

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению контрольных работ
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 контрольных работ 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 контрольные вопросы по всем разделам изучаемого курса.

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

Составитель: А.С. Смаль, старший преподаватель.

Введение

Методические указания написаны в соответствии с программой курса «Электронные приборы» по специальности 1–53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации».

Цель преподавания дисциплины:

подготовка студентов к решению задач, связанных с рациональным выбором электронных приборов, их режимов работы и схем включения в различных устройствах, а также с расчетом и проектированием типовых радиоэлектронных схем.

Задачи изучения дисциплины:

формирование у студентов необходимой базы знаний о принципах действия и областях применения электронных приборов, электронных аналоговых и цифровых устройств.

знания и умения инженера по информационным технологиям по специальности 1-53 01 02 «Автоматизированные системы обработки информации» определяется квалификационной характеристикой.

Студент должен знать:

– физические основы явлений, принципы действия, устройство, параметры, характеристики электронных, сверхвысокочастотных и квантовых приборов и элементов микроэлектроники и их различных моделей, используемых при анализе и синтезе радиоэлектронных устройств;

– типовые схемотехнические решения аналоговых, импульсных и цифровых устройств различного функционального назначения;

– современное состояние и перспективы развития электронных приборов и радиоэлектронных устройств на их основе.

Студент должен уметь:

– использовать полученные знания для правильного выбора электронного прибора и задания его рабочего режима по постоянному току;

– находить параметры приборов по их характеристикам;

– определять влияние режимов и условий эксплуатации на параметры приборов;

– выполнять расчет типовых радиоэлектронных схем;

Студент должен приобрести навыки работы:

– с электронными приборами и аппаратурой, используемой для исследования характеристик и измерения параметров приборов, а также радиоэлектронных устройств на их основе;

– с технической литературой, справочниками, стандартами, технической документацией по электронным приборам.

Перечень дисциплин, знание которых необходимо для изучения курса:

высшая математика, физика, теория электрических цепей.

Программа курса «Электронные приборы» охватывает три раздела: электронные приборы, аналоговые устройства, цифровые устройства.

Задания к контрольной работе

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

Задание 1. Расчёт усилительных каскадов (УК) на транзисторах

Задача 1.1. Расчёт УК с общим эмиттером (ОЭ) с фиксированным током базы.

Задача 1.2. Расчёт УК с ОЭ с фиксированным напряжением база–эмиттер.

Задача 1.3. Расчёт УК с ОЭ с фиксированным потенциалом базы с эмиттерной стабилизацией.

Задача 1.4. Расчёт УК с ОЭ с коллекторной стабилизацией.

Задача 1.5. Расчёт УК с общей базой.

Задача 1.6. Расчёт УК с общим коллектором.

Задача 1.7. Расчёт УК с общим истоком.

Задача 1.8. Расчёт УК с общим стоком.

Для всех задач **Задания 1:**

а) по заданным параметрам провести расчёт УК по постоянному току и отметить рабочую точку на вольт-амперных характеристиках транзистора;

б) привести малосигнальную эквивалентную схему данного усилительного каскада и рассчитать его параметры по переменному току: входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности, к.п.д.;

в) рассчитать номинальные значения ёмкостей конденсаторов в УК.

Задание 2. Расчёт схем на операционных усилителях (ОУ)

Задача 2.1. Расчёт инвертирующего усилителя.

Задача 2.2. Расчёт неинвертирующего усилителя.

Задача 2.3. Расчёт дифференциального усилителя (вычитателя).

Задача 2.4. Расчёт инвертирующего сумматора.

Задача 2.5. Расчёт активного фильтра (АФ) низкой частоты с инвертирующим включением ОУ.

Задача 2.6. Расчёт АФ высокой частоты с инвертирующим включением ОУ.

Задача 2.7. Расчёт АФ низкой частоты с неинвертирующим включением ОУ.

Задача 2.8. Расчёт АФ высокой частоты с неинвертирующим включением ОУ.

Для задач **2.1 – 2.4:**

а) рассчитать номинальные значения сопротивлений резисторов, обеспечивающих заданные коэффициенты усиления K_U и входные сопротивления $R_{вх}$, считая ОУ идеальным;

Для задач **2.5 – 2.8:**

а) рассчитать для фильтров 1-го порядка номинальные значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов, обеспечивающих заданную граничную частоту $f_{гр}$, а также заданные в полосе пропускания фильтра коэффициент усиления K_U и входное сопротивление $R_{вх}$, считая ОУ идеальным;

Для всех задач **Задания 2:**

б) рассчитать отклонения (в %) полученных значений величин от заданных при учёте параметров реальных операционных усилителей.

Задание 3. Расчёт цифровых устройств

Задача 3.1. Расчёт транзисторного ключа.

Для заданного коэффициент насыщения $q_{нас}$.

а) рассчитать номинальные значения сопротивлений резисторов;

б) рассчитать времена включения и выключения ключа и его максимальную рабочую частоту;

в) рассчитать среднюю потребляемую мощность ключа.

Принять максимальный ток коллектора $I_{K \max} = 0,2 I_{K \max \text{ доп.}}$, напряжение питания $U_{\Pi} = 5 \text{ В}$, сопротивление нагрузки гораздо больше выходного сопротивления ключа.

Задача 3.2. Синтез комбинационного устройства:

а) составить таблицу истинности для заданной функции алгебры логики (ФАЛ) 4-х переменных (A, B, C, D);

б) записать совершенную дизъюнктивную нормальную форму для заданной ФАЛ;

в) минимизировать полученное выражение с помощью карт Карно;

г) составить комбинационную схему в заданном базисе логических элементов.

Задача 3.3. Расчёт мультивибратора на транзисторах.

Принять напряжение питания $U_{\Pi} = 5 \text{ В}$, максимальный ток коллектора $I_{K \max}$ равным $0,2 I_{K \max \text{ доп.}}$.

Задача 3.4. Расчёт мультивибратора на операционном усилителе.

Для задач 3.3, 3.4:

рассчитать значения сопротивлений и ёмкостей элементов, обеспечивающих заданные параметры (период колебаний T и скважность S) мультивибратора.

Общие требования к оформлению контрольной работы

1. Контрольная работа оформляется либо в тетради (в клетку), либо на прошитых листах формата А4. На титульном листе (на обложке) должны быть указаны наименования вуза, факультета, группы, дисциплины, фамилия и инициалы студента.

2. Текст разборчиво записывается на пронумерованных сторонах листов, обратные стороны которых предназначены для внесения студентом дополнений и исправлений допущенных ошибок. Для замечаний преподавателя на каждой странице оставляется справа поле шириной не менее 3 см.

3. В начале каждой задачи приводятся условие, исходные данные своего варианта задания и необходимые принципиальные схемы, выполненные в соответствии с требованиями ЕСКД с помощью чертёжных инструментов.

4. Для каждой схемы необходимо пояснить назначение всех входящих в неё элементов.

5. Должны быть приведены необходимые для решения задачи характеристики и параметры транзисторов и микросхем с указанием использованных справочников.

6. Решения должны содержать подробные пояснения, расчетные формулы, необходимые графики.

7. Значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов должны соответствовать стандартному ряду номинальных значений Е24 (см. Приложение 4).

8. На последней странице указывается список использованной в работе литературы, ставится дата окончания работы и подпись.

9. На повторную рецензию не допущенные к защите контрольные работы принимаются только при наличии предыдущей рецензии и первоначального варианта работы.

Методические указания к выполнению контрольной работы

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.

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:

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

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).

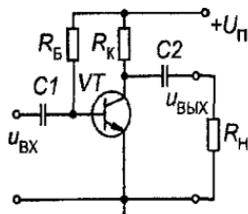


Рисунок 1.1 – Схема УК с ОЭ с фиксированным током базы

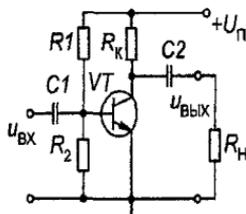


Рисунок 1.2 – Схема УК с ОЭ с фиксированным напряжением база-эмиттер

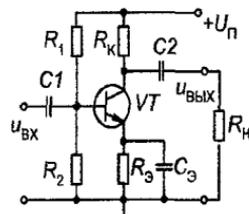


Рисунок 1.3 – Схема УК с ОЭ с фиксированным потенциалом базы с эмиттерной стабилизацией

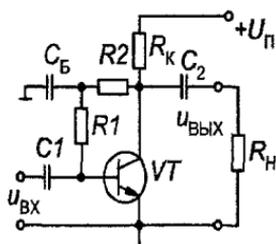


Рисунок 1.4 – Схема УК с ОЭ с коллекторной стабилизацией

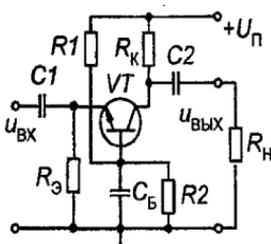


Рисунок 1.5 – Схема УК с ОБ

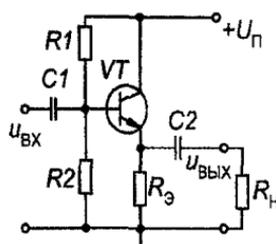


Рисунок 1.6 – Схема УК с ОК

В этих каскадах транзистор VT совместно с резистором R_K (или $R_э$ в схеме на рис.1.6) образуют управляемый делитель напряжения. С помощью остальных резисторов реализуют цепи, обеспечивающие начальный режим работы транзистора. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 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 $R_э$ 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

$$R_K = (0,2 \dots 0,5) R_H; \quad (1.2)$$

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

Так как по переменному току резисторы R_K и R_H ($R_э$ и R_H (рис. 1.6)) оказываются включёнными параллельно, то

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

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

$$R_K \parallel R_H = \frac{R_K R_H}{R_K + R_H}.$$

Поскольку $I_э = I_K + I_B \approx I_K$ (т.к. $I_B \ll I_K$), то для схемы с ОК (рис.1.6) тоже можно пользоваться соотношением (1.4), но в этом случае вместо значения сопротивления резистора R_K надо подставлять значение сопротивления резистора $R_э$.

После определения максимального амплитудного значения тока коллектора задают:

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

– напряжение коллектор-эмиттер покоя
$$U_{Kэ0} = (1,2 \dots 1,5) U_{H м} + U_{Kэ \min}; \quad (1.6)$$

– напряжение источника питания
$$U_{п} \geq U_{Kэ0} + I_{K0} R_K \text{ (или } R_э \text{ (рис.1.6))}. \quad (1.7)$$

Здесь $U_{Kэ \min}$ – напряжение, соответствующее работе транзистора в режиме насыщения, для маломощных транзисторов $U_{Kэ \min} = (0,5 \dots 1,0) \text{ В}$ и $(1 \dots 2) \text{ В}$ для мощ-

ных. При задании напряжения питания следует округлять полученное значение до большего целого значения. 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 несколько выше, чем в других схемах.

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

$$U_{KЭ0} = U_{\Pi} - I_{K0}R_K > U_{Hm} \text{ (или } R_3 \text{ вместо } R_K \text{ (рис.1.6))}; \quad (1.8)$$

а для схем на рис. 1.3, 1.5 используют формулу

$$U_{KЭ0} = U_{\Pi} - I_{K0}(R_K + R_3) > U_{Hm}, \quad (1.9)$$

где принимают

$$R_3 = (0,05 \dots 0,1)R_K \quad (1.10)$$

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 $U_{BЭ0}$ (рис. 1.7, а). Затем определяют максимальный ток коллектора $I_{K \max}$, для этого на выходных ВАХ по двум точкам $(U_{\Pi}; 0)$ и $(U_{KЭ0}; I_{K0})$ строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.7, б).

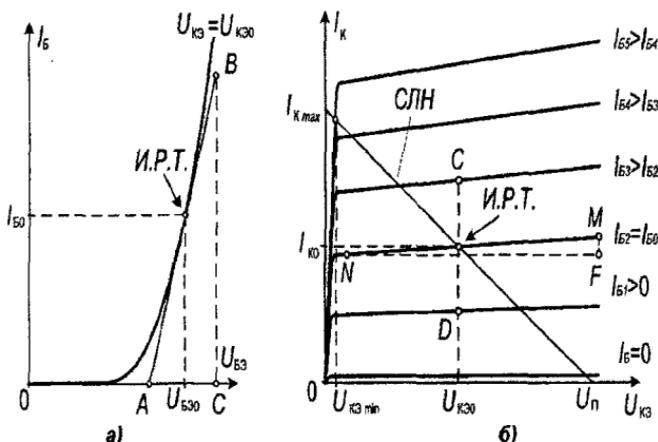


Рисунок 1.7 – Входные (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики транзистора

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий

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

Если условия (1.11) не выполняются, то следует либо увеличить сопротивление резистора R_K (или R_3 в схеме (рис.1.6)), либо уменьшить напряжение питания, напряжение покоя между коллектором и эмиттером транзистора, либо выбрать другой транзистор.

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_{II} . Смещение эмиттерного перехода осуществляется за счёт протекания тока базы I_{B0} от источника питания U_{II} через резистор R_B , номинальное значение сопротивления которого рассчитывают по формуле

$$R_B = \frac{U_{II} - U_{БЭ0}}{I_{B0}}. \quad (1.12)$$

В схеме на рис. 1.2 режим покоя обеспечивается фиксированием напряжения $U_{БЭ0}$ между базой и эмиттером транзистора с помощью источника питания и делителя напряжения из резисторов R_1 , R_2 . Номинальные значения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 определяют по формулам:

$$R_1 = \frac{U_{II} - U_{БЭ0}}{I_D + I_{B0}}; \quad R_2 = \frac{U_{БЭ0}}{I_D}, \quad (1.13)$$

где I_D – ток делителя, который обычно принимают

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

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, 1.5) обеспечивают последовательную ООС по току путём включения резистора $R_Э$ 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 $R_Э$ шунтируют конденсатором $C_Э$, а резисторы R_1 , R_2 – конденсатором C_B .

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

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

$$R_1 = \frac{U_{II} - U_B}{I_D + I_{B0}}; \quad R_2 = \frac{U_B}{I_D}, \quad (1.16)$$

где потенциал базы

$$U_B = U_{БЭ0} + (I_{K0} + I_{B0})R_Э; \quad (1.17)$$

I_D – ток делителя, который выбирается из условия обеспечения необходимой стабильности режима работы. Обычно принимают $I_D = (2...10)I_{B0}$. (1.18)

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

$$I_D \leq (0,1...0,15)I_{B0}. \quad (1.19)$$

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

$$R_1 + R_2 = (U_{КЭ0} - U_{БЭ0}) / I_{Б0}; \quad R_2 = (0,9 \dots 1,5) R_1. \quad (1.20)$$

В схеме с ОБ (рис. 1.5) по постоянному току реализована последовательная ООС по току (эмиттерная стабилизация), поэтому номинальные 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 номинальных 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.

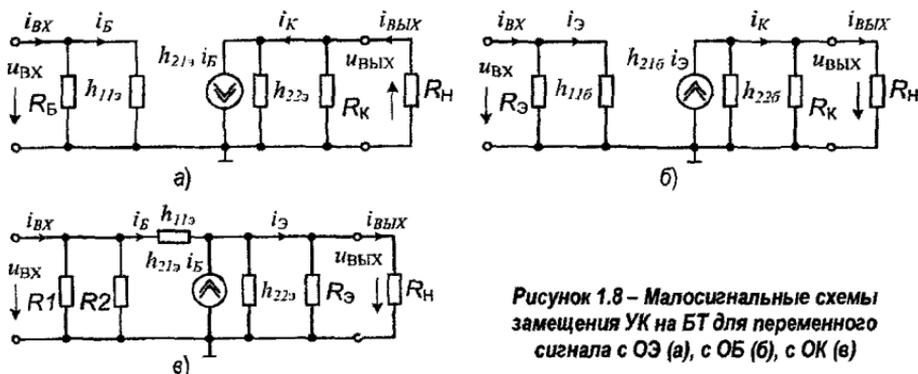


Рисунок 1.8 – Малосигнальные схемы замещения УК на БТ для переменного сигнала с ОЭ (а), с ОБ (б), с ОК (в)

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 этих каскадов резистор R_B следует заменять на параллельно соединённые резисторы R_1, R_2 (как показано на рис. 1.8, в).

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

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 на переменном токе, то в малосигнальной схеме данного каскада резистор R_B следует заменить резистором R_1

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

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

$$R_K = R_K \parallel R_2. \quad (1.23)$$

Для схемы с ОЭ в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис.1.8, а):
 входное сопротивление $R_{BX} = R_E \parallel h_{11\alpha}; \quad (1.24)$

выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = R_K \parallel (1/h_{22\alpha}) = \frac{R_K}{1 + R_K h_{22\alpha}}; \quad (1.25)$

коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{h_{21\alpha}}{h_{11\alpha}} \frac{R_K}{1 + R_K h_{22\alpha} + (R_K/R_H)}. \quad (1.26)$

При расчёте параметров какой-либо из схем усилительных каскадов с общим эмиттером, показанных на рис. 1.2 – 1.4 (соответственно Задачи 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 $R_{BX} = R_3 \parallel h_{11\beta}; \quad (1.27)$

выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = R_K \parallel (1/h_{22\beta}) = \frac{R_K}{1 + R_K h_{22\beta}}; \quad (1.28)$

коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{h_{21\beta}}{h_{11\beta}} \frac{R_K}{1 + R_K h_{22\beta} + \frac{R_K}{R_H}}. \quad (1.29)$

Для схемы с ОК в соответствии с малосигнальной схемой замещения (рис.1.8, в):
 входное сопротивление $R_{BX} = R_1 \parallel R_2 \parallel (h_{11\gamma} + (1 + h_{21\gamma}) R_{экв.}); \quad (1.30)$

выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = R_3 \parallel \left(\frac{R_1 \parallel R_2 + h_{11\gamma}}{1 + h_{21\gamma}} \right) \parallel \left(\frac{1}{h_{22\gamma}} \right); \quad (1.31)$

коэффициент усиления по напряжению $K_U = (1 + h_{21\gamma}) \frac{R_{экв.}}{h_{11\gamma} + (1 + h_{21\gamma}) R_{экв.}}, \quad (1.32)$

где $R_{экв.} = R_3 \parallel R_H \parallel (1/h_{22\gamma})$.

Для всех схем усилительных каскадов:

коэффициент усиления по току $K_I = K_U \frac{R_{ВЫХ}}{R_H}. \quad (1.33)$

коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U K_I. \quad (1.34)$

к.п.д. $\eta = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U_{Hm}^2 / (2R_H)}{U_{\Pi} (I_{K0} + I_{B0} + I_D)} \quad (\text{для схемы на рис.1.1 } I_D = 0). \quad (1.35)$

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]), 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 $h_{21\beta}$ и $h_{22\beta}$ 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 $I_{B0} = I_{B2}$), строят треугольник FMN и находят

$$h_{22\beta} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{MF}{FN} = \frac{I_{K_M} - I_{K_F}}{U_{KЭ_F} - U_{KЭ_N}}. \quad (1.36)$$

Чтобы найти коэффициент передачи тока $h_{21\beta}$, используют значения токов коллектора в точках C, D и соответствующих значений токов базы I_{B3}, I_{B1} :

$$h_{21\beta} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{I_{K_C} - I_{K_D}}{I_{B3} - I_{B1}}. \quad (1.37)$$

Для определения параметра $h_{11\beta}$ 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

$$h_{11\beta} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{CA}{BA} = \frac{U_{БЭ_C} - U_{БЭ_A}}{I_{B_3} - I_{B_A}}. \quad (1.38)$$

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

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

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).

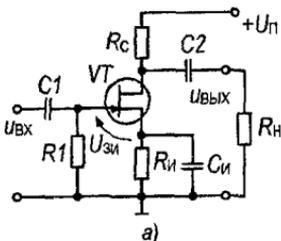


Рисунок 1.9 – Схемы УК с ОИ на ПТУП – а; на ПТИЗ – б

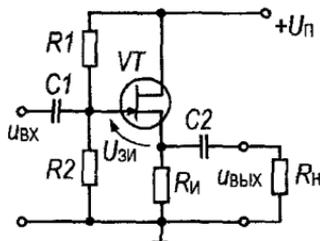
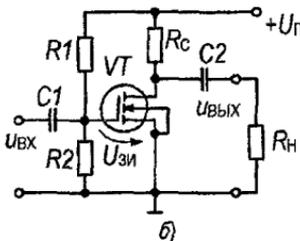


Рисунок 1.10 – Схема УК с ОС

В этих каскадах транзистор VT совместно с резистором R_c (или $R_{н}$ в схеме с общим стоком рис.1.10) образуют управляемый делитель напряжения. С помощью ос-

тальных 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 $I_{C \text{ макс. доп.}}$ 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

$$R_C = (0,2 \dots 0,5) R_H; \quad (1.40)$$

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

Так как по переменному току резисторы R_C и R_H (R_C и R_H (рис. 1.9)) 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.

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

После определения максимального амплитудного значения тока стока задают:

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

– напряжение сток–исток покоя $U_{СИ0} = (1,2 \dots 1,5) U_{Hm} + |U_{ЗИ \text{ min}}|,$ (1.44)

где $U_{ЗИ \text{ min}}$ равно напряжению отсечки $U_{ЗИ \text{ отс.}}$ 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):

$$U_{П} \geq U_{СИ0} + I_{C0} R_C + |U_{ЗИ0}|, \quad (1.45)$$

где $U_{ЗИ0} = U_{ЗИ \text{ отс.}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{C0}}{I_{C \text{ нач.}}}} \right),$ (1.46)

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

$$U_{П} \geq U_{СИ0} + I_{C0} R_C \text{ (или } R_H \text{ вместо } R_C \text{ для УК с ОС).} \quad (1.47)$$

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

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

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

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

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 (рис. 1.11). Затем определяют максимальный ток стока $I_{C\ max}$, для этого на выходных ВАХ по двум точкам $(U_{П}; 0)$ и $(U_{СИ0}; I_{C0})$ строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.11).

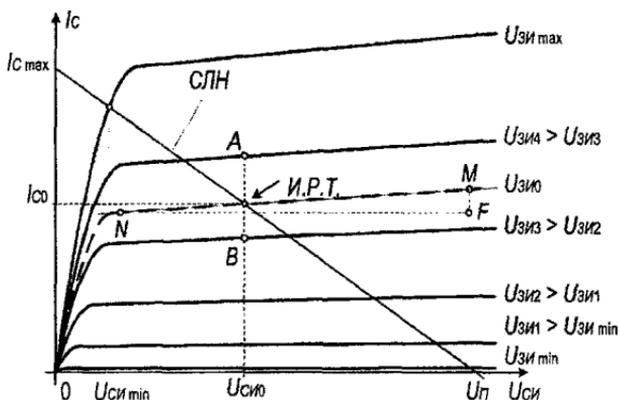


Рисунок 1.11 – Выходные вольт-амперные характеристики полевого транзистора

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий

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

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, либо выбрать другой транзистор.

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 при использовании ПТ с каналом n -типа для управления током стока в

УК на ПТУП необходимо задавать напряжение затвор-исток $|U_{ЗИ0}| < |U_{ЗИ\text{отс.}}|$, в УК на ПТИЗ с индуцированным каналом $U_{ЗИ0} > U_{ЗИ\text{пор.}}$, а в УК на ПТИЗ с встроенным каналом $U_{ЗИ0}$ может быть либо больше, либо меньше, 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 $R_{И}$ в цепи истока может отсутствовать.

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

$$U_{ЗИ0} = U_3 - U_{И} = U_3 - I_{C0}R_{И}, \quad (1.51)$$

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

$$U_{ЗИ0} = -I_{C0}R_{И}. \quad (1.52)$$

Помимо функции автоматического смещения потенциала истока резистор $R_{И}$ 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 $R_{И}$ шунтируют конденсатором $C_{И}$, в диапазоне рабочих частот сопротивление которого $X_{C_{И}} \ll R_{И}$.

Таким образом, из выражения (1.52) следует, что

$$R_{И} = \frac{|U_{ЗИ0}|}{I_{C0}}. \quad (1.53)$$

Сопротивление резистора R_1 принимают $R_1 = (10 \dots 100)$ 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 $U_{П}$. Эта схема аналогична схеме УК на БТ с фиксированным потенциалом базы (рис.1.2). Напряжение между затвором и истоком

$$U_{ЗИ0} = U_3 - U_{И} = U_3 > U_{ЗИ\text{пор.}} \quad (1.55)$$

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

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

Задаваясь значением $R_1 \parallel R_2 = (0,1 \dots 10)$ МОм, (1.57)

из выражений (1.55), (1.56) находим

$$R_1 = \frac{U_{П}}{U_{ЗИ0}} \times (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (1.58)$$

$$R_2 = \frac{U_{3И0}}{U_{П} - U_{3И0}} R_1. \quad (1.59)$$

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

$$U_{3И0} = U_3 - U_{И} = U_3 - I_{C0} R_{И}. \quad (1.60)$$

Потенциал затвора определяется выражением (1.56). При расчёте сопротивлений делителя напряжения $R_1 - R_2$ в зависимости от применяемого транзистора следует руководствоваться соотношением (1.54) или (1.57). Тогда для УК на ПТУП

$$R_1 = \frac{U_{П}}{I_{C0} R_{И} - |U_{3И0}|} \times (10 \dots 100) \text{ кОм}; \quad (1.61)$$

$$R_2 = \frac{U_3}{U_{П} - U_3} R_1, \text{ где } U_3 = I_{C0} R_{И} - |U_{3И0}|; \quad (1.62)$$

для УК на ПТИЗ

$$R_1 = \frac{U_{П}}{I_{C0} R_{И} + U_{3И0}} \times (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (1.63)$$

$$R_2 = \frac{U_3}{U_{П} - U_3} R_1, \text{ где } U_3 = I_{C0} R_{И} + U_{3И0}. \quad (1.64)$$

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.

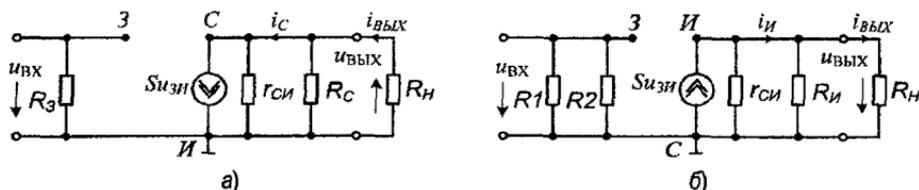


Рисунок 1.12 – Малосигнальные схемы замещения УК на ПТ для переменного сигнала с ОИ (а), с ОС (б)

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 R_1 , а в схеме на ПТИЗ (рис. 1.9, б) резистор R_3 следует заменить параллельно соединёнными резисторами R_1 , R_2 (как показано на рис. 1.12, б). Соответственно для схем с ПТУП и ПТИЗ

$$R_3 = R_1; \quad (1.65)$$

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.66)$$

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

входное сопротивление $R_{BX} = R_3; \quad (1.67)$

выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = R_C \parallel r_{СИ}; \quad (1.68)$

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

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

входное сопротивление $R_{BX} = R_1 \parallel R_2; \quad (1.70)$

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

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

Для всех схем усилительных каскадов:

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

коэффициент усиления по мощности $K_p = K_U K_I. \quad (1.74)$

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

Здесь S – крутизна полевого транзистора, $r_{СИ}$ – дифференциальное сопротивление проводящего канала. Значения крутизны S и сопротивления $r_{СИ}$ приводятся в справочниках (см., например, Приложение 2 или [9]) 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 $U_{зи0}$), строят треугольник FNM и находят

$$r_{сн} = \frac{\Delta U_{сн}}{\Delta I_c} = \frac{FN}{MF} = \frac{U_{снF} - U_{снN}}{I_{сM} - I_{сF}}. \quad (1.76)$$

Чтобы найти крутизну S , используют значения токов стока в точках A , B и соответствующих значений напряжений затвор – исток $U_{зи4}$ и $U_{зи3}$:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} = \frac{I_{с4} - I_{с3}}{U_{зи4} - U_{зи3}}. \quad (1.77)$$

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:

$$C_1 = \frac{10...50}{2\pi f_{н.гр.} R_{ВХ}}; \quad (1.78)$$

$$C_2 = \frac{10...50}{2\pi f_{н.гр.} (R_{ВЫХ} + R_H)},$$

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

Ёмкостные сопротивления шунтирующих конденсаторов C_3 , 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):

$$C_3 = \frac{10...50}{2\pi f_{н.гр.} R_3}; \quad (1.79)$$

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

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

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

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

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 (рис.2.5, 2.6), интеграторы, дифференциаторы, генераторы и др.

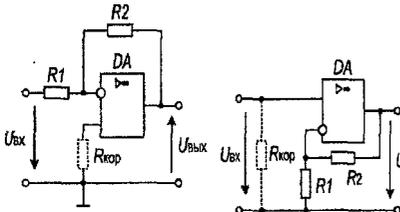


Рисунок 2.1 – Инвертирующий усилитель на ОУ

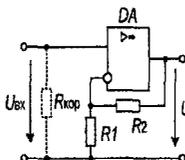


Рисунок 2.2 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

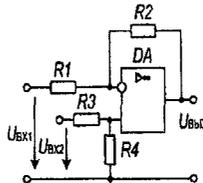


Рисунок 2.3 – Дифференциальный усилитель

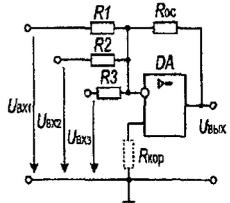


Рисунок 2.4 – Инвертирующий сумматор

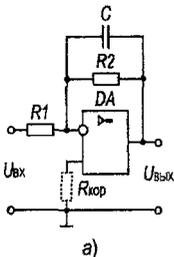


Рисунок 2.5 – Активные фильтры с инвертирующим включением ОУ:
а – ФНЧ; б – ФВЧ

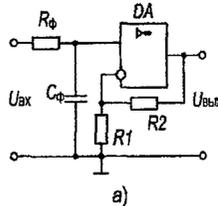
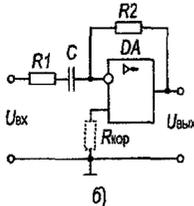
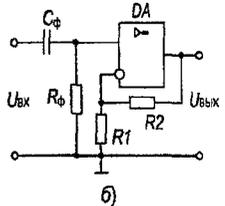


Рисунок 2.6 – Активные фильтры с неинвертирующим включением ОУ:
а – ФНЧ; б – ФВЧ



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_{UO} характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно $10^3 \dots 10^6$);
- входное сопротивление $R_{вх0}$ – сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают дифференциальное входное сопротивление $R_{вх, диф}$, т.е. сопротивление

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

– *выходное сопротивление* $R_{\text{вых.0}}$ – внутреннее сопротивление ОУ, рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС (порядка 100 Ом);

– *входное напряжение смещения* $U_{\text{см}}$ 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, $(0,1...10) \text{ мВ}$);

– *входной ток* $I_{\text{вх. ср.}}$ (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_{213} 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 $(50...120) \text{ дБ}$).

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

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

При расчете схем на операционных усилителях возникает дополнительная погрешность, связанная с выбором значений сопротивлений и ёмкостей из стандартного ряда номинальных значений (в данной работе используется ряд E24). 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, граничной частоты 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

$$K_{U_{\text{инв.}}} = - \frac{R_2}{R_1} , \quad (2.2)$$

а входное сопротивление $R_{\text{вх. инв.}} = R_1$. (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

$$K_{U_{\text{инв.}}} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2.4)$$

$$R_{\text{вх. инв.}} = R_1 + \frac{R_{\text{вх0}} R_2}{R_{\text{вх0}} (1 + K_{U0}) + R_2}. \quad (2.5)$$

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

$$R_{\text{кор.}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.6)$$

Тогда напряжение ошибки будет определяться выражением

$$U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (U_{\text{см.}} + \Delta I_{\text{вх}} R_{\text{кор.}}). \quad (2.7)$$

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

$$K_{U_{\text{неинв.}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.8)$$

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

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

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

$$K_{U_{\text{неинв.}}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2.10)$$

$$R_{\text{вх. неинв.}} = \frac{R_{\text{кор.}} R_{\text{вх0}}}{R_{\text{кор.}} \frac{K_{U_{\text{неинв.}}}}{K_{U0}} + R_{\text{вх0}}}. \quad (2.11)$$

Напряжение ошибки в неинвертирующем усилителе больше за счёт синфазной составляющей

$$U_{\text{вых.ош.}}^{\text{неинв.}} = U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}} + \frac{U_{\text{вых.}}}{K_{\text{ос. сф}}}, \quad (2.12)$$

где $U_{\text{вых.ош.}}^{\text{инв.}}$ определяется выражением (2.7).

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

$$U_{вых. диф.} = -\frac{R_2}{R_1}U_{вх.1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{вх.2} \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (2.13)$$

Входные сопротивления по инвертирующему и неинвертирующему входам

$$R_{вх. инв.} = R_1; \quad R_{вх. неинв.} = R_3 + R_4. \quad (2.14)$$

Если сопротивления резисторов $R_1 - R_4$ таковы, что

$$R_1R_4 = R_2R_3, \quad (2.15)$$

(обычно принимают $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$), то выражение (2.13) примет вид

$$U_{вых. диф.} = (-U_{вх.1} + U_{вх.2}) \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.16)$$

а коэффициент усиления разностного сигнала

$$K_U \text{ диф.} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.17)$$

С учётом неидеальности операционного усилителя при выполнении равенства (2.15)

$$K_U \text{ диф.} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{У0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}; \quad (2.18)$$

$$R_{вх. инв.} = R_1 + \frac{R_{вх0}R_2}{R_{вх0}(1 + K_{У0}) + R_2}; \quad R_{вх. неинв.} = R_1 + \frac{R_2R_{вх0}}{R_2 \frac{K_U \text{ диф.}}{K_{У0}} + R_{вх0}}. \quad (2.19)$$

$$U_{вых. диф.}^{диф. ош.} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{см.} + \Delta I_{вх} R_2. \quad (2.20)$$

Сумматор

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

$$U_{вых. сум.} = -\frac{R_{ОС}}{R_1}U_{вх.1} - \frac{R_{ОС}}{R_2}U_{вх.2} - \frac{R_{ОС}}{R_3}U_{вх.3}; \quad (2.21)$$

входные сопротивления

$$R_{вх.1} = R_1; \quad R_{вх.2} = R_2; \quad R_{вх.3} = R_3. \quad (2.22)$$

При использовании реального усилителя выражения (2.21) и (2.22) примут вид

$$U_{вых. сум.} = -R_{ОС} \sum_{i=1}^3 \frac{U_{вх.i}}{R_i + \frac{R_{ОС}}{K_{У0}}}, \quad (2.23)$$

$$R_{\text{вх},i} = R_i + \frac{R_{\text{вх}0} R_{\text{OC}}}{R_{\text{вх}0} (1 + K_{U0}) + R_{\text{OC}}}, \quad (2.24)$$

где $U_{\text{вх},i}$ – напряжение на i -том входе; R_i – сопротивление резистора i -того входа.

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

$$\frac{1}{R_{\text{кор}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{\text{OC}}}. \quad (2.25)$$

$$U_{\text{вых,опл}}^{\text{сим}} = \left(1 + \frac{R_{\text{OC}}}{R_{\text{кор}}} \right) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх}} R_{\text{OC}}. \quad (2.26)$$

Активные фильтры с инвертирующим включением ОУ

На рис. 2.5 представлены активные фильтры первого порядка с инвертирующим включением ОУ.

Для активного фильтра низкой частоты (рис.2.5, а) передаточная функция

$$\underline{K}_U(\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j(\omega/\omega_0)}, \quad (2.27)$$

где
$$\omega_0 = \frac{1}{R_2 C} \quad (2.28)$$

– верхняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \quad (2.29)$$

уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Для активного фильтра высокой частоты (рис.2.5, б) передаточная функция

$$\underline{K}_U(\omega) = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 - j(\omega_0/\omega)}, \quad (2.30)$$

где
$$\omega_0 = \frac{1}{R_2 C}, \quad (2.31)$$

– нижняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}} \quad (2.32)$$

уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

В полосе пропускания фильтров коэффициент усиления

$$K_{U \max} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.33)$$

а входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = R_1. \quad (2.34)$$

С учётом неидеальности ОУ выражения (2.33) и (2.34) принимают вид

$$K_{U \text{ неид.}} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (2.35)$$

$$R_{\text{вх}} = R_1 + \frac{R_{\text{вх0}} R_2}{R_{\text{вх0}} (1 + K_{U0}) + R_2}. \quad (2.36)$$

Активные фильтры с неинвертирующим включением ОУ

На рис. 2.6 представлены активные фильтры первого порядка с неинвертирующим включением ОУ.

Для активного фильтра низкой частоты (рис.2.6, а) передаточная функция

$$\underline{K}_U(\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j(\omega/\omega_0)}, \quad (2.37)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{R_\phi C_\phi}, \quad (2.38)$$

– верхняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \quad (2.39)$$

уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Для активного фильтра высокой частоты (рис.2.6, б) передаточная функция

$$\underline{K}_U(\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 - j(\omega_0/\omega)}, \quad (2.40)$$

где

$$\omega_0 = \frac{1}{R_\phi C_\phi}, \quad (2.41)$$

– нижняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}} \quad (2.42)$$

уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

В полосе пропускания фильтров коэффициент усиления

$$K_{U \max} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.43)$$

а входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = R_{\phi}, \quad (2.44)$$

С учётом неидеальности ОУ выражения (2.43) и (2.44) принимают вид

$$K_U = \frac{K_{U0}}{1 + K_{U0} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}, \quad (2.45)$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_{\phi} R_{\text{вх}0}}{R_{\text{вх}0} + R_{\phi} (K_U / K_{U0})}. \quad (2.46)$$

Задание 3. Расчёт цифровых устройств

Транзисторные ключи

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*

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

Сопротивления резисторов R_K и R_B рассчитываются по формулам:

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

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

где $U_{ВХ \text{ max}}$ – максимальное значение входного напряжения; $U_{КЭ \text{ нас.}}$ – остаточное на-

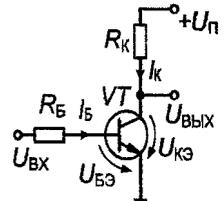


Рисунок 3.1 – Схема транзисторного ключа с общим эмиттером

напряжение между коллектором и эмиттером транзистора в режиме насыщения; $U_{БЭ\text{ нас.}}$ – напряжение между базой и эмиттером в режиме насыщения (для кремниевых транзисторов $U_{КЭ\text{ нас.}} = (0,2...0,3)$ В; $U_{БЭ\text{ нас.}} = (0,8...1,2)$ 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:

$$t_{\text{зад.}} = R_B (C_{Э} + C_K) \ln \frac{U_{БХ\text{ max}}}{U_{БХ\text{ max}} - U_{БЭ\text{ отгр.}}}; \quad (3.6)$$

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

где $U_{БЭ\text{ отгр.}}$ – напряжение между базой и эмиттером, при котором открывается эмиттерный переход (для кремниевых транзисторов $U_{БЭ\text{ отгр.}} = (0,5...0,6)$ В);

$C_{Э}$, C_K – ёмкости эмиттерного и коллекторного переходов соответственно; τ_B – время жизни неосновных носителей в области базы, которое определяется выражением

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

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

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

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

где $I_{Б}^{-}$ – ток базы, протекающий при заперении транзистора, равный

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

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

Максимальная рабочая частота ключа должна быть

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

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

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

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

– мощности, потребляемые ключом в режиме насыщения и отсечки соответственно; I_{KBO} – обратный ток коллектора закрытого транзистора.

Комбинационные устройства

Комбинационными (логическими) называют схемы, работа которых однозначно определяется лишь комбинацией входных сигналов в данный момент времени и не зависит от того, какие входные сигналы подавались на схему в предыдущие моменты времени.

Задача синтеза комбинационной схемы состоит в построении реальной схемы на основе заданных законов ее функционирования. При синтезе схем чаще всего необходимо построить схему с использованием минимального числа элементов в базисе И-НЕ либо ИЛИ-НЕ.

Для описания комбинационных схем используется математический аппарат булевых функций – алгебра логики.

Логической функцией называется функция нескольких переменных A, B, \dots, N , т.е. $F = f(A, B, \dots, N)$, когда сама функция и независимые переменные могут принимать только два значения: "0" и "1". Связи между входными и выходными сигналами комбинационных схем аналитически описываются булевыми функциями.

Среди большого числа функций двух и более переменных особо выделяют следующие функции:

1. Логическое сложение (дизъюнкция) - операция "ИЛИ", обозначаемая " \vee " либо "+"; $F = A \vee B = A + B$. Читается: F равно A или B .

2. Логическое умножение (конъюнкция) - операция "И", обозначаемая " \wedge " либо " \cdot "; $F = A \wedge B = A \cdot B$. Читается: F равно A и B .

3. Логическое отрицание (инверсия) - операция "НЕ", обозначаемая чертой над переменной: $F = \bar{A}$. Читается: F равно не A .

Элементы ИЛИ-НЕ и И-НЕ выполняют те же логические операции, что и элементы ИЛИ и И, но кроме того, еще выполняют операцию НЕ. Логические функции реализуемые этими элементами могут быть соответственно записаны в следующем виде:

$$F = \overline{A+B}, \quad F = \overline{A \cdot B}.$$

Элементарные логические операции над двоичными переменными реализуются электронными схемами, которые называются логическими элементами. Число входов логических элементов соответствует числу аргументов воспроизводимой им булевой функции. На рис.3.2 показаны условные обозначения логических элементов.

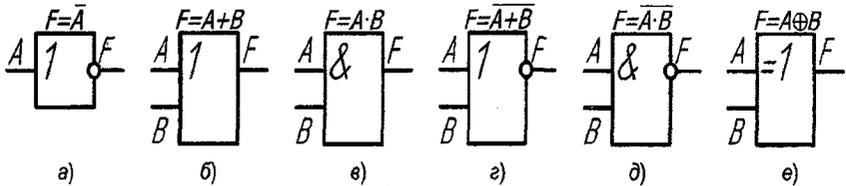


Рисунок 3.2 – Условные обозначения логических элементов:
а – НЕ (инвертор); б – ИЛИ; в – И; г – ИЛИ-НЕ; д – И-НЕ; е – исключающее ИЛИ

Выполняемые логическими элементами соответствующие функции для двух переменных приведены в таблице истинности, которые сведены в табл.3.1.

Логическую функцию "Исключающее ИЛИ" задают таблицей истинности (табл.3.1), из которой следует, что логический "0" на выходе получается не только при $A=B=0$, но и при $A=B=1$. Такие логические элементы используют в схемах цифрового сложения при обнаружении ошибок и поиске необходимого цифрового слова. Для обозначения функции "Исключающее ИЛИ" используют знак "+" обведенный кружком, т.е. $F = A \oplus B$.

Таблица 3.1

A	B	ИЛИ	И	ИЛИ-НЕ	И-НЕ	ИСКЛ. ИЛИ
0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	0	0	1	1
1	1	1	1	0	0	0

Способы задания логических функций

1. Представление функции на словах

Например, функция трех аргументов принимает значение "1", если два любых аргумента или все три равны "1". Во всех других случаях функция равна "0".

2. Табличный способ

При этом способе функция представляется в виде *таблицы истинности*, в которой выписываются все возможные наборы аргументов в порядке возрастания их номеров и для каждого набора устанавливается значение функции "0" или "1". В таблице 3.2 истинности задана та же функция, что и в предыдущем примере, обозначенная F .

Таблица 3.2.

Номер набора	Аргументы			Функция F
	A	B	C	
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

Иногда функцию алгебры логики F задают с помощью десятичного числа, преобразовав которое в двоичную систему, получим столбец F таблицы 3.2:

$$232_{10} = 11101000_2$$

3. Алгебраический способ

От таблицы истинности можно перейти к алгебраической форме функции. В такой форме удобно производить различные преобразования функций, например, с целью минимизации.

Существует две формы представления логических функций:

- совершенная дизъюнктивная нормальная форма (СДНФ);
- совершенная конъюнктивная нормальная форма (СКНФ).

При переходе от таблицы истинности к алгебраическому способу записи функций всегда получаются стандартные формы (СДНФ либо СКНФ).

Для записи функции в виде СДНФ необходимо для каждого набора, на котором функция равна "1", записать произведения всех аргументов, причем, если аргумент в этом наборе принимает значение "0", то записывается его отрицание. Затем производится логическое сложение этих элементарных произведений.

Для записи функции в виде СКНФ необходимо для каждого набора, на котором функция равна "0", составить алгебраическую сумму всех аргументов, причем, если аргумент в этом наборе принимает значение "1", то пишется его отрицание. Затем производится логическое умножение элементарных логических сумм.

На примере таблицы 3.2 рассмотрим запись функции в СДНФ:

$$F(A, B, C) = \bar{A}BC + A\bar{B}C + AB\bar{C} + ABC \quad (3.17)$$

и в СКНФ:

$$F(A, B, C) = (A + B + C) \cdot (A + B + \bar{C}) \cdot (A + \bar{B} + C) \cdot (\bar{A} + B + C) \quad (3.18)$$

Для минимизации логических функций, заданных в СДНФ, пользуются различными методами, самым распространенным из которых является минимизация, основанная на использовании карт Карно (диаграмм Вейча).

Эвристический способ минимизации использует теоремы (законы) алгебры логики, при этом скорость решения зависит во многом от квалификации и опыта специалиста, проводящего минимизацию.

Основные соотношения алгебры логики

- | | | | |
|--------------------|-------------------------|----------------------------|--|
| 1. $A + 0 = A$ | 5. $A \cdot 1 = A$ | 9. $A \cdot \bar{A} = 0$ | 13. $A + B = \overline{\bar{A} \cdot \bar{B}}$ |
| 2. $A + 1 = 1$ | 6. $A \cdot A = A$ | 10. $\bar{\bar{A}} = A$ | 14. $A \cdot B = \overline{\bar{A} + \bar{B}}$ |
| 3. $A + A = A$ | 7. $AB + AC = A(B + C)$ | 11. $A + AB = A$ | |
| 4. $A \cdot 0 = 0$ | 8. $A + \bar{A} = 1$ | 12. $A + \bar{A}B = A + B$ | |

Соотношения 13 и 14 распространяются на любое число переменных и называются правилом де Моргана. Из приведенных выражений следует, что логический элемент ИЛИ-НЕ можно заменить элементом И с инвертированными входными величинами, а логический элемент И-НЕ можно заменить логическим элементом ИЛИ, на входе которого величины A и B заменены на \bar{A} и \bar{B} . Очевидно, возможна и обратная замена.

Из соотношений де Моргана вытекает, что все три логические функции И, ИЛИ, НЕ, можно выполнить, используя только элементы одного типа ИЛИ-НЕ либо И-НЕ. Элемент НЕ получается из упомянутых элементов параллельным соединением всех входов.

Схемы сложных устройств получаются более простыми, когда используются логические элементы разных типов.

Минимизация логических функций с помощью карт Карно

Карты Карно представляют собой прямоугольные таблицы, разделенные горизонтальными и вертикальными линиями на клетки, общее число которых равно 2^n . В каждую клетку карты заносится значение одного минтерма.

Минтермом называют функцию, которая принимает единичное значение при одном из всех возможных наборов аргументов и нулевое при всех прочих наборах. Например, минтермы для двух аргументов A и B равны: $AB \bar{A}B \bar{A}\bar{B} \bar{A}B$.

Карты Карно для двух и трех аргументов представлены соответственно на рис. а, б. Для случая трех переменных имеется восемь возможных комбинаций переменных A , B и C , которые представлены восемью квадратами на карте. В соответствующие квадраты заносятся единицы, отображающие каждый из минтермов логического выражения, записанного в СДНФ; нулевые значения минтермов не обозначаются. Далее ме-

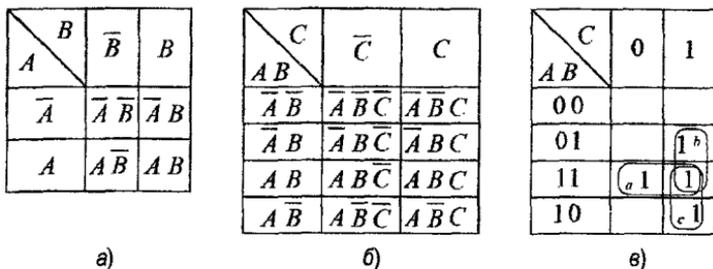


Рисунок 3.3 – Упрощение логических выражений на основе карты Карно

тодом "склеивания" единиц на карте Карно производится минимизация логической функции.

Поясним технику "склеивания" единиц на примере функции алгебры логики (3.17).

Нанесем на карту в соответствующие квадраты четыре единицы, которые соответствуют членам в заданном выражении (3.17). Обведем контуром соседние единицы, придерживаясь следующих правил:

- форма контуров квадратная или прямоугольная;
- в контуре может быть 1, 2, 4, 8 и т.д. единиц (т.е. число единиц кратное 2ⁿ);
- число контуров должно быть минимальным, а их размер – максимальным.

Полученная карта Карно изображена на рис. в. Каждая группа из двух соседних единиц обведена контурами соответственно a , b , c . Контур a , объединяющий две единицы, содержит \bar{C} и C , следовательно, \bar{C} и C можно опустить. Контур b , объединяющий две единицы, содержит \bar{A} и A , следовательно, \bar{A} и A можно опустить. Контур c , объединяющий две единицы, содержит \bar{B} и B , поэтому \bar{B} и B можно опустить. В результате упрощенное с помощью карты Карно логическое выражение (3.17) будет иметь вид

$$F = AB + BC + AC. \quad (3.19)$$

Очевидно, что это упрощенное логическое выражение потребует для своей реализации значительно меньше логических элементов (схем), чем исходное выражение (3.17).

Таким образом, для минимизации логических функций посредством карт Карно можно воспользоваться следующими рекомендациями:

1. Начните с логического выражения, записанного в СДНФ.

2. Нанесите единицы на карту Карно.
3. Объедините соседние единицы контурами, охватывающими два, четыре, восемь квадратов.
4. Проведите упрощения, исключая члены, дополняющие друг друга внутри контуров.
5. Объедините оставшиеся члены (по одному в каждом контуре) функцией ИЛИ.
6. Запишите полученное упрощенное логическое выражение в дизъюнктивной нормальной форме.

Переход к заданному базису логических элементов

Для перехода к базису 2И-НЕ в выражении (3.19) вынесем за скобки переменную A , а затем воспользуемся формулой де Моргана: $\overline{A+B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$.

$$F = A(\overline{B+C}) + BC = A(\overline{B} \cdot \overline{C}) \cdot \overline{BC} \quad (3.20)$$

Аналогично, для перехода к базису 2ИЛИ-НЕ вынесем за скобки в выражении (3.19) переменную A и воспользуемся формулой де Моргана: $\overline{A \cdot B} = \overline{A+B}$.

$$F = \overline{A(B+C)} + \overline{BC} = \overline{A+(B+C)} + \overline{B+C} \quad (3.21)$$

На рис. 3.4 представлены комбинационные схемы минимизированной ФАЛ в базисах 2И-НЕ (рис. 3.4, а) и 2ИЛИ-НЕ (рис. 3.4, б) в соответствии с выражениями (3.20) и (3.21).

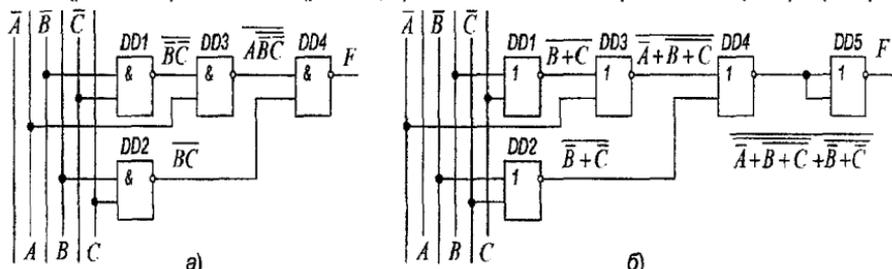


Рисунок 3.4 – Комбинационные схемы ФАЛ (3.17) в различных базисах: 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)

Мультивибраторы на транзисторах

Схема автоколебательного мультивибратора с коллекторно-базовыми связями изображена на рис. 3.5. Этот мультивибратор представляет собой двухкаскадный ключ, выполненный по схеме с общим эмиттером, с ёмкостной связью между каскадами, охваченными положительной обратной связью. Конденсаторы связи C_1 и C_2 вместе с резисторами R_1 и R_2 являются элементами времязадающих цепей. Выходные импульсы снимаются с коллекторов транзисторов $VT1$ и $VT2$.

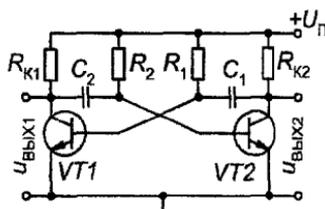


Рисунок 3.5 – Мультивибратор на биполярных транзисторах

Длительность импульсов (время закрытого состояния одного или другого транзистора, т.е. когда на выходе высокий уровень напряжения) определяется временами перезаряда соответствующих конденсаторов и приближённо может быть найдена по следующим формулам:

$$- \text{ на выходе 1 (на коллекторе VT1) } t_{И1} \approx C_1 R_1 \ln \left(2 - (U_{КЭ \text{ нас.}} + U_{БЭ \text{ нас.}}) / U_{П} \right); \quad (3.22)$$

$$- \text{ на выходе 2 (на коллекторе VT2) } t_{И2} \approx C_2 R_2 \ln \left(2 - (U_{КЭ \text{ нас.}} + U_{БЭ \text{ нас.}}) / U_{П} \right), \quad (3.23)$$

где $U_{КЭ \text{ нас.}}$ и $U_{БЭ \text{ нас.}}$ – соответственно напряжение между коллектором и эмиттером и между базой и эмиттером транзистора в режиме насыщения, $U_{БЭ \text{ откр.}}$ – напряжение между базой и эмиттером, при котором открывается эмиттерный переход (для кремниевых транзисторов $U_{КЭ \text{ нас.}} = (0,2 \dots 0,3)$ В; $U_{БЭ \text{ нас.}} = (0,8 \dots 1,2)$ В; $U_{БЭ \text{ откр.}} = (0,5 \dots 0,6)$ В). Данные напряжения приводятся в справочниках или находятся по входным и выходным вольт-амперным характеристикам транзистора.

Период повторения импульсов $T = t_{И1} + t_{И2}$.

$$\text{Сквозность, } s = T / t_{\text{имп.}}, \text{ для выхода 1: } s = T / t_{И1} = 1 + (t_{И2} / t_{И1}). \quad (3.24)$$

Сопротивления $R_{К1}$ и $R_{К2}$, задающие ток коллектора, обычно выбираются одинаковыми (если одинаковые транзисторы) и рассчитываются по формуле

$$R_{К1} = R_{К2} = R_K = (U_{П} - U_{КЭ \text{ нас.}}) / I_{К \text{ нас.}}, \quad (3.25)$$

где $I_{К \text{ нас.}}$ – коллекторный ток транзистора в режиме насыщения.

Для мягкого режима самовозбуждения необходимо предотвращать сильное насыщение транзисторов. С другой стороны, чтобы получить импульс с плоской вершиной и стабильной амплитудой, необходим насыщенный режим работы транзисторов. Для насыщения транзисторов следует выполнить условия

$$\begin{aligned} R_1 &\leq h_{21\beta \text{ min}}^{VT1} R_{К1}; \\ R_2 &\leq h_{21\beta \text{ min}}^{VT2} R_{К2}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

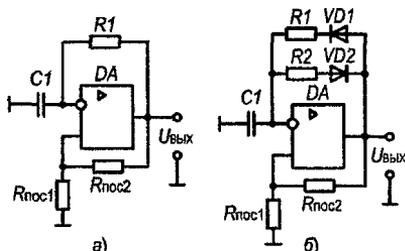
где $h_{21\beta \text{ min}}^{VT1}$ и $h_{21\beta \text{ min}}^{VT2}$ минимальные коэффициенты передачи базового тока транзисторов VT1 и VT2 соответственно. Чтобы удовлетворить приведённым выше противоречивым требованиям, неравенства (3.26) не должны быть сильными. В этом случае транзисторы работают в режиме насыщения, но вблизи границы с активной областью.

Значения ёмкостей конденсаторов связи C_1 и C_2 находят из формул (3.22) и (3.23).

Мультивибраторы на операционном усилителе

Работа мультивибратора на операционном усилителе основана на совместном использовании положительной и отрицательной обратной связи (ПОС и ООС соответственно). При этом ПОС предназначена для обеспечения лавинообразного перехода мультивибратора из одного квазиустойчивого состояния в другое, а цепь ООС – для ограничения длительности квазиустойчивых состояний.

Схема мультивибратора на операционном усилителе показана рис. 3.6, а. Цепь ПОС содержит делитель $R_{ПОС1}$, $R_{ПОС2}$, в цепь ООС входит времязадающая цепь, содержащая резистор R_1 и конденсатор C_1 . Мультивибратор изменяет свои состояния квазиравновесия в моменты времени, когда напряжение на конденсаторе достигает величин $\gamma_{ПОС} U_{ВЫХ\max}$ и $\gamma_{ПОС} U_{ВЫХ\min}$,



а – простейшая схема; б – схема с диодными ключами
Рисунок 3.6 – Мультивибраторы на ОУ

где
$$\gamma_{ПОС} = R_{ПОС1} / (R_{ПОС1} + R_{ПОС2}). \quad (3.27)$$

В остальное время конденсатор перезаряжается через резистор R_1 .

Если выходное напряжение симметрично относительно нулевого уровня, то длительность положительного ($t_{имп.}$) и отрицательного ($t_{пауз.}$) импульсов

$$t_{имп.} = t_{пауз.} = R_1 C_1 \ln(1 + (2R_{ПОС1} / R_{ПОС2})). \quad (3.28)$$

Сквозность $s = 1 + (t_{пауз.} / t_{имп.})$ генерируемых импульсов можно регулировать, если в цепь ООС включить диоды, выполняющие роль ключей, (рис. 3.6, б). В этом случае

$$t_{имп.} = R_1 C_1 \ln(1 + (2R_{ПОС1} / R_{ПОС2})); \quad (3.29)$$

$$t_{пауз.} = R_2 C_1 \ln(1 + (2R_{ПОС1} / R_{ПОС2})). \quad (3.30)$$

Сопrotвления резисторов схемы следует задавать, руководствуясь следующими ограничениями:

— $R_1, R_{ПОС2} \ll U_{ВЫХ\max} / I_{ВХ\text{ ср.}}$; где $U_{ВЫХ\max}$ – максимальное выходное напряжение для данного типа ОУ, $I_{ВХ\text{ ср.}}$ – входной ток этого ОУ (см. Приложение 3);

— $R_{ПОС1} \gg R_{ВЫХ0}$, где $R_{ВЫХ0}$ – выходное сопротивление ОУ;

— $R_{ПОС1} / R_{ПОС2} = 0,1 \dots 1$;

— $2\gamma_{ПОС} U_{ВЫХ\max} < U_{сф.\max}$,

где $U_{сф.\max}$ – максимально допустимое напряжение синфазного сигнала для данного типа ОУ;

— максимальный выходной ток $I_{ВЫХ\max}$ ОУ в схеме не должен превышать максимально допустимого для данного типа ОУ значения $I_{ВЫХ\text{ доп}}^{OV}$, т.е.

$$I_{ВЫХ\max} = I_{C\max} + I_{OC} + I_H < I_{ВЫХ\text{ доп}}^{OV}, \quad (3.31)$$

где $I_{C\max} = (1 + \gamma_{ПОС}) U_{ВЫХ\max} / R_1$; $I_{OC} = U_{ВЫХ\max} / (R_{ПОС1} + R_{ПОС2})$; $I_H = U_{ВЫХ\max} / R_H$.

Ёмкость конденсатора находят из соотношения (3.28) либо (3.29), (3.30).

ПРОГРАММА КУРСА «ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ»

Раздел 1. Электронные приборы

Тема 1. Физические основы полупроводниковой электроники

Свойства полупроводников. Основные материалы полупроводниковой электроники (кремний, германий, арсенид галлия, нитрид галлия). Процессы образования свободных носителей заряда.

Контактные явления в полупроводниках. Физические процессы в электронно-дырочном переходе. Электронно-дырочный переход при подаче внешнего напряжения. Инжекция и экстракция носителей заряда. Особенности несимметричного перехода.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) идеализированного электронно-дырочного перехода. Тепловой ток, его зависимость от ширины запрещенной зоны, концентрации примесей и температуры. Математическая модель и параметры идеализированного р-п-перехода: статическое и дифференциальное сопротивление, барьерная и диффузионная ёмкости перехода, их зависимость от приложенного напряжения. Пробой р-п-перехода. Виды пробоя.

Контакт металл – полупроводник. Выпрямляющий и невыпрямляющий контакты.

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

Тема 2. Полупроводниковые диоды

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

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. Эффект модуляции ширины базы. Токи в транзисторе; коэффициенты передачи тока в схемах с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Физические параметры транзистора: коэффициент передачи тока, дифференциальные сопротивления и ёмкости переходов, объёмные сопротивления областей.

Статические характеристики транзистора. Модель идеализированного транзистора (модель Эберса-Молла). Характеристики реального транзистора в схемах с ОБ и ОЭ. Влияние температуры на характеристики транзистора.

Транзистор как линейный четырехполюсник. T -образные эквивалентные схемы транзисторов. Система h -параметров и схема замещения транзистора. Связь h -параметров с физическими параметрами транзистора.

Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Принцип усиления.

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 высвобождения носителей заряда. Импульсные параметры транзистора.

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

Тема 4. Полевые транзисторы

Полевой транзистор (ПТ) 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.

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

ПТ как линейный четырехполюсник. Система Y -параметров полевых транзисторов и их связь с физическими параметрами. 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.

Сравнение полевых и биполярных транзисторов.

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

Тема 5. Элементы интегральных микросхем

Общие сведения о микроэлектронике. Классификация компонентов электронной аппаратуры и элементов гибридных микросхем. Пассивные дискретные компоненты электронных устройств (резисторы, конденсаторы, индуктивности). Назначение, физические основы работы, параметры, системы обозначения. Пассивные элементы интегральных микросхем: резисторы, конденсаторы. Биполярные транзисторы в интегральном исполнении, транзисторы с барьером Шоттки, многозмиттерные транзисторы. Диоды полупроводниковых интегральных микросхем. Биполярные транзисторы с инжекционным питанием. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС). Применение ПЗС. Параметры элементов ПЗС.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 6. Компоненты оптоэлектроники

Классификация оптоэлектронных полупроводниковых приборов.

Основные типы полупроводниковых излучателей: некогерентные и когерентные. 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 и тиристорные. Классификация, принцип действия, входные и выходные параметры оптронов.

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

Тема 7. Приборы отображения информации

Классификация приборов для отображения информации.

Типы электронно-лучевых приборов. Устройство и принцип действия электронно-лучевых приборов. Системы фокусировки и отклонения в электронно-лучевых трубках.

Полупроводниковые индикаторы.

Жидкокристаллические индикаторы. Основные параметры, характеризующие жидкие кристаллы. Устройство ЖКИ в проходящем и отраженном свете. Возможность отображения цвета в ЖКИ. ЖК мониторы, устройство и их основные параметры.

Вакуумные накаливаемые индикаторы (ВНИ), вакуумные люминесцентные индикаторы (ВЛИ): одноразрядные, многозарядные, сегментные ВЛИ, электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ): устройство и принцип действия.

Газоразрядные индикаторы (ГРИ). Основные положения теории тлеющего разряда с холодным катодом. Дискретные газоразрядные индикаторы. Типы и основные параметры ГРИ. Устройство и принцип действия газоразрядных индикаторных панелей.

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

Раздел 2. Аналоговые устройства

Тема 8. Параметры и характеристики аналоговых устройств

Требования, предъявляемые к аналоговым устройствам. Коэффициенты усиления: по току, напряжению, мощности. Входное и выходное сопротивления усилительных каскадов. Коэффициент полезного действия и выходная мощность каскада усиления. Нелинейные и линейные искажения сигнала и их оценка. Характеристики усилительных устройств: амплитудно-частотная, фазо-частотная, амплитудная и переходная.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 9. Обратная связь и ее влияние на показатели и характеристики усилительных устройств

Принцип и назначение обратной связи в усилительных устройствах. Основные способы обеспечения обратной связи. Влияние обратной связи на основные показатели и характеристики усилительных устройств.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4].

Тема 10. Обеспечение режима работы усилительных элементов по постоянному току

Цели питания, обеспечивающие режим покоя активного элемента в усилительном устройстве: схемы с фиксированным током базы, напряжением база-эмиттер; эмиттерная и коллекторная стабилизация.

Режимы работы усилительных элементов в усилительных каскадах.

Построение нагрузочных характеристик. Определение параметров рабочего режима.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4].

Тема 11. Каскады предварительного усиления

Требования, предъявляемые к каскадам предварительного усиления, и особенности их анализа.

Усилительные каскады с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором, с общим истоком и общим стоком, их принципиальные и эквивалентные схемы.

Эмиттерный и истоковый повторители.

Применение упрощенных эквивалентных схем для анализа каскадов усиления по переменному току. Расчет входного и выходного сопротивлений, коэффициентов усиления по току, напряжению, мощности.

Частотные искажения в области нижних частот и искажения вершины импульса, возникающие в резисторных каскадах усилителей переменного тока вследствие наличия разделительных конденсаторов и конденсаторов в эмиттерной (истоковой) цепи усиленного элемента.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4].

Тема 12. Оконечные каскады

Требования, предъявляемые к оконечным каскадам усиления. Особенности их работы. Однотактные оконечные каскады.

Двухтактные оконечные каскады. Особенности работы и свойства двухтактных каскадов. Бестрансформаторные двухтактные каскады. Применение класса работы активного элемента B и AB . Нелинейные искажения в двухтактных каскадах.

Рекомендуемая литература: [2, 4].

Тема 13. Усилители постоянного тока

Требования, предъявляемые к усилителям постоянного тока. Причины возникновения и способы уменьшения дрейфа нуля. Усилители постоянного тока с преобразованием сигнала. Принципы построения, основные преимущества и недостатки.

Дифференциальный усилительный каскад. Основные свойства и расчет этого каскада. Коэффициент усиления по дифференциальному и синфазному сигналам. Относительное ослабление синфазной составляющей сигнала.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4].

Тема 14. Операционные усилители и их применение для создания устройств аналоговой обработки сигналов

Интегральные операционные усилители (ОУ) и их классификация. Структурная схема ОУ общего применения. Основные параметры и характеристики ОУ.

Инвертирующие и неинвертирующие усилители с точным значением коэффициента усиления.

Устройства, осуществляющие суммирование, вычитание, дифференцирование, интегрирование и другие операции над сигналом.

Активные RC -фильтры и способы их реализации. Реализация активных RC -фильтров с помощью операционных усилителей.

Рекомендуемая литература: [2, 3, 4].

Раздел 3. Цифровые устройства

Тема 15. Электронные ключевые схемы

Ключевой режим работы электронных приборов. Представление об идеальном ключевом элементе. Параметры неидеальности ключевого элемента: остаточные статические параметры, время включения и выключения.

Одновходовый транзисторный ключ с общим эмиттером: статические режимы, переходные процессы, быстродействие, методы повышения быстродействия.

Ключи на полевых транзисторах. Ключи на комплементарных транзисторах. Сравнительные характеристики ключей с нелинейной, квазилинейной и активной нагрузкой. Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 16. Цифровые логические устройства

Реализация логических функций с помощью электронных схем. Свойство двойственности логических элементов. Одноступенчатая и двухступенчатая логики. Логические элементы и их классификация. Базовые логические элементы цифровых интегральных микросхем. Диодно-транзисторная логика; транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ). Микросхемы ТТЛ серий с открытым коллектором и правила их схемного включения. Эмиттерно-связанная логика. Интегральная инжекционная логика. Логические элементы на МДП-транзисторах. Параметры цифровых интегральных логических схем.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 17. Триггеры

Принципы построения устройства с двумя статическими состояниями устойчивого равновесия на логических элементах, основные области их использования.

Классификация триггеров по функциональному признаку (синхронные, асинхронные), условные обозначения. Динамические, установочные и управляющие входы асинхронного триггера. Особенности использования в цифровых устройствах синхронных триггеров без внутренней задержки, с внутренней задержкой и динамическим тактовым входом.

Триггеры на логических элементах: с установочными входами (асинхронный RS -триггер, синхронный RS -триггер, D -триггер, T -триггер, MS -триггер, JK -триггер). Параметры триггеров.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 18. Мультивибраторы

Ждущие и самовозбуждающиеся мультивибраторы на аналоговых и логических интегральных схемах: принцип действия, разновидности схемной реализации, условия работоспособности и основные характеристики.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 19. Цифро-аналоговые устройства

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Коммутируемые делители напряжения и тока, их основные характеристики, особенности интегрального исполнения. Параметры ЦАП.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Тема 20. Аналого-цифровые устройства

Амплитудные компараторы. Безгистерезисные асинхронные компараторы. Интегральные компараторы. Регенеративные асинхронные компараторы (формирующие триггеры). Синхронные компараторы.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Их классификация по областям применения. Параметры АЦП.

Устройства выборки и хранения информации.

Рекомендуемая литература: [3, 4].

Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Булычев, А.Л. Электронные приборы / А.Л. Булычев, П.М. Лямин, Е.С. Тулинов.– Минск: Выш. шк., 1999. – 414 с.
2. Валенко, В.С. Электроника и микросхемотехника / В.С. Валенко, М.С. Хандогин. – Минск: Беларусь, 2000. – 325 с.
3. Ткаченко, Ф.А. Техническая электроника / Ф.А. Ткаченко. – Минск: Дизайн ПРО, 2000. – 351 с.
4. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г.Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2004. – 622 с.

Дополнительная литература

5. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин.– СПб.: Лань, 2003. – 480 с.
6. Жеребцов, И.П. Основы электроники / И.П. Жеребцов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
7. Опадчий, Н.Ф. Аналоговая и цифровая электроника / Н.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая Линия - Телеком, 1999. – 768 с.
8. 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.
9. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы: Справочник / В.И.Галкин, А. Л. Булычев, В. А. Прохоренко – Мн.: Беларусь, 1987. – 285 с.
10. Алексеев, А.Г. Операционные усилители и их применение / А.Г. Алексеев, Г.В. Войшвилло. – М.: Радио и связь, 1989. – 120 с.

Контрольные вопросы

1. Электропроводность полупроводников. Генерация, рекомбинация носителей зарядов.
2. Электронно-дырочный переход при подаче внешнего напряжения. Вольт-амперная характеристика идеализированного электронно-дырочного перехода. Параметры.
3. Отличие реального полупроводникового диода от идеального.
4. Специальные типы полупроводниковых диодов.
5. Математическая модель (уравнение Эберса – Молла) идеального и реального диода. Эквивалентные модели 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. Анализ параметров биполярных транзисторов для различных схем включения.
11. Малосигнальные T -образные эквивалентные схемы биполярного транзистора в физических параметрах.
12. Малосигнальные эквивалентные схемы биполярного транзистора в h -параметрах.
13. Связь h -параметров с физическими параметрами транзистора.
14. Работа транзистора с нагрузкой. Построение нагрузочной прямой. Принцип усиления.
15. Особенности работы биполярного транзистора на высоких частотах. Предельная и граничная частоты, эквивалентная схема транзистора на высоких частотах.
16. Работа транзистора в импульсном режиме. Импульсные параметры транзистора.
17. Полевые транзисторы с $p-n$ -переходом: устройство; принцип действия; вольт-амперные характеристики; параметры.
18. Полевые транзисторы с изолированным затвором: устройство; принцип действия; вольт-амперные характеристики; параметры.
19. Малосигнальные эквивалентные схемы полевого транзистора с $p-n$ -переходом. Математическая модель.
20. Малосигнальные эквивалентные схемы полевого транзистора с изолированным затвором. Математическая модель.
21. Система Y -параметров полевых транзисторов и их связь с физическими параметрами.

22. Работа полевого транзистора на высоких частотах и в импульсном режиме. Предельная частота. Эквивалентная схема на высоких частотах.

23. Пассивные дискретные компоненты электронных устройств. Пассивные элементы интегральных микросхем.

24. Биполярные транзисторы в интегральном исполнении. Диоды интегральных микросхем.

25. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС). Применение ПЗС.

26. Основные типы полупроводниковых излучателей. Светодиоды, устройство, принцип действия, характеристики, параметры.

27. Полупроводниковые приемники излучения. Принцип действия, характеристики, параметры.

28. Электровакуумные индикаторные приборы. Электронно-лучевые трубки.

29. Газоразрядные индикаторные приборы.

30. Полупроводниковые и жидкокристаллические индикаторы.

31. Электронные усилители: структурная схема; классификация; параметры и характеристики; виды искажений.

32. Обратные связи (ОС): структурная схема; определение; виды ОС; способы получения и введения сигнала ОС.

33. Обратные связи (ОС): влияние ОС на параметры усилителя.

34. Способы задания начальной рабочей точки в усилительных каскадах на биполярных транзисторах: схемы с фиксированным током базы и с фиксированным напряжением база-эмиттер (расчёт).

35. Схема эмиттерной стабилизации (принцип действия, расчёт).

36. Схема коллекторной стабилизации (принцип действия, расчёт).

37. Способы задания начальной рабочей точки в усилительных каскадах на полевых транзисторах с управляющим $p-n$ -переходом (расчёт).

38. Способы задания начальной рабочей точки в усилительных каскадах на полевых транзисторах с изолированным затвором (расчёт).

39. Режимы работы (классы усиления) усилительных элементов в усилительных каскадах.

40. Типовая схема усилительного каскада с общим эмиттером. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

41. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим эмиттером; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.

42. Типовая схема усилительного каскада с общей базой. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

43. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общей базой; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.

44. Типовая схема усилительного каскада с общим коллектором. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

45. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим коллектором; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.

46. Схема фазоинверсного усилительного каскада. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

47. Эквивалентная малосигнальная схема фазоинверсного усилительного каскада; входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по току и напряжению.

48. Типовая схема усилительного каскада с общим истоком. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

49. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим истоком; входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления по напряжению.

50. Типовая схема усилительного каскада с общим стоком. Назначение всех элементов, расчёт по постоянному току.

51. Эквивалентная малосигнальная схема усилительного каскада с общим стоком; входное и выходное сопротивления, коэффициент усиления по напряжению.

52. Однотактные оконечные каскады класса A : трансформаторные, бестрансформаторные.

53. Двухтактные оконечные каскады классов B и AB с транзисторами одного типа проводимости.

54. Двухтактные оконечные каскады классов B и AB на комплементарных транзисторах.

55. Усилители постоянного тока (УПТ). Назначение и особенности. Дрейф нуля в УПТ и методы его устранения. Типы УПТ.

56. Дифференциальный усилительный каскад на биполярных транзисторах. Принцип действия. Параметры.

57. Интегральный операционный усилитель (ОУ): структурная схема, параметры, характеристики, классификация.

58. Инвертирующее включение операционного усилителя. Расчёт параметров.

59. Неинвертирующее включение операционного усилителя. Расчёт параметров.

60. Дифференциальный усилительный каскад на базе ОУ.

61. Сумматор на базе ОУ.

62. Интегратор на базе ОУ.

63. Дифференциатор на базе ОУ.

64. Активные фильтры низкой частоты. Расчёт.

65. Активные фильтры высокой частоты. Расчёт.

66. Активный полосовой фильтр с инвертирующим включением ОУ. Расчёт.

67. Активный полосовой фильтр с использованием цепей минимального типа. Принцип действия.

68. Активный полосовой фильтр с использованием цепей максимального типа.
Принцип действия.

69. Ключевой режим работы биполярного транзистора. Способы повышения быстродействия.

70. Переключатели тока.

71. Ключевой режим работы полевого транзистора. Виды ключей на полевых транзисторах.

72. Реализация логических функций с помощью электронных схем.

73. Одноступенчатая и двухступенчатая логики.

74. Логические элементы (ЛЭ) и их классификация.

75. Базовые ЛЭ цифровых интегральных микросхем: диодно-транзисторная логика.

76. Базовые ЛЭ цифровых интегральных микросхем: транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ(Ш)).

77. Микросхемы ТТЛ(Ш) серий с открытым коллектором и правила их схемного включения.

78. Эмиттерно-связанная логика. Интегральная инжекционная логика.

79. Базовые ЛЭ цифровых интегральных микросхем: на МДП-транзисторах (МОПТЛ, КМОПТЛ).

80. Принципы построения устройства с двумя статическими состояниями устойчивого равновесия на логических элементах, основные области их использования.

81. Классификация триггеров по функциональному признаку, условные обозначения.
Виды входов триггеров.

82. Асинхронный *RS*-триггер, синхронный *RS*-триггер.

83. *D*-триггер, *T*-триггер.

84. *MS*-триггер, *JK*-триггер.

85. Мультивибратор на биполярных транзисторах.

86. Мультивибратор на операционном усилителе.

87. Мультивибратор на логических элементах.

88. Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП). Параметры ЦАП.

89. Аналоговые компараторы напряжения.

90. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Их классификация по областям применения. Параметры АЦП.

Приложение 1. Параметры некоторых биполярных транзисторов

Транзистор	$h_{21\beta}$	$U_{КЭ}^{доп. \text{ max'}}$ В	$I_{К}^{доп. \text{ max'}}$ мА	$P_{К}^{доп. \text{ max'}}$ мВт	$I_{КБЭ}$ 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	$\frac{U_{н\text{т.ог.}}}{U_{н\text{т.ог.}}}$ В	$U_{сн\text{т.ог.}}$ В	$I_{с\text{т.ог.}}$ мА	$P_{с\text{т.ог.}}$ 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	100	ПТУП с каналом n -типа
КП312Б	2...5	- (0,8...6)	+ 25	$\leq 1,5$	100	ПТУП с каналом n -типа

Приложение 3. Параметры некоторых операционных усилителей

Тип ОУ	K_{U0}	$R_{вх0}$, МОм	$\pm U_{вх}^{max}$ В	$U_{см}$, мВ	$I_{вх. ср.}$, нА	$\Delta U_{вх}$, нА	$K_{ос. сф}$, дБ	$U_{сф}^{max}$, В	$I_{OУ}^{OУ}$ выск. 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	35 000	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
154УД4	10 000	1	10	5	1 500	500	70	10	5

Продолжение приложения 3

Тип ОУ	$K_{t/0}$	$R_{вх.0}$, МОм	$\pm U_{вых}^{max}$ В	$U_{см.}$ мВ	$I_{вх. ср.}$ нА	$\Delta I_{вх.}$ нА	$K_{ос. сф.}$ дБ	$U_{сф.}^{max}$ В	$I_{ов. вып. доп.}$ мА
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
KM551УД2А	5 000	0,5	11,5	5	400	200	60	4	6
KM551УД2Б	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
KP1408УД1	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).

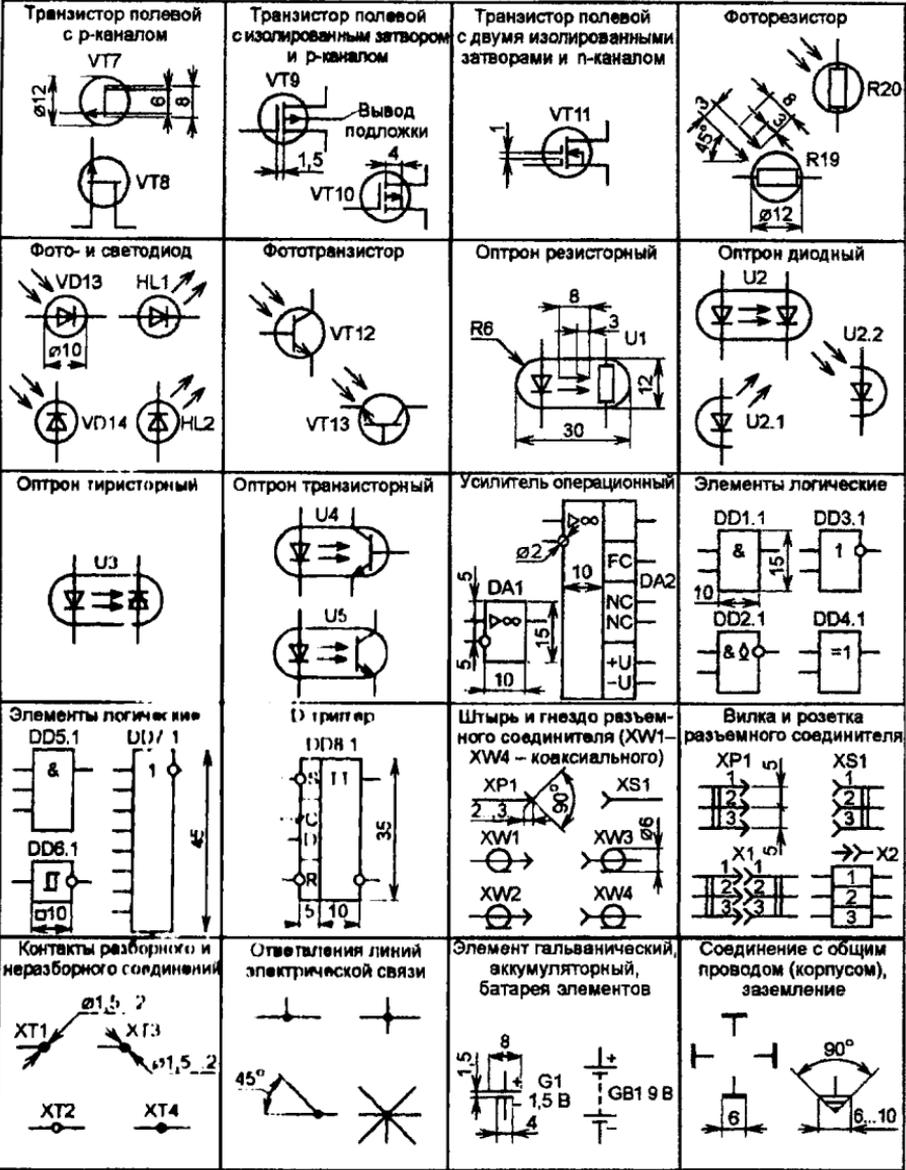
Выбор того или иного номинального значения обусловлен местом включения резистора или конденсатора в схему электронного устройства. Как правило, если резисторы включены последовательно (например, в делителе напряжения), то значения их сопротивлений принимают либо большими, либо меньшими одновременно.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

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Задания к контрольной работе	4
Общие требования к оформлению контрольной работы	5
Методические указания к выполнению контрольной работы	5
Задание 1. Расчёт усилительных каскадов на транзисторах	6
Расчёт по постоянному току УК на биполярных транзисторах	6
Расчёт параметров УК на БТ по переменному току	10
Расчёт по постоянному току УК на полевых транзисторах	12
Расчёт параметров УК на ПТ по переменному току	16
Расчёт ёмкостей конденсаторов	18
Задание 2. Расчёт схем на операционных усилителях	19
Инвертирующий усилитель	20
Неинвертирующий усилитель	21
Дифференциальный усилитель (вычитатель)	22
Сумматор	22
Активные фильтры с инвертирующим включением ОУ	23
Активные фильтры с неинвертирующим включением ОУ	24
Задание 3. Расчёт цифровых устройств	25
Транзисторные ключи	25
Комбинационные устройства	26
Мультивибраторы на транзисторах	31
Мультивибраторы на операционном усилителе	32
Программа курса «Электронные приборы»	34
Раздел 1. Электронные приборы	34
Раздел 2. Аналоговые устройства	36
Раздел 3. Цифровые устройства	37
Рекомендуемая литература	39
Контрольные вопросы	40
Приложение 1. Параметры некоторых биполярных транзисторов	44
Приложение 2. Параметры некоторых полевых транзисторов	45
Приложение 3. Параметры некоторых операционных усилителей	46
Приложение 4. Ряд E24 номинальных значений сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов	48
Приложение 5. Условные графические обозначения в схемах	50

Приложение 5. Условные графические обозначения в схемах

<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор постоянный</p>	<p>Резистор переменный</p>	<p>Резистор переменный сдвоенный</p>
<p>Резистор подстроечный</p>	<p>Резисторы нелинейные: терморезистор и варистор</p>	<p>Конденсатор постоянной емкости</p>	<p>Конденсаторы оксидные полярный и неполярный</p>
<p>Конденсатор подстроечный</p>	<p>Конденсатор переменной емкости (КТЕ)</p>	<p>Катушка индуктивности, дроссель (L3 – с отводами)</p>	<p>Катушка, дроссель с магнитопроводом (L7 – с медным)</p>
<p>Трансформатор с тремя обмотками и электроста- тическим экраном</p>	<p>Диод, диодный мост</p>	<p>Стабилитрон (VD8 – двуханодный)</p>	<p>Диод Шоттки (VD9), ограничительный (VD10), варикап (VD11)</p>
<p>Динистор (VS1), тринистор (VS2, VS3), симистор (VS4)</p>	<p>Транзистор p-n-p</p>	<p>Транзистор n-p-n</p>	<p>Транзистор однопереходный</p>



Учебное издание

Составитель:
Смаль Александр Сергеевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

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

Ответственный за выпуск: Смаль А.С.
Редактор: Боровикова Е.А.
Корректор: Никитчик Е.В.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П., Боровикова Е.А.

Подписано к печати 7.05.2013 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Снегурочка».
Уч. изд. л. 3,25. Усл.п.л. 3,0. Тираж 100 экз. Заказ № 1409.
Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.