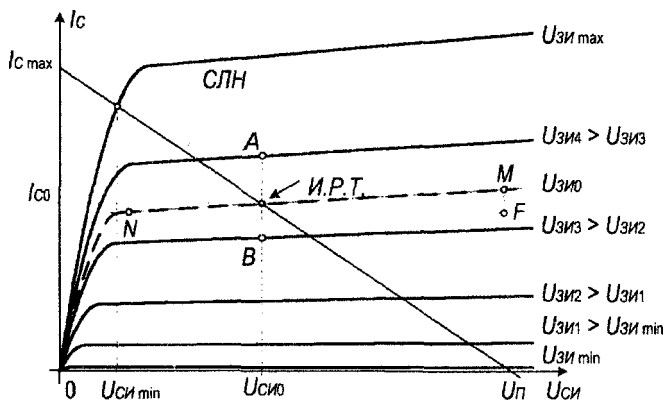


Рисунок 1.11 – Выходные вольт-амперные характеристики полевого транзистора

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий

$$U_{СИ\max\text{ доп}} > U_{П}; \quad I_{C\max\text{ доп}} > I_{C\max}; \quad P_{C\max\text{ доп}} > I_{C0} U_{СИ0}. \quad (1.50)$$

Если условия (1.50) не выполняются, то следует либо увеличить сопротивление резистора R_C (или $R_{И}$ для схемы УК с ОС), либо уменьшить напряжение питания, напряжение покоя между стоком и истоком транзистора.

Требуемые значения тока стока покоя I_{C0} и напряжений $U_{СИ0}$, $U_{ЗИ0}$ обеспечивают с помощью источника питания и резисторов цепей смещения. При этом необходимо помнить, что для управления током стока в УК на ПТУП с каналом n -типа необходимо задавать напряжение затвор-исток $|U_{ЗИ0}| < |U_{ЗИ\text{отс}}|$, в УК на ПТИЗ с индуцированным каналом n -типа $U_{ЗИ0} > U_{ЗИ\text{пор}}$, а в УК на ПТИЗ с встроенным каналом n -типа $U_{ЗИ0}$

может быть либо > 0 , либо < 0 , либо равняться нулю. В последнем случае схема УК может иметь вид, представленный на рис. 1.9, а или б, причём, если $U_{зи0} = 0$, то резистор R_H в цепи истока может отсутствовать.

В схеме на рис. 1.9, а режим по постоянному току задаётся с помощью резисторов R_1 , R_H и источника питания U_H . В этой схеме, называемой схемой с автоматическим смещением, за счёт протекания через резистор R_E тока стока автоматически создаётся обратное смещение $p - n$ -перехода ПТ:

$$U_{зи0} = U_3 - U_H = U_3 - I_{C0}R_H, \quad (1.51)$$

где $U_H = I_{C0}R_H$ – потенциал истока; U_3 – потенциал затвора. Так как резистор R_1 обеспечивает связь затвора с общим проводом, то при бесконечно малом входном токе I_3 можно считать $U_3 \approx 0$. Поэтому

$$U_{зи0} \approx -I_{C0}R_H. \quad (1.52)$$

Помимо функции автоматического смещения потенциала истока резистор R_H выполняет также функцию термостабилизации режима работы усилителя по постоянному току (аналогично схеме с эмиттерной стабилизацией на БТ). Для исключения влияния отрицательной обратной связи по переменному сигналу резистор R_H шунтируют конденсатором C_H , в диапазоне рабочих частот сопротивление которого $X_{C_H} \ll R_H$.

Таким образом, из выражения (1.52) следует, что

$$R_H = \frac{|U_{зи0}|}{I_{C0}}. \quad (1.53)$$

Сопротивление резистора R_1 принимают $R_1 = (10 \dots 100) \text{ кОм}$. (1.54)

В схеме на рис. 1.9, б режим по постоянному току задаётся с помощью резисторов R_1 , R_2 и источника питания U_H . Эта схема аналогична схеме УК на БТ с фиксированным потенциалом базы (рис. 1.2). Напряжение между затвором и истоком

$$U_{зи0} = U_3 - U_H = U_3 > U_{зи \text{ пор}} \quad (1.55)$$

равно потенциалу затвора U_3 (потенциал истока равен нулю), который определяется по формуле

$$U_3 = U_H \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.56)$$

Задавая значением $R_1 \parallel R_2 = (0,1 \dots 10) \text{ кОм}$, (1.57)

из выражений (1.55) – (1.57) находим

$$R_1 = \frac{U_H}{U_{зи0}} \times (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (1.58)$$

$$R_2 = \frac{U_{зи0}}{U_H - U_{зи0}} R_1. \quad (1.59)$$

В схеме с общим стоком (рис. 1.10) напряжение между затвором и истоком

$$U_{зи0} = U_3 - U_H = U_3 - I_{C0}R_H. \quad (1.60)$$

Потенциал затвора определяется выражением (1.56). При расчёте сопротивлений делителя напряжения $R1 - R2$ в зависимости от применяемого транзистора следует руководствоваться соотношением (1.54) или (1.57). Тогда для УК на ПТУП

$$R1 = \frac{U_{п}}{I_{c0}R_{и} - |U_{зи0}|} \times (10 \dots 100) \text{ кОм}; \quad (1.61)$$

$$R2 = \frac{U_3}{U_{п} - U_3} R1, \text{ где } U_3 = I_{c0}R_{и} - |U_{зи0}|; \quad (1.62)$$

для УК на ПТИЗ

$$R1 = \frac{U_{п}}{I_{c0}R_{и} + U_{зи0}} \times (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (1.63)$$

$$R2 = \frac{U_3}{U_{п} - U_3} R1, \text{ где } U_3 = I_{c0}R_{и} + U_{зи0}. \quad (1.64)$$

Замечание: для полевых транзисторов с проводящим каналом p -типа полярности напряжений и направления протекания токов меняются на противоположные. В расчётные формулы значения соответствующих величин подставляются без учёта их знаков.

Расчёт параметров УК на ПТ по переменному току

На рис. 1.12 приведены малосигнальные схемы замещения усилительных каскадов с различными включениями полевых транзисторов для переменного сигнала на средней частоте.

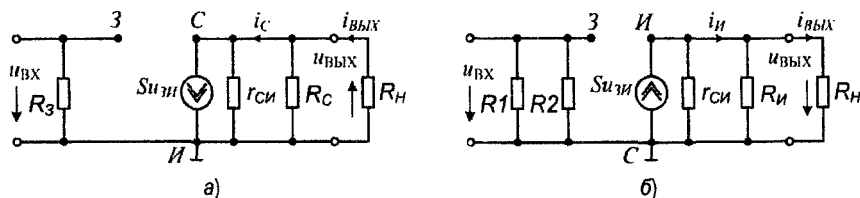


Рисунок 1.12 – Малосигнальные схемы замещения УК на ПТ для переменного сигнала с ОИ (а), с ОС (б)

На рис. 1.12, а представлена обобщённая малосигнальная схема замещения по переменному сигналу схем УК с ОИ, показанных на рис. 1.9. Для схемы на ПТУП (рис. 1.9, а) резистор R_3 следует заменить резистором $R1$, а в схеме на ПТИЗ (рис. 1.9, б) резистор R_3 следует заменить параллельно соединёнными резисторами $R1, R2$ (как показано на рис. 1.12, б). Соответственно для схем с ПТУП и ПТИЗ

$$R_3 = R1; \quad (1.65)$$

$$R_3 = R1 \parallel R2 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (1.66)$$

Для схемы с ОИ в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис.1.12, а) и выражениями (1.65), (1.66):

входное сопротивление $R_{вх} = R_3;$ (1.67)

выходное сопротивление $R_{вых} = R_C \parallel r_{сн};$ (1.68)

коэффициент усиления по напряжению $K_U = S(R_C \parallel r_{сн} \parallel R_H).$ (1.69)

Для схемы с ОС в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис.1.12, б):

входное сопротивление $R_{вх} = R1 \parallel R2;$ (1.70)

выходное сопротивление $R_{вых} = R_H \parallel \left(\frac{1}{S} \right) = \frac{R_H}{1 + SR_H};$ (1.71)

коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{S(R_H \parallel r_{сн} \parallel R_H)}{1 + S(R_H \parallel r_{сн} \parallel R_H)}.$ (1.72)

Для всех схем усилительных каскадов:

коэффициент усиления по току $K_I = K_U \frac{R_{вх}}{R_H}.$ (1.73)

коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U K_I.$ (1.74)

к.п.д. $\eta = \frac{P_H}{P_P} = \frac{U_{Hm}^2}{U_H I_{C0}}.$ (1.75)

Здесь S – крутизна полевого транзистора, $r_{сн}$ – дифференциальное сопротивление проводящего канала. Значения крутизны S и сопротивления $r_{сн}$ приводятся в справочниках (см., например, Приложение 2 или [9, 10]) либо приближённо определяются графоаналитическим методом по статическим вольт-амперным характеристикам транзисторов. Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.

Рассмотрим определение дифференциальных параметров полевого транзистора с помощью семейства выходных вольт-амперных характеристик (рис. 1.11).

Для определения сопротивления $r_{сн}$ через рабочую точку (И.Р.Т.) проводят касательную MN (на рис. 1.11 она совпадает с прямолинейным участком ВАХ, соответствующей напряжению покоя $U_{ш0}$), строят треугольник FNM и находят

$$r_{сн} = \frac{\Delta U_{сн}}{\Delta I_C} = \frac{FN}{MF} = \frac{U_{снF} - U_{снн}}{I_{C_M} - I_{C_n}}. \quad (1.76)$$

Чтобы найти крутизну S используют значения токов стока в точках A , B и соответствующих значений напряжений затвор – исток $U_{шA}$ и $U_{шB}$:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ш}} = \frac{I_{C_A} - I_{C_B}}{U_{шA} - U_{шB}}. \quad (1.77)$$

Расчёт ёмкостей конденсаторов

Так как разделительные конденсаторы C_1 и C_2 не должны существенно ослаблять переменную составляющую (полезный сигнал), значения их ёмкостей для всех типов усилительных каскадов:

$$C_1 = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{н.гр.} R_{вх}}; \quad (1.78)$$
$$C_2 = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{н.гр.} (R_{вых} + R_H)},$$

где $f_{н.гр.}$ – нижняя граничная частота усиливаемого сигнала.

Ёмкостные сопротивления шунтирующих конденсаторов $C_э$, C_B , C_H на низшей частоте $f_{н.гр.}$ усиливаемого сигнала должны быть на порядок меньше сопротивлений резисторов, которые они шунтируют, поэтому для схемы УК с ОЭ с эмиттерной стабилизацией (рис. 1.3)

$$C_э = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{н.гр.} R_э}; \quad (1.79)$$

для схем УК с ОЭ с коллекторной стабилизацией (рис. 1.4) и с ОБ (рис. 1.5)

$$C_B = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{н.гр.} (R_1 || R_2)}; \quad (1.80)$$

для схемы УК на ПТУП с общим истоком (рис. 1.9, а)

$$C_H = \frac{10 \dots 50}{2\pi f_{н.гр.} R_H}. \quad (1.81)$$

Задание 2. Расчёт схем на операционных усилителях

Операционный усилитель (ОУ) – многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

Операционные усилители имеют один выход и два входа: *инвертирующий* (обозначается кружочком «о») и *неинвертирующий*. При подаче сигнала на инвертирующий вход выходной сигнал будет сдвинут по фазе на 180° относительно входного (полярность выходного сигнала противоположна входному) – это так называемое инвертирующее включение ОУ. При неинвертирующем включении ОУ сигнал подаётся на неинвертирующий вход, выходной сигнал совпадает по фазе с входным сигналом.

ОУ выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники, на основе которого можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители (рис.2.1, 2.2), сумматоры (рис.2.3, 2.4), активные фильтры, интеграторы, дифференциаторы, генераторы и др.

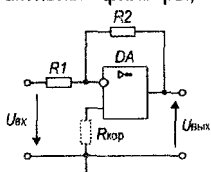


Рисунок 2.1 – Инвертирующий усилитель на ОУ

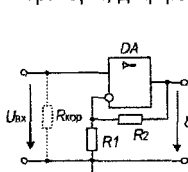


Рисунок 2.2 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

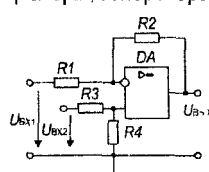


Рисунок 2.3 – Дифференциальный усилитель

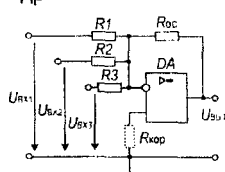


Рисунок 2.4 – Инвертирующий сумматор

На практике при выборе ОУ и расчёте построенных на их основе схем руководствуются основными параметрами, которые приводятся в справочниках (см. Приложение 3):

– коэффициент усиления по напряжению $K_{U,0}$ характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно $10^3 \dots 10^6$);

– входное сопротивление $R_{вх \Omega}$ – сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают дифференциальное входное сопротивление $R_{вх \text{ диф}}$, т.е. сопротивление между двумя входными выводами, и синфазное входное сопротивление $R_{вх \text{ синф}}$,

т.е. сопротивление между объединёнными входными выводами и общим проводом. Обычно в справочниках приводится значение только дифференциального входного сопротивления, которое в $10 \dots 100$ раз меньше синфазного и составляет $(10^4 \dots 10^{10}) \text{ Ом}$;

– выходное сопротивление $R_{вых \Omega}$ – внутреннее сопротивление ОУ, рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС (порядка 100 Ом);

– входное напряжение смещения $U_{см}$ характеризует разбаланс и несимметрию входного дифференциального каскада ОУ и численно равно постоянному напряжению, которое необходимо приложить к входу ОУ, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю (как правило, $(0,1 \dots 10) \text{ мВ}$);

– входной ток $I_{вх \text{ ср}}$ (средний входной ток смещения) – ток на входах ОУ, необходимый для работы входного каскада (менее 10 мкА);

– разность входных токов $\Delta I_{\text{вх}}$ (ток сдвига) – разность входных токов смещения, которая появляется вследствие неодинаковых коэффициентов передачи тока $h_{21Э}$ транзисторов входного каскада ОУ (менее 1 мкА);

– коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{ос.сф}}$ характеризует способность ослаблять синфазные (приложенные к двум входам одновременно) сигналы (обычно составляет (50...120) дБ).

– предельная частота F_{max} (или частота единичного усиления F_1) – частота, на которой модуль коэффициента усиления равен 1 (обычно $(10^5...10^7)$ Гц);

– максимальная скорость нарастания выходного напряжения $V_{U_{\text{вых.}}} = \Delta U_{\text{вых.}} / \Delta t$, для большинства ОУ $\sim (0,1...10)$ В/мкс.

При расчёте схем на операционных усилителях возникает дополнительная погрешность, связанная с выбором значений сопротивлений и ёмкостей из стандартного ряда номинальных значений (в данной работе используется ряд Е24). Поэтому после выбора номиналов резисторов и ёмкостей необходимо оценить относительную погрешность расчёта, которая не должна превышать 5%:

$$\delta_A = \left| 1 - \frac{A_{\text{получ.}}}{A_{\text{задан.}}} \right| 100\% , \quad (2.1)$$

где $A_{\text{задан.}}$, $A_{\text{получ.}}$ – соответственно заданное по условию и полученное в результате расчётов значение определяемой величины (коэффициента усиления, сопротивления, выходного напряжения и т.п.).

Инвертирующий усилитель

Схема инвертирующего усилителя на ОУ приведена на рис. 2.1. Входной сигнал подаётся на инвертирующий вход, а неинвертирующий вход соединён с общим проводом.

Коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя, если считать операционный усилитель идеальным, рассчитывается по формуле

$$K_{U_{\text{инв.}}} = - \frac{R2}{R1} , \quad (2.2)$$

а входное сопротивление $R_{\text{вх.инв.}} = R1$. (2.3)

При использовании реального операционного усилителя необходимо учитывать, что коэффициент усиления самого ОУ и его входное сопротивление являются конечными величинами. С учётом этого выражения (2.2) и (2.3) принимают соответственно вид

$$K_{U_{\text{инв.}}} = - \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)} , \quad (2.4)$$

$$R_{\text{вх.инв.}} = R1 + \frac{R_{\text{вх0}} R2}{R_{\text{вх0}} (1 + K_{U0}) + R2} . \quad (2.5)$$

Отличие от нуля входных токов и напряжения смещения в реальном ОУ приводит к появлению напряжения ошибки $U_{\text{вых.ош}}$ на выходе усилителя. Для уменьшения выходно-

го напряжения ошибки, обусловленного входными токами ОУ, между неинвертирующим входом и общим проводом включают резистор $R_{\text{кор}}$ с сопротивлением

$$R_{\text{кор}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (2.6)$$

Тогда напряжение ошибки будет определяться выражением

$$U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх}} R2. \quad (2.7)$$

Неинвертирующий усилитель

Схема неинвертирующего усилителя на ОУ приведена на рис. 2.2. Здесь входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах R_1 и R_2 , подаётся напряжение отрицательной обратной связи. Коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя с идеальным ОУ

$$K_{U_{\text{ненив.}}} = 1 + \frac{R2}{R1}, \quad (2.8)$$

а входное сопротивление стремится к бесконечности. Если необходимо обеспечить конечное входное сопротивление, то параллельно входу включают резистор $R_{\text{кор}}$, тогда

$$R_{\text{вх.ненив.}} = R_{\text{кор}}, \quad (2.9)$$

при этом сопротивление резистора $R_{\text{кор}}$ определяется соотношением (2.6). С учётом этого выражение (2.8) можно преобразовать к виду

$$K_{U_{\text{ненив.}}} = \frac{R1 + R2}{R1} \cdot \frac{R2}{R2} = \frac{R1 + R2}{R1 \cdot R2} \cdot R2 = \frac{R2}{R1 \parallel R2}, \text{ или } K_{U_{\text{ненив.}}} = \frac{R2}{R_{\text{кор}}}. \quad (2.10)$$

С учётом неидеальности ОУ выражения (2.8) и (2.9) принимают вид

$$K_{U_{\text{ненив.}}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}, \quad (2.11)$$

$$R_{\text{вх.ненив.}} = \frac{R_{\text{кор}} \cdot R_{\text{вх}0}}{R_{\text{кор}} \cdot \frac{K_{U_{\text{ненив.}}}}{K_{U0}} + R_{\text{вх}0}}. \quad (2.12)$$

Напряжение ошибки в неинвертирующем усилителе больше за счёт синфазной составляющей $U_{\text{вых.ош.}}^{\text{ненив.}} = U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}} + \frac{U_{\text{вых.}}}{K_{\text{ос.сф}}}$, где $U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}}$ определяется по (2.7), поэтому

$$U_{\text{вых.ош.}}^{\text{ненив.}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх}} R2 + \frac{U_{\text{вых.}}}{K_{\text{ос.сф}}}, \quad (2.13)$$

Дифференциальный усилитель (вычитатель)

Схема дифференциального усилителя, представляющего собой комбинацию инвертирующего и неинвертирующего усилителей, приведена на рис. 2.3. Дифференциальный усилитель усиливает разность сигналов $U_{вх.1}$ и $U_{вх.2}$, подаваемых соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы. Выходное напряжение данной схемы

$$U_{\text{вых. диф.}} = -\frac{R_2}{R_1}U_{\text{вх.1}} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{\text{вх.2}} \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (2.14)$$

Входные сопротивления по инвертирующему и неинвертирующему входам

$$R_{\text{вх инв.}} = R_1; \quad R_{\text{вх неинв.}} = R_3 + R_4. \quad (2.15)$$

Если сопротивления резисторов $R_1 - R_4$ таковы, что

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.16)$$

(обычно принимают $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$), то выражение (2.14) примет вид

$$U_{\text{вых. диф.}} = (-U_{\text{вх.1}} + U_{\text{вх.2}}) \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.17)$$

а коэффициент усиления разностного сигнала

$$K_{U \text{ диф.}} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.18)$$

С учётом неидеальности операционного усилителя при выполнении равенства (2.16)

$$K_{U \text{ диф.}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}; \quad (2.19)$$

$$R_{\text{вх инв.}} = R_1 + \frac{R_{\text{вх0}} \cdot R_2}{R_{\text{вх0}} (1 + K_{U0}) + R_2}; \quad R_{\text{вх неинв.}} = R_3 + \frac{R_{\text{вх0}} \cdot R_4}{R_4 \left(\frac{K_{U \text{ диф.}} + 1}{K_{U0}}\right) + R_{\text{вх0}}}. \quad (2.20)$$

$$U_{\text{вых.ош. диф.}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{\text{см.}} + \Delta U_{\text{вх.}} R_2. \quad (2.21)$$

Сумматор

Сумматор служит для суммирования аналоговых сигналов. Схема инвертирующего сумматора представлена на рис. 2.4. Выходное напряжение схемы без учёта реальных параметров операционного усилителя

$$U_{\text{вых. сум.}} = -(K_1 U_{\text{вх.1}} + K_2 U_{\text{вх.2}} + K_3 U_{\text{вх.3}}), \text{ где } K_i = \frac{R_{\text{ос}}}{R_i} \quad (2.22)$$

входные сопротивления

$$R_{\text{вх1}} = R_1; \quad R_{\text{вх2}} = R_2; \quad R_{\text{вх3}} = R_3. \quad (2.23)$$

При использовании реального усилителя выражения (2.22) и (2.23) примут вид

$$U_{\text{вых. сум.}} = - \left(K_1 U_{\text{вх.1}} + K_2 U_{\text{вх.2}} + K_3 U_{\text{вх.3}} \right), \text{ где } K_i = \frac{R_{\text{OC}}}{R_i + \frac{R_i + R_{\text{OC}}}{K_{U0}}}, \quad (2.24)$$

$$R_{\text{вх. } i} = R_i + \frac{R_{\text{вх.0}} \cdot R_{\text{OC}}}{R_{\text{вх.0}} (1 + K_{U0}) + R_{\text{OC}}}, \quad (2.25)$$

где K_i – коэффициент усиления по i -тому входу; R_i – сопротивление резистора i -того входа.

Для уменьшения выходного напряжения ошибки, обусловленного входными токами OU , между неинвертирующим входом и общим проводом включают резистор $R_{\text{кор.}}$ с сопротивлением

$$\frac{1}{R_{\text{кор.}}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R_{\text{OC}}}. \quad (2.26)$$

$$U_{\text{вых.ош.}}^{\text{сум.}} = \left(1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_{\text{кор.}}} \right) U_{\text{см.}} + \Delta I_{\text{вх.}} R_{\text{OC}}. \quad (2.27)$$

Задание 3. Расчёт транзисторных ключей

Транзисторные ключи, являющиеся одними из основных элементов цифровых устройств, могут строиться по схеме с общей базой, общим эмиттером или общим коллектором. Наибольшее распространение получила схема включения с общим эмиттером (рис.3.1). При работе в ключевой схеме транзистор находится либо в режиме отсечки (транзистор полностью закрыт и через него протекают только малые обратные токи), либо в режиме насыщения (транзистор полностью открыт – напряжение между коллектором и эмиттером минимально, ток коллектора максимален).

Минимальный (граничный) ток базы, при котором транзистор переходит в режим насыщения с коллекторным током

$I_{K \text{ нас. } '}$

$$I_{B \text{ гр.}} = \frac{I_{K \text{ нас.}}}{h_{213}} < I_{B \text{ нас.}}', \quad (3.1)$$

где h_{213} – коэффициент передачи базового тока; $I_{B \text{ нас.}}'$ – реальный ток базы в режиме насыщения.

Превышение базового тока насыщенного транзистора над его граничным значением называют коэффициентом насыщения

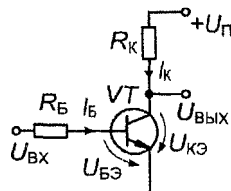


Рисунок 3.1 – Схема транзисторного ключа с общим эмиттером

$$q_{\text{нас.}} = \frac{I_{B \text{ нас.}}}{I_{B \text{ гр.}}} > 1. \quad (3.2)$$

Сопrotивления резисторов R_K и R_B рассчитываются по формулам:

$$R_K = \frac{U_{\Pi} - U_{KЭ \text{ нас.}}}{I_{K \text{ нас.}}}; \quad (3.3)$$

$$R_B = \frac{U_{BX \text{ max}} - U_{BЭ \text{ нас.}}}{I_{B \text{ нас.}}}, \quad (3.4)$$

где $U_{BX \text{ max}}$ – максимальное значение входного напряжения; $U_{KЭ \text{ нас.}}$ – остаточное напряжение между коллектором и эмиттером транзистора в режиме насыщения; $U_{BЭ \text{ нас.}}$ – напряжение между базой и эмиттером в режиме насыщения (для кремниевых транзисторов $U_{KЭ \text{ нас.}} = (0,2 \dots 0,3) \text{ В}$; $U_{BЭ \text{ нас.}} = (0,8 \dots 1,2) \text{ В}$).

Время включения (перехода из режима отсечки в режим насыщения) транзистора

$$t_{\text{вкл.}} = t_{\text{зад.}} + t_{\text{фр.}}, \quad (3.5)$$

где $t_{\text{зад.}}$ – время задержки включения транзистора; $t_{\text{фр.}}$ – время нарастания фронта коллекторного тока. Эти величины рассчитываются по формулам:

$$t_{\text{зад.}} = R_B (C_Э + C_K) \ln \frac{U_{BX \text{ max}}}{U_{BX \text{ max}} - U_{BЭ \text{ откр.}}}; \quad (3.6)$$

$$t_{\text{фр.}} = \tau_B \ln \frac{q_{\text{нас.}}}{q_{\text{нас.}} - 1}, \quad (3.7)$$

где $U_{BЭ \text{ откр.}}$ – напряжение между базой и эмиттером, при котором открывается эмиттерный переход (для кремниевых транзисторов $U_{BЭ \text{ откр.}} = (0,5 \dots 0,6) \text{ В}$); $C_Э$, C_K – ёмкости эмиттерного и коллекторного переходов соответственно; τ_B – время жизни неосновных носителей в области базы, которое определяется выражением

$$\tau_B = \frac{1}{2\pi f_{\alpha}}, \quad (3.8)$$

где f_{α} – предельная граничная частота, на которой коэффициент передачи эмиттерного тока уменьшается в $\sqrt{2}$ раз (см. Приложение 1).

Время выключения (перехода из режима насыщения в режим отсечки) транзистора

$$t_{\text{выкл.}} = t_{\text{рас.}} + t_{\text{сп.}}, \quad (3.9)$$

где $t_{\text{рас.}}$ – время рассасывания избыточного заряда в области базы; $t_{\text{сп.}}$ – время формирования спада коллекторного тока, и

$$t_{\text{рас.}} = \tau_B \ln \frac{I_{B \text{ нас.}} + |I_B^-|}{I_{B \text{ гр.}} + |I_B^-|}; \quad (3.10)$$

$$t_{\text{сп.}} = \tau_B \ln \left(1 + \frac{I_{B \text{ гр.}}}{|I_B^-|} \right), \quad (3.11)$$

где I_B^- – ток базы, протекающий при запираии транзистора, равный

$$I_B^- = \frac{U_{BХ \text{ min}} - U_{БЭ \text{ нас.}}}{R_B}; \quad (3.12)$$

а $U_{BХ \text{ min}}$ – минимальное входное напряжение.

Максимальная рабочая частота ключа должна быть

$$f_{\text{max}} \leq \frac{1}{t_{\text{вкл.}} + t_{\text{выкл.}}}, \quad (3.13)$$

где $t_{\text{вкл.}}$ и $t_{\text{выкл.}}$ рассчитываются соответственно по формулам (3.5) и (3.9).

Средняя потребляемая мощность ключа

$$P_{\text{потр. ср.}} = \frac{P_{\text{потр.}}^0 + P_{\text{потр.}}^1}{2}, \quad (3.14)$$

где

$$P_{\text{потр.}}^0 = U_{\Pi} I_{K \text{ нас.}}, \quad (3.15)$$

$$P_{\text{потр.}}^1 = U_{\Pi} I_{КБЭ} \quad (3.16)$$

– мощности, потребляемые ключом в режиме насыщения и отсечки соответственно;

$I_{КБЭ}$ – обратный ток коллектора закрытого транзистора.

Программа курса «Электронные приборы»

Тема 1. Физические основы полупроводниковой электроники

Материалы электронной техники и их электрофизические свойства.

Структура кристаллической решетки твердых тел. Носители заряда в полупроводниках. Контактные явления в полупроводниках. Физические процессы в электронно-дырочном переходе. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеализированного электронно-дырочного перехода. Пробой $p-n$ -перехода.

Математическая модель (уравнение Шокли) и параметры идеализированного $p-n$ -перехода и реального диода.

Контакты металл-полупроводник, гетеропереходы: энергетические диаграммы, особенности физических процессов, особенности ВАХ.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

Тема 2. Полупроводниковые диоды

Классификация полупроводниковых диодов по функциональному назначению, мощности, частоте и технологии изготовления: выпрямительные, стабилитроны, варикапы, импульсные диоды, диоды Шоттки. Принцип работы, характеристики, параметры, схемы включения. Влияние температуры на ВАХ.

Система обозначения полупроводниковых диодов.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

Тема 3. Биполярные транзисторы

Устройство биполярного транзистора (БТ). Схемы включения.

Основные режимы: активный, отсечки, насыщения, инверсный. Принцип действия транзистора: физические процессы в эмиттерном переходе, базе и коллекторном переходе; распределение неосновных носителей в базе при различных режимах. Эффект модуляции ширины базы. Токи в транзисторе; коэффициенты передачи тока в схемах с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Классификация биполярных транзисторов по мощности и частоте, система обозначения биполярных транзисторов.

Физические параметры транзистора: коэффициент передачи тока, дифференциальные сопротивления и емкости переходов, объемные сопротивления областей.

Статические характеристики транзистора. Характеристики реального транзистора в схемах с ОБ и ОЭ. Влияние температуры на характеристики транзистора. Математические модели и эквивалентные схемы БТ.

Особенности работы транзистора на высоких частотах. Физические процессы, определяющие частотные параметры транзистора. Предельная и граничная частоты, эквивалентная схема транзистора на высоких частотах.

Работа транзистора в импульсном режиме. Физические процессы накопления и расщепления носителей заряда. Импульсные параметры транзистора.

Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Графоаналитический расчет режима усиления. Принцип усиления мощности. Основные параметры и характеристики усилительного устройства.

Понятие о классах усиления. Способы задания рабочей точки БТ.

Эквивалентные схемы усилителя в режиме малого сигнала.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

Тема 4. Полевые транзисторы

Классификация полевых транзисторов (ПТ). Принцип действия ПТ.

Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом. Устройство, схемы включения. Принцип действия, физические процессы, влияние напряжений электродов на ширину $p-n$ -перехода и форму канала. Статические характеристики, области отсечки, насыщения и пробоя $p-n$ -перехода.

Полевые транзисторы с изолированным затвором. МДП-транзисторы со встроенным и индуцированным каналами. Устройство, схемы включения. Режимы обеднения и обогащения в транзисторе со встроенным каналом и его статические характеристики.

Математические модели и эквивалентные схемы ПТ. Влияние температуры на характеристики и параметры ПТ.

Работа ПТ на высоких частотах и в импульсном режиме. Факторы, определяющие частотные свойства. Предельная частота.

Эквивалентная схема на высоких частотах. Области применения ПТ. Перспективы развития и применения ПТ. Особенности СВЧ полевых транзисторов. Полевые транзисторы в интегральном исполнении.

Полупроводниковые приборы с зарядовой связью.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

Тема 5. Компоненты оптоэлектроники и квантовые приборы.

Определение оптического диапазона электромагнитных колебаний. Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов. Электролюминесценция. Основные типы полупроводниковых излучателей: некогерентные и когерентные полупроводниковые излучатели. Светодиоды, устройство, принцип действия, характеристики, параметры. Основные материалы, применяемые для изготовления светодиодов. Достижения в разработке светодиодов.

Полупроводниковые приемники излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. Принцип работы, характеристики, параметры.

Устройство оптронов, основные типы оптронов: резисторные, диодные, транзисторные. Классификация, принцип действия, входные и выходные параметры оптронов.

Полупроводниковые индикаторы.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

Тема 6. Аналоговые интегральные схемы

Общие сведения, основные понятия и определения. Обеспечение режима работы усилительных элементов аналоговых интегральных схем (АИС) по постоянному току. Обратная связь (ОС), виды обратных связей, коэффициент усиления усилителя, охваченного ОС.

Дифференциальные усилительные каскады. Двухтактные усилительные каскады. Операционные усилители.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3].

Тема 7. Цифровые интегральные схемы

Общие сведения, основные понятия и определения. Типовые схемы электронных ключей на БТ и ПТ. Базовые логические элементы цифровых интегральных схем: транзисторно-транзисторная логика, эмиттерно-связанная логика, логика на комплементарных МДП-транзисторах.

Рекомендуемая литература: [1, 2].

Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Ткаченко, Ф.А. Электронные приборы и устройства: учебник для студ. вузов / Ф.А. Ткаченко. – Минск ; М.: Новое знание: ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
2. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: КНОРУС, 2013. – 800 с.
3. Валенко, В.С. Электроника и микросхемотехника / В.С. Валенко, М.С. Хандогин. – Минск: Бестпринт, 2003. – 320 с.
4. Булычев, А.Л. Электронные приборы / А.Л. Булычев, П.М. Лямин, Е.С. Тулинов. – Минск: Выш. шк., 1999. – 414 с.

Дополнительная литература

5. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
6. Павлов, В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 320 с.
7. Изъюрова, Г.И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г.И. Изъюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов, М.А. Ожогин, В.Н. Серов. – М.: Высш. школа, 1987. – 335 с.
8. Алексеев, А.Г. Операционные усилители и их применение / А.Г. Алексеев, Г.В. Войшвилло. – М.: Радио и связь, 1989. – 120 с.
9. Галкин, В.И. Полупроводниковые приборы: транзисторы широкого применения: Справочник / В.И. Галкин, А.Л. Булычев, П.М. Лямин. – Минск: Беларусь, 1995. – 383 с.
10. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник. / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 904 с.

Перечень вопросов к зачёту

1. Классификация электронных приборов. Основные свойства и особенности электронных приборов.
2. Электропроводность полупроводников. Генерация, рекомбинация носителей зарядов.
3. Электронно-дырочный переход при подаче внешнего напряжения. Вольт-амперная характеристика идеализированного электронно-дырочного перехода. Параметры.
4. Математическая модель (уравнение Шокли) и параметры идеализированного $p-n$ -перехода и реального диода.
5. Специальные типы полупроводниковых диодов.
6. Физические основы функционирования биполярных транзисторов. Статический коэффициент передачи эмиттерного тока.
7. Типы биполярных транзисторов, режимы работы, схемы включения.
8. Статические характеристики и параметры биполярного транзистора включённого по схеме с общей базой.
9. Статические характеристики и параметры биполярного транзистора включённого по схеме с общим эмиттером.
10. Малосигнальные T -образные эквивалентные схемы биполярного транзистора в физических параметрах.
11. Малосигнальные эквивалентные схемы биполярного транзистора в h -параметрах.
12. Связь h -параметров с физическими параметрами транзистора.
13. Особенности работы биполярного транзистора на высоких частотах. Предельная и граничная частоты, эквивалентная схема транзистора на высоких частотах.
14. Работа транзистора в импульсном режиме. Импульсные параметры транзистора.
15. Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Принцип усиления.
16. Электронные усилители: структурная схема; классификация; параметры и характеристики; виды искажений.
17. Режимы работы (классы усиления) усилительных элементов в усилительных каскадах.
18. Способы задания начальной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах: схемы с фиксированным током базы и с фиксированным напряжением база-эмиттер (расчёт).
19. Методы стабилизации начальной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах: схема коллекторной стабилизации (принцип действия, расчёт).
20. Методы стабилизации начальной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах: схема эмиттерной стабилизации (принцип действия, расчёт).
21. Типовая схема усилительного каскада с общим эмиттером. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.
22. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим эмиттером; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.
23. Типовая схема усилительного каскада с общей базой. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

24. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общей базой; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.
25. Типовая схема усилительного каскада с общим коллектором. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.
26. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим коллектором; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.
27. Полевые транзисторы с $p-n$ -переходом: устройство; принцип действия; ВАХ; параметры.
28. Полевые транзисторы с изолированным затвором с индуцированным каналом: устройство; принцип действия; ВАХ; параметры.
29. Полевые транзисторы с изолированным затвором со встроенным каналом: устройство; принцип действия; ВАХ; параметры.
30. Малосигнальные эквивалентные схемы полевого транзистора с $p-n$ -переходом. Математическая модель.
31. Малосигнальные эквивалентные схемы полевого транзистора с изолированным затвором. Математическая модель.
32. Работа ПТ на высоких частотах и в импульсном режиме. Предельная частота. Эквивалентная схема на высоких частотах.
33. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС). Применение ПЗС.
34. Основные типы полупроводниковых излучателей. Светодиоды, устройство, принцип действия, характеристики, параметры.
35. Полупроводниковые приемники излучения. Принцип действия, характеристики, параметры.
36. Оптроны: основные типы, классификация, принцип действия, входные и выходные параметры.
37. Полупроводниковые и жидкокристаллические индикаторы.
38. Аналоговые интегральные схемы. Общие сведения, основные понятия, определения и классификация.
39. Обратные связи (ОС): структурная схема; определение; виды ОС; способы получения и введения сигнала ОС.
40. Обратные связи (ОС): влияние ОС на параметры усилителя.
41. Усилители постоянного тока (УПТ). Назначение и особенности. Дрейф нуля в УПТ и методы его устранения. Типы УПТ.
42. Дифференциальный усилительный каскад на биполярных транзисторах. Принцип действия. Параметры.
43. Двухтактные оконечные каскады классов B и AB с транзисторами одного типа проводимости.
44. Двухтактные оконечные каскады классов B и AB на комплементарных транзисторах.
45. Интегральный операционный усилитель (ОУ): структурная схема, параметры, характеристики, классификация.
46. Инвертирующее включение операционного усилителя. Расчёт параметров.
47. Неинвертирующее включение операционного усилителя. Расчёт параметров.
48. Дифференциальный усилительный каскад на базе ОУ. Сумматор на базе ОУ.
49. Интегратор на базе ОУ. Дифференциатор на базе ОУ.

50. Аналоговые компараторы напряжения.
51. Мультивибратор на операционном усилителе.
52. Ключевой режим работы биполярного транзистора. Способы повышения быстродействия.
53. Переключатели тока.
54. Ключевой режим работы полевого транзистора. Виды ключей на полевых транзисторах.
55. Реализация логических функций с помощью электронных схем.
56. Одноступенчатая и двухступенчатая логики.
57. Логические элементы (ЛЭ): классификация, параметры.
58. Базовые ЛЭ цифровых интегральных микросхем: транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ(Ш)).
59. Эмиттерно-связанная логика. Интегральная инжекционная логика.
60. Базовые ЛЭ цифровых интегральных микросхем: на МДП-транзисторах (МОПТЛ, КМОПТЛ)

Приложение 1. Параметры некоторых биполярных транзисторов

Транзистор	h_{21}	$U_{KЭ}^{доп.}$ В	$I_{K}^{доп.}$ мА	$P_{K}^{доп.}$ мВт	$I_{КБ0}$ мкА	$C_{э}$ пФ	$C_{к}$ пФ	f_{α} МГц	Тип транзистора
КТ104А	9...36	-30	50	150	≤ 1	10	50	5	p-n-p
КТ104Б	20...80	-15	50	150	≤ 1	10	50	5	p-n-p
КТ104В	40...160	-15	50	150	≤ 1	10	50	5	p-n-p
КТ201А	20...60	+20	100	150	≤ 1	20	20	10	n-p-n
КТ201Б	30...90	+20	100	150	≤ 1	20	20	10	n-p-n
КТ201В	30...90	+10	100	150	≤ 1	20	20	10	n-p-n
КТ201Г	70...210	+10	100	150	≤ 1	20	20	10	n-p-n
КТ203А	≥ 9	-60	10	150	≤ 1	10	10	5	p-n-p
КТ203Б	30...150	-30	10	150	≤ 1	10	10	5	p-n-p
КТ203В	30...200	-15	10	150	≤ 1	10	10	5	p-n-p
КТ208А	20...60	-15	300	200	≤ 1	100	50	5	p-n-p
КТ208Б	40...120	-15	300	200	≤ 1	100	50	5	p-n-p
КТ208В	80...210	-15	300	200	≤ 1	100	50	5	p-n-p
КТ312А	10...100	+20	30	225	≤ 10	20	500	80	n-p-n
КТ312Б	25...100	+35	30	225	≤ 10	20	500	80	n-p-n
КТ312В	50...280	+20	30	225	≤ 10	20	500	80	n-p-n
КТ315А	20...90	+25	100	150	≤ 1	7	7	100	n-p-n
КТ315Б	50...350	+20	100	150	≤ 1	7	7	100	n-p-n
КТ315В	20...90	+40	100	150	≤ 1	7	7	100	n-p-n
КТ315Г	50...350	+35	100	150	≤ 1	7	7	100	n-p-n
КТ316В	40...120	+10	30	150	$\leq 0,5$	2,5	3	100	n-p-n
КТ316Д	60...300	+10	30	150	$\leq 0,5$	2,5	3	100	n-p-n
КТ325А	30...90	+10	30	225	$\leq 0,5$	2,5	2,5	100	n-p-n
КТ349А	20...80	-15	40	200	≤ 1	8	6	100	p-n-p
КТ349Б	40...160	-15	40	200	≤ 1	8	6	100	p-n-p
КТ349В	120...300	-15	40	200	≤ 1	8	6	100	p-n-p
КТ355А	80...300	+15	30	225	$\leq 0,5$	2	2	100	n-p-n
КТ361А	20...90	-25	100	150	≤ 1	9	9	300	p-n-p
КТ361Б	50...350	-20	100	150	≤ 1	9	9	300	p-n-p
КТ361В	40...160	-40	100	150	≤ 1	7	7	300	p-n-p
КТ361Г	50...350	-35	100	150	≤ 1	7	7	300	p-n-p

Приложение 2. Параметры некоторых полевых транзисторов

Транзистор	S , мА/В	$\frac{U_{зи\text{ отс.}}}{U_{зи\text{ пор.}}}$ В	$U_{си\text{ макс доп.}}$ В	$I_{с\text{ макс доп.}}$ мА	$P_{с\text{ макс доп.}}$ мВт	Тип транзистора
КП103Е	0,4...2,4	+ (0,4...1,5)	- 10	0,3...2,5	120	ПТУП с каналом p -типа
КП103Ж	0,5...2,8	+ (0,5...2,2)	- 10	0,35...3,8	120	ПТУП с каналом p -типа
КП103И	0,8...2,6	+ (0,8...3)	- 10	0,8...1,8	120	ПТУП с каналом p -типа
КП103К	1,0...3,0	+ (1,4...4)	- 10	1,0...5,5	120	ПТУП с каналом p -типа
КП103Л	1,8...3,8	+ (2...6)	- 10	1,8...6,6	120	ПТУП с каналом p -типа
КП103М	1,3...4,4	+ (2,8...7,0)	- 10	3,0...12	120	ПТУП с каналом p -типа
КП301Б	1...2,6	(2,7...5,4)	- 20	15	200	ПТИЗ с индуцированным каналом p -типа
КП302А	5...12	(1...5)	+ 20	3...24	300	ПТУП с каналом n -типа
КП302Б	7...14	(2,5...7)	+ 20	18...43	300	ПТУП с каналом n -типа
КП302В	5...12	(3...10)	+ 20	33...43	300	ПТУП с каналом n -типа
КП304А	≥ 4	(4...5)	- 25	30	300	ПТИЗ с индуцированным каналом p -типа
КП305Ж	5,2...10,5	6	+ 15	15	150	ПТИЗ с встроенным каналом n -типа
КП312А	4...5,8	(2...8)	+ 25	8...25	100	ПТУП с каналом n -типа
КП312Б	2...5	(0,8...6)	+ 25	1,5...7	100	ПТУП с каналом n -типа

Приложение 3. Параметры некоторых операционных усилителей

Тип ОУ	K_{U0}	$R_{вх0}$, МОм	$\pm U_{вых}^{max}$ В	$U_{ск.м}$ В	$I_{вх.ср.}$ нА	$\Delta I_{вх.}$ нА	$K_{ос.сф}$ дБ	$U_{сф.}$ В	$I_{вых.доп.}$ мА
140УД1А	900	0,004	3,5	7	5 000	1 500	60	3	2
140УД1Б	2 000	0,004	8	7	8 000	1 500	60	3	2
К140УД1А	500	0,004	2,8	9	7 000	2 500	60	3	2
К140УД1Б	1 350	0,004	5,7	9	9 000	2 500	60	3	2
К140УД1В	8 000	0,004	5,7	9	9 000	2 300	60	3	2
140УД2	35 000	0,3	10	5	700	200	70	5	13
К140УД2А	35 000	0,3	10	5	700	200	60	6	13
К140УД2Б	3 000	0,3	3	7	700	200	60	3	6
140УД5А	1 500	0,06	6	8	1 100	300	50	6	3
140УД5Б	2 500	0,004	6	5	6 000	1 800	60	6	3
К140УД5А	500	0,05	6,5	10	5 000	1 000	50	6	3
К140УД5Б	1 000	0,003	6,5	5	10 000	5 000	60	6	3
140УД6А	70 000	2	12	5	30	10	70	15	15
140УД6Б	50 000	1	12	8	50	15	70	15	15
К140УД6	30 000	1	11	10	100	25	70	15	15
140УД7	50 000	0,4	11,5	4	200	50	70	15	6
К140УД7	30 000	0,4	10,5	9	400	200	70	15	6
140УД8А	50 000	20	10	20	0,2	0,15	80	10	5
140УД8Б	50 000	20	10	100	0,2	0,15	80	10	5
К140УД8А	50 000	10	10	50	0,2	0,15	70	10	5
К140УД8Б	20 000	10	10	100	1	0,15	70	10	5
К140УД8В	10 000	10	10	100	1,2	0,15	60	10	5
140УД9	35 000	0,3	10	5	350	100	80	7	10
140УД10	50 000	0,4	12	4	500	150	70	6	5
140УД11	50 000	0,4	12	4	50	10	70	6	10
К140УД11	25 000	0,4	12	10	500	200	70	6	10
140УД14А	50 000	30	10	2	2	0,2	85	6	10
140УД14Б	50 000	30	10	2	2	0,2	85	6	10
140УД14В	20 000	30	10	2	2	0,2	85	6	10
К140УД17А	200 000	1 000	10	0,08	4	3	100	15	6
К140УД17Б	120 000	1 000	10	0,15	12	5	100	15	6
КР140УД18	25 000	1 000	11	10	1	0,2	80	16	5
153УД1	20 000	0,2	10	5	600	250	70	8	5
К153УД1А	15 000	0,2	10	7,5	1 500	500	70	8	5
К153УД1Б	10 000	0,2	9	7,5	2 000	600	70	8	5
153УД2	50 000	0,3	11	5	500	200	70	12	6
К153УД2	25 000	0,3	10	7,5	1 500	500	70	12	5
153УД3	25 000	0,4	11	2	200	50	80	8	5
153УД4	5 000	0,2	4	5	400	150	70	5	1
153УД5А	125 000	1	15	2,5	100	20	100	13,5	7
153УД5Б	100 000	1	15	2,5	100	20	100	13,5	7
153УД6	50 000	0,3	10	2	75	10	80	12	5
154УД1	200 000	1	12	3	20	10	80	10	5
154УД2	10 000	0,5	12	2	100	20	70	10	5
154УД3	8 000	1	9,5	9	225	30	90	10	4

Тип ОУ	$K_{\text{г/о}}$	$R_{\text{вх.о.}}$ МОМ	$\pm U_{\text{вх.}}^{\text{max}}$ В	$U_{\text{см. м}}$ В	$I_{\text{вв. ср.}}$ мА	$\Delta I_{\text{вх.}}$ мА	$K_{\text{ос. сф}}$ дБ	$U_{\text{сф.}}^{\text{max}}$ В	$I_{\text{вмх. доп.}}^{\text{OV}}$ мА
154УД4	10 000	1	10	5	1 500	500	70	10	5
K157УД1	50 000	1	15	5	500	150	70	20	300
K157УД2	50 000	0,5	15	10	500	150	70	18	8
544УД1А	50 000	10	10	15	0,15	0,05	80	10	5
544УД1Б	20 000	10	10	50	1	0,5	80	10	5
K544УД1А	50 000	10	10	30	0,15	0,02	64	10	5
K544УД1Б	20 000	10	10	50	1	0,5	64	10	5
544УД2А	20 000	10	10	30	0,1	0,1	70	10	5
544УД2Б	10 000	10	10	50	0,5	0,5	70	10	5
K544УД2А	20 000	10	10	30	0,1	0,1	70	10	5
K544УД2Б	10 000	10	10	50	0,5	0,5	70	10	5
K544УД2В	20 000	10	10	50	1	1	70	10	5
K551УД1А	500 000	1	10	1,5	100	20	60	13,5	5
K551УД1Б	250 000	1	10	2,5	125	35	60	13,5	5
KМ551УД2А	5 000	0,5	11,5	5	400	200	60	4	6
KМ551УД2Б	5 000	0,5	11,5	5	400	200	60	8	6
K553УД1А	15 000	0,5	10	7,5	1,5	0,5	65	8	5
K553УД1Б	25 000	0,5	10	2	0,2	0,05	80	8	5
K553УД2	20 000	0,3	10	7,5	1,5	0,5	70	12	5
574УД1А	50 000	10 000	10	50	0,5	0,2	80	30	5
574УД1Б	50 000	10 000	10	25	0,5	0,2	80	30	5
K574УД1А	20 000	10 000	10	50	0,5	0,2	80	30	5
K574УД1Б	50 000	10 000	10	50	0,5	0,2	80	30	5
K574УД1В	10 000	10 000	10	100	1	0,2	80	30	5
K574УД2А	100 000	1 000	10	25	0,3	0,1	80	10	1
K574УД2Б	100 000	1 000	10	25	0,3	0,1	80	10	1
K574УД3	100 000	1 000	13,5	8	0,3	0,05	80	10	1
KР1408УД1	70 000	1	19	8	40	10	70	21	100
1408УД1	100 000	1	21	5	20	3	80	23	100
1408УД2	50 000	0,4	11,5	5	200	50	70	15	6

Приложение 4. Ряд E24 номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов

E24	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Номинальные значения сопротивлений (ёмкостей) соответствуют числам в приведённой таблице или числам, полученным умножением или делением этих чисел на 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число.

Например, если в результате расчётов получены следующие значения:

$R = 315 \text{ Ом}$ – принимаем $R = 300 \text{ Ом (E24)}$, либо $R = 330 \text{ Ом (E24)}$;
 $R = 9685 \text{ Ом}$ – принимаем $R = 9,1 \text{ кОм (E24)}$, либо $R = 10 \text{ кОм (E24)}$;
 $C = 0,487 \text{ мкФ}$ – принимаем $C = 0,47 \text{ мкФ (E24)}$, либо $C = 0,51 \text{ мкФ (E24)}$.

Выбор того или иного номинального значения обусловлен местом включения резистора или конденсатора в схему электронного устройства. Как правило, если резисторы включены последовательно (например, в делителе напряжения), то значения их сопротивлений принимают либо большими, либо меньшими одновременно. Значения ёмкостей конденсаторов в усилительных каскадах чаще всего выбирают большими.

Приложение 5. Условные графические обозначения в схемах

<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор переменный</p>	<p>Резистор переменный двудвойный</p>
<p>Резистор подстроечный</p>	<p>Резисторы нелинейные: терморезистор и варистор</p>	<p>Конденсатор постоянной емкости</p>	<p>Конденсаторы окисленные полярный и неполярный</p>
<p>Конденсатор подстроечный</p>	<p>Конденсатор переменной емкости (КПЕ)</p>	<p>Катушка индуктивности, дроссель (L3 - с отводами)</p>	<p>Катушка, дроссель с магнитопроводом (L7 - с медным)</p>
<p>Трансформатор: три обмотки и магнитопровод тороидальным</p>	<p>Диод, диодный мост</p>	<p>Стабилитрон (VD8 - двуханодный)</p>	<p>Диод Шоттки (VD9), ограничительный (VD10), варикап (VD11)</p>
<p>Динистор (VS1), трингистор (VS2, VS3), симистор (VS4)</p>	<p>Транзистор p-n-p</p>	<p>Транзистор n-p-n</p>	<p>Транзистор однопереходный</p>

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Общие требования к выполнению и оформлению контрольной работы	4
Задания к контрольной работе.....	5
Методические указания к выполнению контрольной работы	6
Задание 1. Расчёт усилительных каскадов на транзисторах.....	6
Расчёт по постоянному току УК на биполярных транзисторах.....	6
Расчет параметров УК на БТ по переменному току.....	10
Расчет по постоянному току УК на полевых транзисторах.....	12
Расчет параметров УК на ПТ по переменному току.....	16
Расчет емкостей конденсаторов	18
Задание 2. Расчет схем на операционных усилителях	19
Инвертирующий усилитель	20
Неинвертирующий усилитель.....	21
Дифференциальный усилитель (вычитатель)	22
Сумматор	22
Задание 3. Расчет транзисторных ключей	23
Программный курс «Электронные приборы».....	26
Рекомендуемая литература	28
Перечень вопросов к зачёту.....	29
Приложение 1. Параметры некоторых биполярных транзисторов	32
Приложение 2. Параметры некоторых полевых транзисторов	33
Приложение 3. Параметры некоторых операционных усилителей	34
Приложение 4. Ряд E24 номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов	36
Приложение 5. Условные графические обозначения в схемах.....	37

Составители:

Клопоцкий Александр Анатольевич

Смаль Александр Сергеевич

Методические указания

к выполнению контрольной работы
по дисциплине «Электронные приборы»
для студентов специальности
1 – 53 01 02 «**Автоматизированные системы
обработки информации**»
заочной формы обучения

Ответственный за выпуск: Клопоцкий А.А.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 28.05.2020 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 2,33. Уч. изд. л.2,50. Заказ № *III*. Тираж 21 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.