

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
“БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению контрольных работ*  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»  
*для студентов специальности*  
**1 – 36 01 01 «Технология машиностроения»**  
*заочной формы обучения*

Брест 2015

В методических указаниях к выполнению контрольных работ по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника» 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 «Электроника и микропроцессорная техника», список рекомендуемой литературы и контрольные вопросы по всем разделам изучаемого курса.

Методические указания предназначены для студентов специальности 1–36 01 01 «Технология машиностроения» заочной формы обучения.

Составители: И.М. Панасюк, старший преподаватель,  
А.С. Смаль, старший преподаватель.

Рецензент: В.Н. Щепёрка, к.т.н., доцент, преподаватель высшей категории  
Брестского государственного политехнического колледжа филиала  
УО "Брестский государственный технический университет".

## Введение

Методические указания написаны в соответствии с программой курса «Электроника и микропроцессорная техника» для специальности 1–36 01 01 «Технология машиностроения».

### Цель преподавания дисциплины

Целью изучения дисциплины является формирование знаний у инженеров в области электроники и микропроцессорной техники для эффективного выбора необходимых электронных устройств и микропроцессорной техники, умения их правильно эксплуатировать и составлять совместно с инженерами-электриками технические задания на разработку автоматизированных систем управления производственными процессами.

### Задачи изучения дисциплины

Задача курса «Электроника и микропроцессорная техника» – дать будущему инженеру необходимые знания, позволяющие участвовать в работе по монтажу, наладке и эксплуатации электронных устройств в контакте со специалистами в области промышленной электроники.

### Студент должен знать:

- электротехнические законы;
- принципы действия, конструкции, свойства основных полупроводниковых приборов, усилительных, импульсных, логических, цифровых, преобразовательных устройств и микропроцессорной техники;
- потенциальные возможности электронных устройств и области их применения в электротехнических, электромеханических, энергетических и электронных установках;
- методы анализа электронных цепей.

### Студент должен уметь:

- учитывать влияние параметров полупроводниковых приборов на работу электронных устройств;
- анализировать структурные, электрические схемы электронных, микропроцессорных систем, их назначения и функции отдельных элементов схем;
- квалифицированно формулировать задания на разработку электронной аппаратуры и оценивать ее совместимость с другими устройствами;
- оценивать технико-экономическую эффективность применения электронных устройств;
- определять их основные параметры, проводить измерения.

### Перечень дисциплин, знание которых необходимо для изучения курса

Учебный материал дисциплины базируется на знаниях студента, полученных при изучении дисциплин: «Высшая математика», «Физика», «Электротехника, электрические машины и аппараты».

## 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 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 заданного усилительного каскада и рассчитать его параметры по переменному току: входное и выходное сопротивления, коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности, к.п.д. (внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_r$  считать равным 0);

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  $q_{\text{нас}}$ :

- рассчитать номинальные значения сопротивлений резисторов;
- рассчитать времена включения и выключения ключа и его максимальную рабочую частоту;
- рассчитать среднюю потребляемую мощность ключа.

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

#### Задача 3.2. Синтез комбинационного устройства:

- составить таблицу истинности для заданной функции алгебры логики (ФАЛ) 4-х переменных ( $A, B, C, D$ );
- записать совершенную дизъюнктивную нормальную форму для заданной ФАЛ;
- минимизировать полученное выражение с помощью карт Карно;
- 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  $I_{K \text{ max}}$  равным  $0,2 I_{K \text{ max доп.}}$ .

#### 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

- 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.
- 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.
- 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.
- Для каждой схемы необходимо пояснить назначение всех входящих в неё элементов.
- Должны быть приведены необходимые для решения задачи характеристики и параметры транзисторов и микросхем с указанием использованных справочников.
- Решения должны содержать подробные пояснения, расчетные формулы, необходимые графики.
- Значения сопротивлений резисторов и ёмкостей конденсаторов должны соответствовать стандартному ряду номинальных значений E24 (см. Приложение 4).
- На последней странице указывается список использованной в работе литературы, ставится дата окончания работы и подпись.
- 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 «Электроника и микропроцессорная техника». 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  $P_{ВЫХ}$ , 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:

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

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).

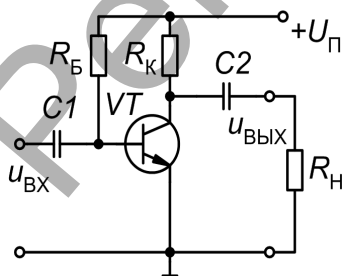


Рисунок 1.1 – Схема УК с ОЭ с фиксированным током базы

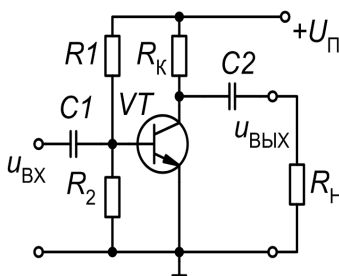


Рисунок 1.2 – Схема УК с ОЭ с фиксированным напряжением база-эмиттер

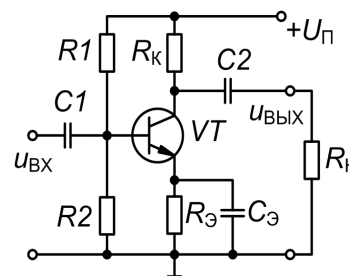


Рисунок 1.3 – Схема УК с ОЭ с эмиттерной стабилизацией

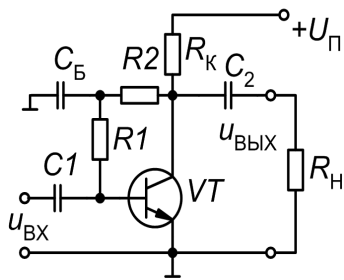


Рисунок 1.4 – Схема УК с ОЭ с коллекторной стабилизацией

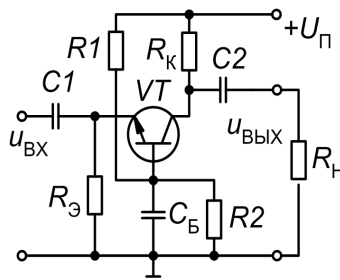


Рисунок 1.5 – Схема УК с ОБ

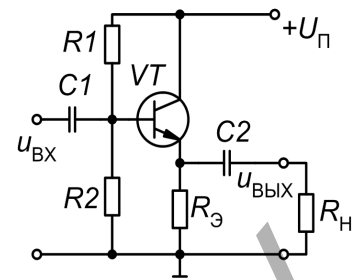


Рисунок 1.6 – Схема УК с ОК

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  $C1$  и  $C2$  служат для предотвращения попадания постоянного тока по цепи от источника питания в цепь источника сигнала и в нагрузку.

В усилительных каскадах на биполярных транзисторах сопротивление резистора  $R_K$  (или  $R_э$  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 резистор  $R_K$  (резистор  $R_э$  для схемы с ОК (рис. 1.6)) и нагрузка  $R_H$  оказываются включёнными параллельно, то

$$I_{Km} = \frac{U_{Hm}}{R_K \parallel R_H} \text{ (или } I_{эм} = \frac{U_{Hm}}{R_э \parallel R_H} \text{ для схемы (рис. 1.6)),} \quad (1.4)$$

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  $I_{K0} = (1,2 \dots 1,4) I_{Km} ; \quad (1.5)$

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

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

Здесь  $U_{Kэ\min}$  – напряжение, соответствующее работе транзистора в режиме насыщения, для маломощных транзисторов  $U_{Kэ\min} = (0,5 \dots 1,0) В$  и  $(1 \dots 2) В$  для мощных. При задании напряжения питания следует округлять полученное значение до большего це-

лого 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  $R_{\text{Э}}$  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)

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

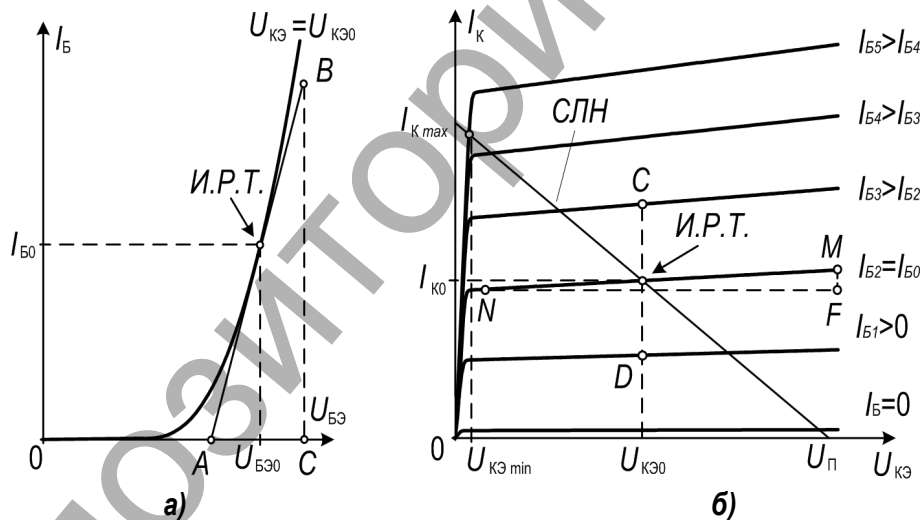
а для схем на рис. 1.3, 1.5 используют формулу

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

где принимают

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

Далее на семействе выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора отмечают исходную рабочую точку (И.Р.Т.) с координатами  $(U_{KЭ0}; I_{K0})$  и находят ток базы покоя  $I_{B0}$  (рис. 1.7, б). Если И.Р.Т. не попадает ни на одну из показанных на графике выходных характеристик, применяют метод интерполяции, используя две ближайшие к И.Р.Т. характеристики. На входной ВАХ отмечают И.Р.Т. в соответствии с найденным значением  $I_{B0}$  и определяют напряжение база-эмиттер покоя  $U_{BЭ0}$  (рис. 1.7, а). Затем определяют максимальный ток коллектора  $I_{K \text{ max}}$ , для этого на выходных ВАХ по двум точкам  $(U_{\text{П}}; 0)$  и  $(U_{KЭ0}; I_{K0})$  строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.7, б).



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

После выбора режима покоя необходимо проверить выполнение условий

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

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

Требуемые значения токов покоя  $I_{K0}$ ,  $I_{B0}$  и напряжений  $U_{KЭ0}$ ,  $U_{BЭ0}$  обеспечивают с помощью источника питания и резисторов цепей смещения. На практике получили распространение два способа обеспечения заданного положения рабочей точки бипо-



лярного 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 на резисторах  $R1$ ,  $R2$ . Номинальные значения сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$  определяют по формулам:

$$R1 = \frac{U_{II} - U_{БЭ0}}{I_D + I_{B0}}; \quad R2 = \frac{U_{БЭ0}}{I_D}, \quad (1.13)$$

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) 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  $R1$ ,  $R2$  к коллектору транзистора  $VT$ . Для устранения ООС по переменному току резистор  $R_Э$  шунтируют конденсатором  $C_Э$ , а резисторы  $R1$ ,  $R2$  – конденсатором  $C_B$ .

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

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

$$R1 = \frac{U_{II} - U_B}{I_D + I_{B0}}; \quad R2 = \frac{U_B}{I_D}, \quad (1.16)$$

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

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

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

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

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

$$R_1 + R_2 = (U_{KЭ0} - U_{БЭ0}) / I_{Б0}; \quad R_2 = (0,9 \dots 1,5) R_1. \quad (1.20)$$

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.

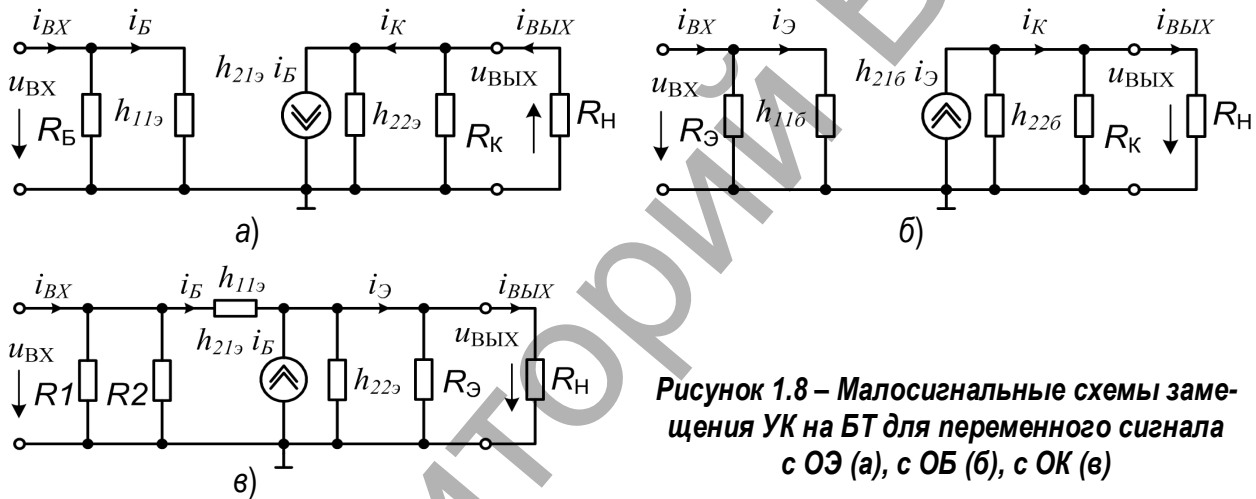


Рисунок 1.8 – Малосигнальные схемы замещения УК на БТ для переменного сигнала с ОЭ (а), с ОБ (б), с ОК (в)

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 каскадов с ОЭ (рис. 1.2–1.3) резистор  $R_B$  следует заменять на параллельно соединённые резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  (так, как показано на рис. 1.8, в).

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

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

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

а резистор  $R_K$  – 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):

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

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

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

При расчёте параметров какой-либо из схем усилительных каскадов с общим эмиттером, показанных на рис. 1.2 – 1.4 (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):

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

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

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

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

$$\text{входное сопротивление} \quad R_{BX} = R1 \parallel R2 \parallel (h_{11э} + (1 + h_{21э}) R_{эКВ.}); \quad (1.30)$$

$$\text{выходное сопротивление} \quad R_{BЫX} = R_э \parallel \left( \frac{R1 \parallel R2 \parallel R_Г + h_{11э}}{1 + h_{21э}} \right) \parallel \left( \frac{1}{h_{22э}} \right); \quad (1.31)$$

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

где  $R_{эКВ.} = R_э \parallel R_H \parallel (1/h_{22э})$ ;  $R_Г$  – внутреннее сопротивление источника сигнала.

Для всех схем усилительных каскадов:

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

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

$$\text{к.п.д.} \quad \eta = \frac{P_H}{P_{II}} = \frac{U_{Hm}^2 / (2R_H)}{U_{II} (I_{K0} + I_{B0} + I_D)} \quad (\text{для схем на рис.1.1 и 1.4 } I_D = 0). \quad (1.35)$$

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 [12, 17]), 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  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$  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

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} = \frac{MF}{FN} = \frac{I_{KM} - I_{KF}}{U_{KЭF} - U_{KЭN}}. \quad (1.36)$$

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

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} = \frac{I_{KC} - I_{KD}}{I_{B3} - I_{B1}}. \quad (1.37)$$

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

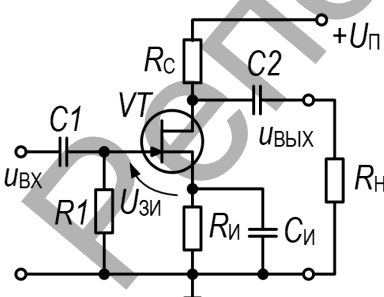
$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{CA}{BC} = \frac{U_{БЭC} - U_{БЭA}}{I_{BB} - I_{BC}}. \quad (1.38)$$

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

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

### Расчёт по постоянному току УК на полевых транзисторах

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



а) б)

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

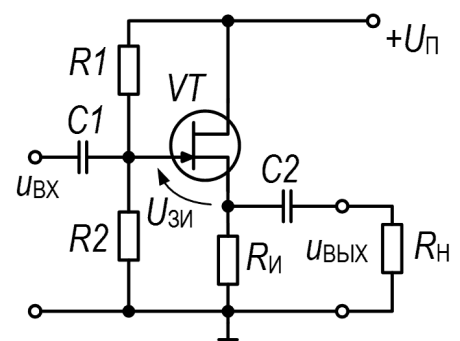
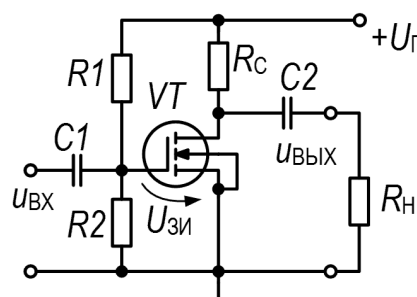


Рисунок 1.10 – Схема УК с ОС

В этих каскадах транзистор  $VT$  совместно с резистором  $R_c$  (или  $R_{И}$  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  $C1$  и  $C2$  служат соответственно для предотвращения проникновения постоянной составляющей сигнала на затвор транзистора и на выход усилительного каскада.

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

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

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

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

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

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

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

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

После определения максимального амплитудного значения тока стока задают:

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

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

где  $U_{СИ\text{min}}$  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):

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

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

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

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

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

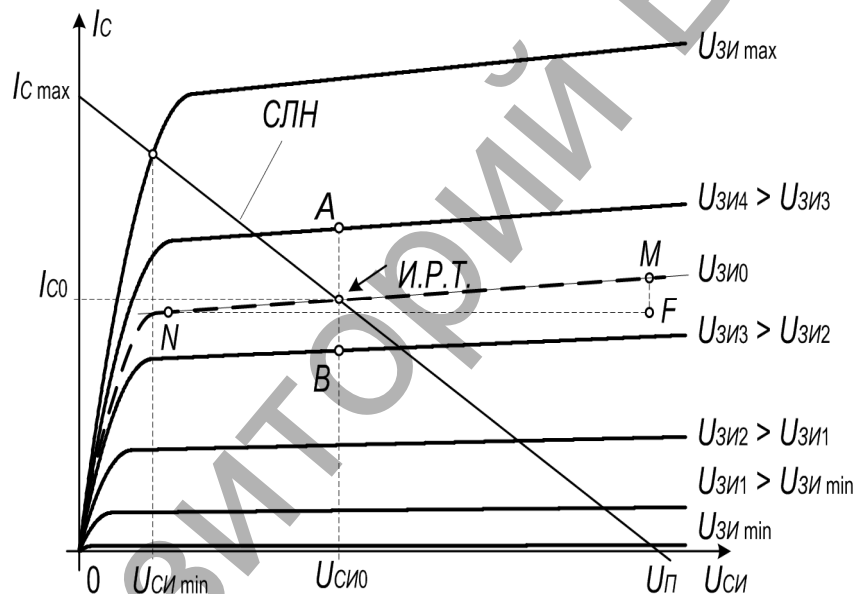
После задания напряжения питания уточняют напряжение сток–исток покоя для схемы УК с ОИ на ПТУП

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

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



**Рисунок 1.11 – Выходные вольт-амперные характеристики полевого транзистора**

$(U_{СИ0}; I_{C0})$  строят статическую линию нагрузки (СЛН) до пересечения её с осью токов (рис. 1.11).

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.

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  $R1$ ,  $R_{И}$  и источника питания  $U_{И}$ . 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  $R1$  обеспечивает связь затвора с общим проводом, то при бесконечно малом входном токе  $I_3$  можно считать  $U_3 \approx 0$ . Поэтому

$$U_{зИ0} \approx -I_{C0}R_{И}. \quad (1.52)$$

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  $X_{Cи} \ll R_{И}$ .

Таким образом, из выражения (1.52) следует, что

$$R_{И} = \frac{|U_{зИ0}|}{I_{C0}}. \quad (1.53)$$

Сопротивление резистора  $R1$  принимают  $R1 = (10...100) \text{ кОм.} \quad (1.54)$

В схеме на рис. 1.9, б режим по постоянному току задаётся с помощью резисторов  $R1$ ,  $R2$  и источника питания  $U_{И}$ . 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  $U_3$  (потенциал истока равен нулю), который определяется по формуле

$$U_3 = U_{И} \frac{R2}{R1 + R2}. \quad (1.56)$$

Задавая значением  $R1 \parallel R2 = (0,1...10) \text{ МОм,} \quad (1.57)$

из выражений (1.55) – (1.57) находим

$$R1 = \frac{U_{И}}{U_{зИ0}} \times (0,1...10) \text{ МОм;} \quad (1.58)$$

$$R2 = \frac{U_{зи0}}{U_{п} - U_{зи0}} R1. \quad (1.59)$$

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

$$U_{зи0} = U_3 - U_{и} = U_3 - I_{с0} R_{и}. \quad (1.60)$$

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

$$R1 = \frac{U_{п}}{I_{с0} R_{и} - |U_{зи0}|} \times (10 \dots 100) \text{ кОм}; \quad (1.61)$$

$$R2 = \frac{U_3}{U_{п} - U_3} R1, \text{ где } U_3 = I_{с0} R_{и} - |U_{зи0}|; \quad (1.62)$$

для УК на ПТИЗ

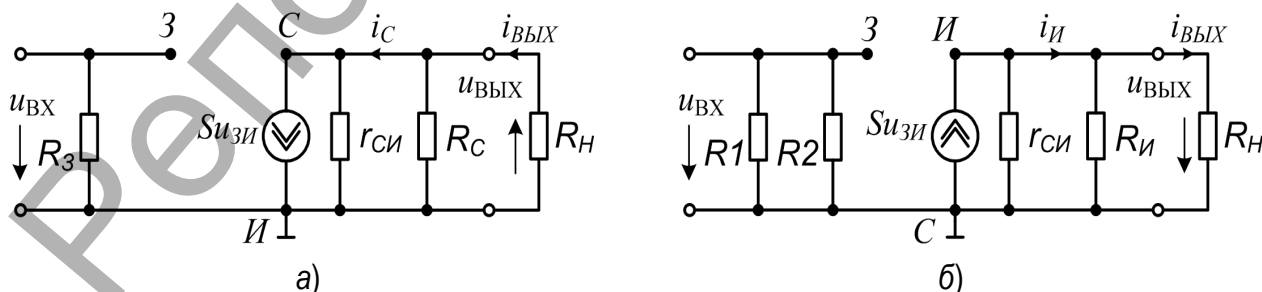
$$R1 = \frac{U_{п}}{I_{с0} R_{и} + U_{зи0}} \times (0,1 \dots 10) \text{ МОм}; \quad (1.63)$$

$$R2 = \frac{U_3}{U_{п} - U_3} R1, \text{ где } U_3 = I_{с0} R_{и} + U_{зи0}. \quad (1.64)$$

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

### Расчёт параметров УК на ПТ по переменному току

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



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

На рис. 1.12, а представлена обобщённая малосигнальная схема замещения по переменному сигналу схем УК с ОИ, показанных на рис. 1.9. Для схемы на ПТУП (рис. 1.9, а) резистор  $R_3$  следует заменить резистором  $R1$ , а в схеме на ПТИЗ



(рис. 1.9, б) резистор  $R_3$  следует заменить параллельно соединёнными резисторами  $R1, R2$  (как показано на рис. 1.12, б). Соответственно для схем с ПТУП и ПТИЗ

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

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

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

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

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  $R_{BX} = R1 \parallel R2; \quad (1.70)$

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  $K_I = K_U \frac{R_{BX}}{R_H}. \quad (1.73)$

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

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

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  $r_{СИ}$  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

$$r_{СИ} = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} = \frac{FN}{MF} = \frac{U_{СИ_F} - U_{СИ_N}}{I_{C_M} - I_{C_F}}. \quad (1.76)$$

Чтобы найти крутизну  $S$ , используют значения токов стока в точках  $A$ ,  $B$  и соответствующих значений напряжений затвор – исток  $U_{ЗИ4}$  и  $U_{ЗИ3}$ :

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{ЗИ}} = \frac{I_{C_A} - I_{C_B}}{U_{ЗИ4} - U_{ЗИ3}}. \quad (1.77)$$

### 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:

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

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

где  $f_{н.гр.}$  – нижняя граничная частота усиливаемого сигнала;  $R_{Г}$  – внутреннее сопротивление источника сигнала.

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

$$C_{Э} = \frac{10...50}{2\pi f_{н.гр.} R_{Э}}; \quad (1.79)$$

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

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

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

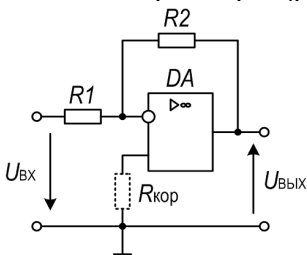
$$C_{И} = \frac{10...50}{2\pi f_{н.гр.} R_{И}}. \quad (1.81)$$

## Задание 2. Расчёт схем на операционных усилителях

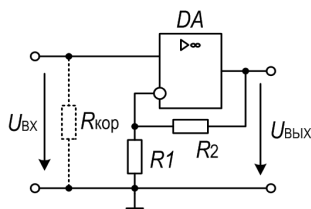
Операционный усилитель (ОУ) – многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

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  $180^\circ$  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.

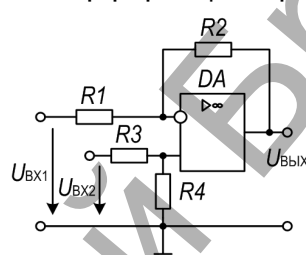
ОУ выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники, на основе которого можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители (рис.2.1, 2.2), сумматоры (рис.2.3, 2.4), активные фильтры (рис.2.5, 2.6), интеграторы, дифференциаторы, генераторы и др.



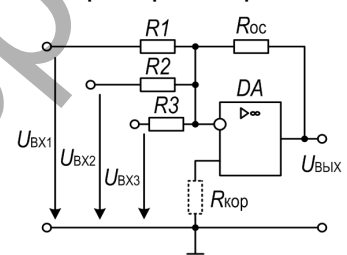
**Рисунок 2.1– Инвертирующий усилитель на ОУ**



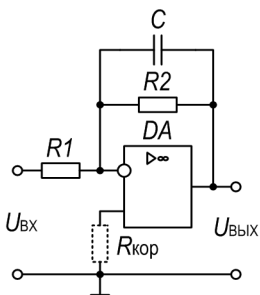
**Рисунок 2.2 – Неинвертирующий усилитель на ОУ**



**Рисунок 2.3 – Дифференциальный усилитель**

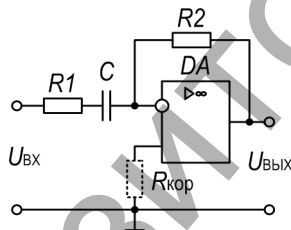


**Рисунок 2.4 – Инвертирующий сумматор**

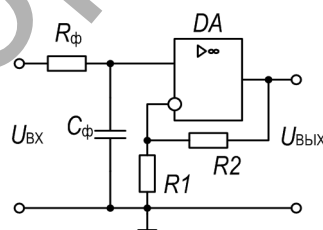


а)

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

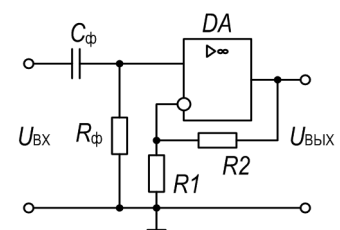


б)



а)

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



б)

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  $K_{U0}$  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 между двумя входными выводами, и синфазное входное сопротивление  $R_{вх.синф.}$ , т. е. сопротивление между объединёнными входными выводами и общим проводом. Обычно в справочниках приводится значение только дифференциального входного сопротивления, которое в  $10 \dots 100$  раз меньше синфазного и составляет  $(10^4 \dots 10^{10}) \text{ Ом}$ ;

– выходное сопротивление  $R_{\text{вых0}}$  – 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) 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  $h_{21э}$  транзисторов входного каскада ОУ (менее 1 мкА);

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

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

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

При расчёте схем на операционных усилителях возникает дополнительная погрешность, связанная с выбором значений сопротивлений и ёмкостей из стандартного ряда номинальных значений (в данной работе используется ряд 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

$$R_{\text{вх инв.}} = R_1 . \quad (2.3)$$

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

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

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

Отличие от нуля входных токов и напряжения смещения в реальном ОУ приводит к появлению напряжения ошибки  $U_{\text{вых.ош.}}$  на выходе усилителя. Для уменьшения выходного напряжения ошибки, обусловленного входными токами ОУ, между неинвертирующим входом и общим проводом включают резистор  $R_{\text{кор.}}$  с сопротивлением

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

Тогда напряжение ошибки будет определяться выражением

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

### Неинвертирующий усилитель

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

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

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

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

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

$$K_{U \text{ неинв.}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}, \quad (2.10)$$

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

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 по формуле (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

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

Входные сопротивления по инвертирующему и неинвертирующему входам

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

Если сопротивления резисторов  $R_1 - R_4$  таковы, что

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (2.15)$$

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

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

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)

$$K_{U \text{ диф.}} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}; \quad (2.18)$$

$$R_{\text{вх инв.}} = R_1 + \frac{R_{\text{вх0}} \cdot R_2}{R_{\text{вх0}} (1 + K_{U0}) + R_2}; \quad R_{\text{вх неинв.}} = R_3 + \frac{R_{\text{вх0}} \cdot R_4}{R_4 \left(\frac{K_{U \text{ диф.}} + 1}{K_{U0}}\right) + R_{\text{вх0}}}. \quad (2.19)$$

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

## Сумматор

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

$$U_{\text{вых. сум.}} = -(K_1 U_{\text{вх.1}} + K_2 U_{\text{вх.2}} + K_3 U_{\text{вх.3}}), \text{ где } K_i = \frac{R_{\text{OC}}}{R_i} \quad (2.21)$$

входные сопротивления

$$R_{\text{вх1}} = R_1; \quad R_{\text{вх2}} = R_2; \quad R_{\text{вх3}} = R_3. \quad (2.22)$$

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

$$U_{\text{вых. сум.}} = -(K_1 U_{\text{вх.1}} + K_2 U_{\text{вх.2}} + K_3 U_{\text{вх.3}}), \text{ где } K_i = \frac{R_{\text{OC}}}{R_i + \frac{R_{\text{OC}}}{K_{U0}}}, \quad (2.23)$$

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

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

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

$$\frac{1}{R_{\text{кор.}}} = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R_{\text{OC}}}. \quad (2.25)$$

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

### 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

$$\underline{K}_U(\omega) = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + j(\omega/\omega_0)}, \quad (2.27)$$

где 
$$\omega_0 = \frac{1}{R2 \cdot C} \quad (2.28)$$

– верхняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \quad (2.29)$$

уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

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

$$\underline{K}_U(\omega) = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 - j(\omega_0/\omega)}, \quad (2.30)$$

где 
$$\omega_0 = \frac{1}{R1 \cdot C}, \quad (2.31)$$

– нижняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}} \quad (2.32)$$

уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

В полосе пропускания фильтров коэффициент усиления

$$K_{U \max} = \frac{R2}{R1}, \quad (2.33)$$

а входное сопротивление

$$R_{\text{вх.}} = R1. \quad (2.34)$$

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

$$K_{U \max} = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{U0}} \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)}, \quad (2.35)$$

$$R_{\text{вх.}} = R1 + \frac{R_{\text{вх}0} \cdot R1}{R_{\text{вх}0} (1 + K_{U0}) + R2}. \quad (2.36)$$

### 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

$$\underline{K}_U(\omega) = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{1 + j(\omega/\omega_0)}, \quad (2.37)$$

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

– верхняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}} \quad (2.39)$$

уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

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

$$\underline{K}_U(\omega) = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{1 - j(\omega_0/\omega)}, \quad (2.40)$$

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

– нижняя граничная частота, на которой коэффициент передачи

$$K_U(\omega) = |\underline{K}_U(\omega)| = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}} \quad (2.42)$$

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

– для ФНЧ (рис.2.6, а)  $R_{\text{вх.}} = R_{\phi}; \quad (2.44)$

– для ФВЧ (рис.2.6, б)  $R_{\text{вх.}} \rightarrow \infty. \quad (2.45)$

С учётом неидеальности ОУ выражение (2.43) принимает вид

$$K_{U \max} = \frac{K_{U0}}{1 + K_{U0} \frac{R_1}{R_1 + R_2}}, \quad (2.46)$$

а выражения для входных сопротивлений (2.44), (2.45) принимают соответственно вид

– для ФНЧ (рис.2.6, а)  $R_{\text{вх.}} = \frac{R_{\phi} \cdot R_{\text{вх}0}}{R_{\text{вх}0} + R_{\phi} \cdot (K_{U \max} / K_{U0})}; \quad (2.47)$

– для ФВЧ (рис.2.6, б)  $R_{\text{вх.}} = R_{\text{вх}0} \frac{K_{U0}}{K_{U \max}}. \quad (2.48)$

### 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  $I_{K \text{ нас.}}$ ,

$$I_{B \text{ гр.}} = \frac{I_{K \text{ нас.}}}{h_{21э}} < I_{B \text{ нас.}}, \quad (3.1)$$

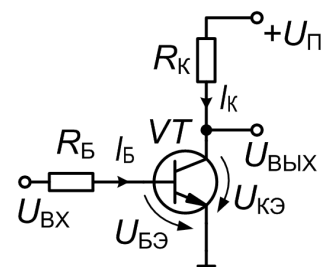
где  $h_{21э}$  – коэффициент передачи базового тока;  $I_{B \text{ нас.}}$  – реальный ток базы в режиме насыщения.

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:

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



**Рисунок 3.1 – Схема транзисторного ключа с общим эмиттером**

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

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

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

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

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

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

где  $f_{\alpha}$  – 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 запираии транзистора, равный

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

а  $U_{BX \min}$  – 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

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

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

– мощности, потребляемые ключом в режиме насыщения и отсечки соответственно;  
 $I_{\text{КБО}}$  – 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 её 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.

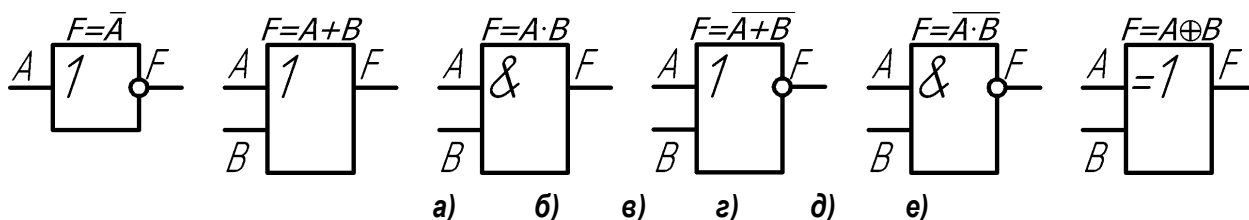
Логической функцией называется функция нескольких переменных  $A, B, \dots, N$ , т. е.  $F = f(A, B, \dots, N)$ , когда сама функция и независимые переменные могут принимать только два значения: "0" и "1". Связи между входными и выходными сигналами комбинационных схем аналитически описываются булевыми 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 ".";  
 $F = A \wedge B = A \cdot B$ . 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, ещё выполняют операцию НЕ. Логические функции, реализуемые этими элементами, могут быть соответственно записаны в следующем виде:  
 $F = \overline{A + B}$ ,  $F = \overline{A \cdot B}$ .

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 "+" обведённый 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

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

### Способы задания логических функций

#### 1. Представление функции на словах

Например, функция трёх 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.

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, причём, 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, причём, 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 приведённых 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, разделённые 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:  $AB$ ;  $\bar{A}B$ ;  $A\bar{B}$ ;  $\bar{A}\bar{B}$ .

Карты Карно для двух и трёх аргументов представлены соответственно на рис.Рисунок 3.3, 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 методом "склеивания" единиц на карте Карно производится минимизация логической функции.

	$B$	$\bar{B}$	$B$
$A$	$\bar{A}\bar{B}$	$\bar{A}B$	$AB$
$\bar{A}$	$\bar{A}\bar{B}$	$\bar{A}B$	$AB$
$A$	$A\bar{B}$	$AB$	

	$C$	$\bar{C}$	$C$
$AB$	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$	$\bar{A}\bar{B}C$	$A\bar{B}\bar{C}$
$\bar{A}\bar{B}$	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$	$\bar{A}\bar{B}C$	$A\bar{B}C$
$\bar{A}B$	$A\bar{B}\bar{C}$	$A\bar{B}C$	
$AB$	$A\bar{B}\bar{C}$	$A\bar{B}C$	
$A\bar{B}$	$A\bar{B}\bar{C}$	$A\bar{B}C$	

	$C$	$0$	$1$
$AB$	$00$	$01$	$11$
$00$			
$01$		$a$	$b$
$11$	$a$	$1$	$1$
$10$			$c$

а)
б)
в)

Рисунок 3.3 – Упрощение логических выражений с помощью карты Карно

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

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

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

Полученная карта Карно изображена на рис.Рисунок 3.3, 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, упрощённое с помощью карты Карно логическое выражение (3.17) будет иметь вид

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

Очевидно, что это упрощённое 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 упрощённое логическое выражение в дизъюнктивной нормальной форме.

#### Переход к заданному базису логических элементов

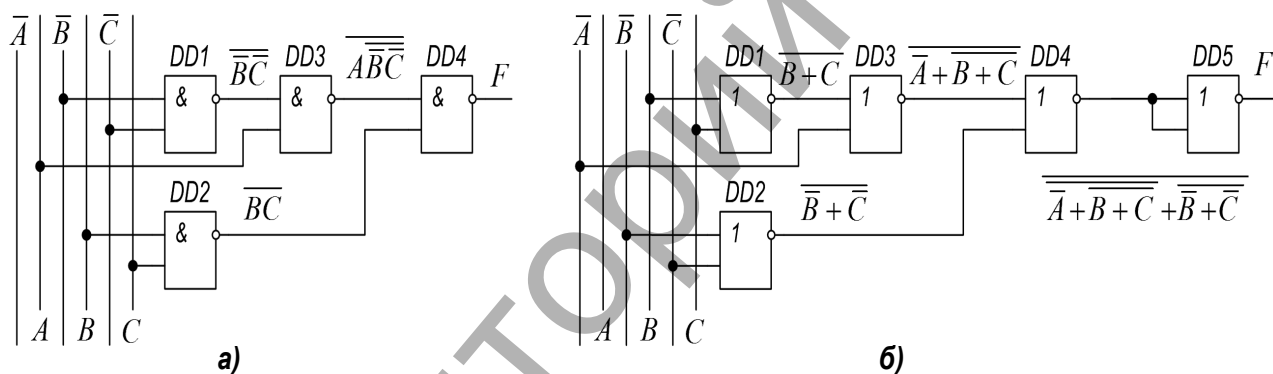
Для перехода к базису 2И-НЕ в выражении (3.19) вынесем за скобки переменную  $A$ , а затем воспользуемся формулой де Моргана:  $\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$ .

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

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

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

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).

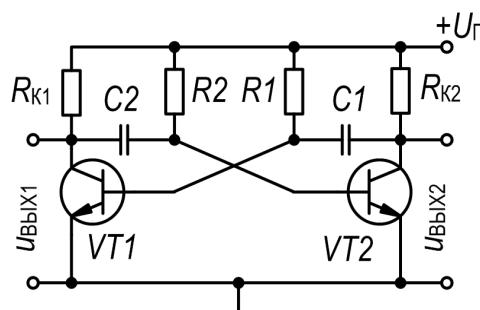


**Рисунок 3.4 – Комбинационные схемы ФАЛ (3.17) в различных базисах: 2И-НЕ (а) и 2ИЛИ-НЕ (б)**

### 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  $C1$  и  $C2$  вместе с резисторами  $R1$  и  $R2$  являются элементами времязадающих цепей. Выходные импульсы снимаются с коллекторов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

Длительность импульсов (время закрытого состояния одного или другого транзистора, т.е. когда на выходе высокий уровень напряжения) определяется временами перезаряда соответствующих конденсаторов и при-



**Рисунок 3.5 – Мультивибратор на биполярных транзисторах**

ближенно может быть найдена по следующим формулам:

$$- \text{ на выходе 1 (на коллекторе VT1)} \quad t_{И1} \approx C1 \cdot R1 \cdot \ln \left( 2 - \frac{U_{КЭ \text{ нас.}} + U_{БЭ \text{ нас.}}}{U_{П}} \right); \quad (3.22)$$

$$- \text{ на выходе 2 (на коллекторе VT2)} \quad t_{И2} \approx C2 \cdot R2 \cdot \ln \left( 2 - \frac{U_{КЭ \text{ нас.}} + U_{БЭ \text{ нас.}}}{U_{П}} \right); \quad (3.23)$$

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). Значения данных напряжений приводятся в справочниках или находятся по входным и выходным вольт-амперным характеристикам транзистора.

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} R1 &\leq h_{21Э \text{ min}}^{VT1} R_{К1}; \\ R2 &\leq h_{21Э \text{ min}}^{VT2} R_{К2}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

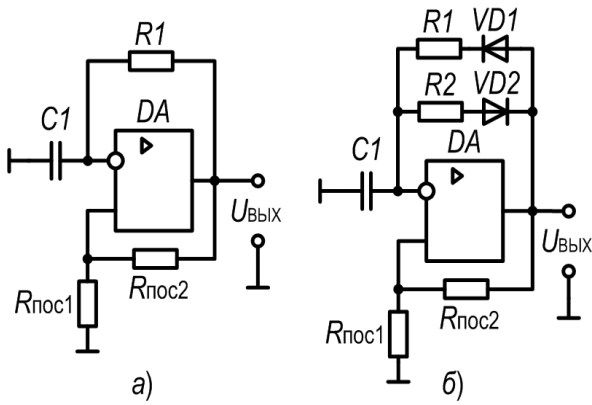
где  $h_{21Э \text{ min}}^{VT1}$  и  $h_{21Э \text{ min}}^{VT2}$  минимальные коэффициенты передачи базового тока транзисторов VT1 и VT2 соответственно. Чтобы удовлетворить приведённым выше противоречивым требованиям, неравенства (3.26) не должны быть сильными. В этом случае транзисторы работают в режиме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

Значения ёмкостей конденсаторов связи  $C1$  и  $C2$  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.





а) – простейшая схема;  
б) – схема с диодными ключами

**Рисунок 3.6 – Мультивибраторы на ОУ**

Схема мультивибратора на операционном усилителе показана рис. 3.6, а. Цепь ПОС содержит делитель  $R_{\text{ПОС1}}, R_{\text{ПОС2}}$ , 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  $\gamma_{\text{ПОС}} U_{\text{ВЫХ max}}$  и  $\gamma_{\text{ПОС}} U_{\text{ВЫХ min}}$ ,

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

В остальное время конденсатор перезаряжается через резистор  $R_1$ .

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

$$t_{\text{имп.}} = t_{\text{пауз.}} = R_1 \cdot C_1 \cdot \ln \left( 1 + \frac{2R_{\text{ПОС1}}}{R_{\text{ПОС2}}} \right). \quad (3.28)$$

Скважность  $s = 1 + \frac{t_{\text{пауз.}}}{t_{\text{имп.}}}$  генерируемых импульсов можно регулировать при включении в

цепь ООС диодов  $VD_1, VD_2$ , выполняющих роль ключей, (рис. 3.6, б). В этом случае

$$t_{\text{имп.}} = R_1 \cdot C_1 \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{2R_{\text{ПОС1}}}{R_{\text{ПОС2}}} \right) \right); \quad (3.29)$$

$$t_{\text{пауз.}} = R_2 \cdot C_1 \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{2R_{\text{ПОС1}}}{R_{\text{ПОС2}}} \right) \right). \quad (3.30)$$

Сопротивления резисторов схемы следует задавать, руководствуясь следующими ограничениями:

—  $R_1, R_{\text{ПОС2}} \ll \frac{U_{\text{ВЫХ max}}}{I_{\text{вх. ср.}}}$ , где  $U_{\text{ВЫХ max}}$  – максимальное выходное напряжение для данного

типа ОУ,  $I_{\text{вх. ср.}}$  – входной ток этого ОУ (см. Приложение 3);

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

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

—  $2\gamma_{\text{ПОС}} U_{\text{ВЫХ max}} < U_{\text{сф. max}}$ , где  $U_{\text{сф. max}}$  – максимально допустимое напряжение синфазного сигнала для данного типа ОУ;

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

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

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

Ёмкость конденсатора  $C_1$  находят из соотношения (3.28) либо (3.29), (3.30).

# Программа курса «Электроника и микропроцессорная техника»

## 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 запрещённой зоны, концентрации примесей и температуры. Математическая модель и параметры идеализированного  $p-n$ -перехода: статическое и дифференциальное сопротивление, барьерная и диффузионная ёмкости перехода, их зависимость от приложенного напряжения. Пробой  $p-n$ -перехода. Виды пробоя.

Контакт металл – полупроводник. Выпрямляющий и невыпрямляющий контакты.

Полупроводниковые резисторы: линейные, варисторы, терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы; их характеристики и параметры.

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

## Тема 2. Полупроводниковые диоды

Типы полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, диоды Шоттки, полупроводниковые стабилитроны, туннельные диоды, диоды с управляемой ёмкостью (варикапы).

Характеристики, параметры, эквивалентные схемы.

Последовательное и параллельное соединение диодов.

Система обозначений и маркировки.

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

## Тема 3. Биполярные транзисторы

Физические процессы в биполярном транзисторе, параметры и статические вольт-амперные характеристики. Режимы работы. Схемы включения транзистора. Схемы замещения. Составные биполярные транзисторы. Силовые транзисторы и их особенности; область применения. Зависимость параметров транзистора от температуры.

Частотные свойства биполярного транзистора. Электрические и предельно допустимые параметры.

Классификация и система обозначений.

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

## Тема 4. Полевые транзисторы

Принцип действия полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом и полевых транзисторов с изолированным затвором (МДП-транзисторы, МОП-транзисторы) с встроенным и индуцированным каналом.

Вольт-амперные характеристики, дифференциальные параметры; эквивалентные модели. Схемы включения

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

## **Тема 5. Тиристоры**

Принцип действия и устройство диодного тиристора (динистора), триодного и тетродного тиристора.

Эквивалентные схемы, параметры и характеристики тиристоров, симметричных тиристоров (симисторов) и тиристоров, запираемых в обратном направлении.

Основные схемы на тиристорах.

Особенности выключения однооперационных тиристоров в цепях переменного тока.

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

## **Тема 6. Приборы отображения информации. Фотоэлектрические приборы**

Элементы оптоэлектроники. Общие сведения об оптоэлектронике.

Фотоэлектрические (фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры) и светоизлучающие устройства, оптроны; параметры и характеристики.

Знаковые и световые индикаторы.

Область применения фотоэлектрических и светоизлучающих приборов в системах автоматического управления.

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

## **Тема 7. Интегральные микросхемы (ИС)**

Классификация интегральных схем по конструктивным и функциональным признакам. Элементы и компоненты ИС.

Особенности метода интегральной технологии.

Особенности ИС на примере полупроводниковой. Степень интеграции; БИС. СБИС.

Система обозначений ИС. Основные типы интегральных микросхем.

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

## **Тема 8. Вторичные источники питания**

Выпрямители переменного тока. Структура источников вторичного питания. Классификация и принципы построения выпрямительных схем.

Однофазные и трёхфазные неуправляемые выпрямители: схемы, принцип работы. Сглаживающие фильтры: назначение, классификация, принцип работы.

Однофазные и трёхфазные управляемые выпрямители: схемы, принцип работы, временные диаграммы, особенности.

Стабилизаторы напряжения и тока. Параметрические и компенсационные стабилизаторы (непрерывного действия и импульсные) напряжения и тока. Назначение, схемы, принцип работы.

Стабилизаторы напряжения и тока в интегральном исполнении.

Инверторы. Инверторы автономные и ведомые сетью. Принцип инвертирования. Схемы, особенности работы, применение.

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

## **Тема 9. Электронные усилители**

Общие сведения об электронных усилителях. Назначение и классификация усилителей. Структурная схема. Параметры усилителей.

Виды сигналов. Амплитудно-частотная, переходная характеристики. Понятие об обратных связях (ОС), их видах и влиянии на параметры усилителя.

Работа биполярного и полевого транзисторов в одиночных усилительных каскадах. Аналитический и графический методы расчёта и анализа работы транзистора в одиночном каскаде усиления.

Стабилизация рабочей точки. Статический и динамический режимы каскада.

Классы усиления усилительных каскадов.

Общие сведения о многокаскадных усилителях, межкаскадные связи, параметры и характеристики.

Выходные каскады: однотактные и двухтактные трансформаторные и бестрансформаторные усилители мощности; анализ работы, расчёт и выбор элементов.

Фазоинверсные каскады.

Усилители постоянного тока (УПТ). Общая характеристика УПТ и их особенность. Классификация. Дифференциальные усилительные каскады на биполярных и полевых транзисторах, анализ работы, выбор элементов, параметры и характеристики.

Операционные усилители (ОУ), их параметры и характеристики. Частотные свойства ОУ. Методы компенсации влияния напряжения сдвига и токов утечки ОУ.

Использование ОУ для выполнения математических операций: инвертирующий и неинвертирующий усилители, сумматор, разностный (дифференциальный) усилитель, интегратор, дифференциатор; их параметры и расчёт.

Активные фильтры, избирательные усилители; амплитудно-частотная характеристика, полоса пропускания, добротность, параметры.

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

### **Тема 10. Импульсные и генераторные устройства**

Ключевой режим работы транзистора и ОУ.

Импульсные устройства на транзисторах и ОУ. Параметры импульсных сигналов. Компаратор. Триггер Шмитта.

Характеристика режимов работы и принципов построения генераторов импульсов. Автоколебательный и ждущий режимы работы мультивибратора. Несимметричный мультивибратор и одновибратор на транзисторах и ОУ.

Генераторы линейно изменяющегося напряжения.

Электронные генераторы.

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина.

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

### **Тема 11. Логические, комбинационные устройства и триггеры**

Электронные ключи на диодах и биполярных транзисторах. Характеристика и параметры. Режимы работы. Способы повышения быстродействия.

Логические операции. Основы алгебры логики.

Минимизация логических функций.

Логические элементы (ЛЭ) И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, Исключающее ИЛИ и их реализация в виде цифровых интегральных микросхем (диодно-транзисторная, транзисторно-транзисторная, эмиттерносвязанная, КМОП-транзисторная логики).

Основные характеристики и параметры цифровых интегральных микросхем (ИМС), быстродействие, мощность переключения.

Проектирование (синтез) логических устройств.

Комбинационные логические устройства. Преобразователи кодов, шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры, демультиплексоры, программируемые логические матрицы, сумматоры и компараторы; их реализация на ЛЭ.

Логические последовательностные элементы и устройства.

Построение триггеров и их классификация по способу управления и функциональному назначению входов  $R, S, C, D, T, J, K$ .

Статические и динамические, одноктактные и двухтактные, асинхронные и синхронные триггеры.

Таблицы переходов, временные диаграммы, реализация триггеров с помощью ЛЭ  
Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4].

## **Тема 12. Микропроцессорная техника**

Регистры памяти и сдвига. Последовательные и параллельные регистры.

Элементы памяти. Оперативное запоминающее устройство.

Счётчики двоичные и с произвольным коэффициентом счёта. Простые (суммирующие и вычитающие) и реверсивные счётчики.

Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи.

Микропроцессоры.

Состав и структура (архитектура) микропроцессорной системы: центральный процессор, источники и носители информации (программа и данные), устройства ввода и вывода, внешняя память.

Состав и структура (архитектура) микропроцессора: арифметико-логическое устройство (АЛУ), основная и регистровая память, устройство управления, регистр команд, регистр-аккумулятор, счётчик команд, регистр признаков.

Виды выполняемых операций АЛУ.

Шинная организация связей микро-ЭВМ, виды команд.

Процесс обработки информации.

Понятие о языке ассемблера.

Рекомендуемая литература: [1, 2, 3, 4, 11, 12].

## Рекомендуемая литература

### Основная литература

1. Горбачёв, Г.Н. Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н. Горбачёв, Е.Е. Чаплыгин; под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
3. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 768 с.
4. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высш. шк., 2005. – 790 с.
5. Расчёт электронных схем. Примеры и задачи / Г.И. Изъюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.

### Дополнительная литература

6. Прянишников, В.А. Электроника: Полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 415 с.
7. Валенко, В.С. Электроника и микросхемотехника / В.С. Валенко, М.С. Хандогин. – Минск: Беларусь, 2000. – 325 с.
8. Ткаченко, Ф.А. Техническая электроника / Ф.А. Ткаченко. – Минск: Дизайн ПРО, 2000. – 351 с.
9. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
10. Алексеев, А.Г. Операционные усилители и их применение / А.Г. Алексеев, Г.В. Войшвилло. – М.: Радио и связь, 1989. – 120 с.
11. Микропроцессоры: в 3-х кн. – Кн. 1. Архитектура и проектирование микроЭВМ. Организация вычислительных процессов: учеб. для вузов / Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Высш. шк., 1986. – 495 с.
12. Микропроцессоры: в 3-х кн. – Кн. 3. Средства отладки. Лабораторный практикум и задачник: учеб. для вузов / Под ред. Л.Н. Преснухина. – М.: Высш. шк., 1986. – 351 с.
13. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы: Справочник / В.И.Галкин, А. Л. Бульчев, В. А. Прохоренко – Мн.: Беларусь, 1987. – 285 с.
14. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под ред. Н.Н. Горюнова. — М.: Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.
15. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 904 с.
16. Интегральные микросхемы: Справочник / Под ред. В.В.Тарабрина. – М.: Радио и связь. 1983. – 528 с.

## Контрольные вопросы

1. Электропроводность полупроводников. Генерация, рекомбинация носителей зарядов.
2. Виды электронно-дырочных переходов.
3. Электронно-дырочный переход при обратном включении.
4. Электронно-дырочный переход при прямом включении.
5. Вольт-амперная характеристика идеализированного электронно-дырочного перехода. Параметры. Ёмкостные свойства электронно-дырочного перехода.
6. Контакт металл – полупроводник. Выпрямляющий и невыпрямляющий контакты.
7. Полупроводниковые резисторы: линейные, варисторы, терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы; их характеристики и параметры.
8. Типы полупроводниковых диодов.
9. Последовательное и параллельное соединение диодов
10. Типы биполярных транзисторов. Структурная схема. Режимы работы.
11. Схемы включения биполярных транзисторов (БТ) различных типов. Физические основы функционирования биполярных транзисторов.
12. Статические характеристики и параметры биполярного транзистора, включённого по схеме с общей базой.
13. Статические характеристики и параметры биполярного транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером.
14. Малосигнальные  $T$ -образные эквивалентные схемы биполярного транзистора в физических параметрах.
15. Малосигнальные эквивалентные схемы биполярного транзистора в  $h$ -параметрах.
16. Связь  $h$ -параметров с физическими параметрами транзистора.
17. Составные биполярные транзисторы.
18. Зависимость параметров биполярного транзистора от температуры.
19. Частотные свойства биполярного транзистора. Электрические и предельно допустимые параметры.
20. Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (ПТУП): структурная схема, принцип действия, ВАХ, малосигнальная эквивалентная схема, математическая модель.
21. Полевые транзисторы (ПТ) с изолированным затвором с индуцированным каналом: структурная схема, принцип действия, ВАХ, малосигнальная эквивалентная схема, математическая модель.
22. Полевые транзисторы с изолированным затвором со встроенным каналом: структурная схема, принцип действия, ВАХ, малосигнальная эквивалентная схема, математическая модель.
23. Диодные тиристоры: принцип действия, характеристики, параметры, примеры применения.
24. Триодные тиристоры: принцип действия, характеристики, параметры, примеры применения.
25. Симисторы: принцип действия, характеристики, параметры.
26. Фотоэлектрические устройства.
27. Оптроны. Характеристики, параметры, применение.
28. Знаковые и световые индикаторы.

29. Классификация интегральных схем (ИС) по конструктивным и функциональным признакам.
30. Система обозначений ИС. Основные типы интегральных микросхем.
31. Назначение и основные параметры вторичных источников питания. Структурная схема вторичного источника питания.
32. Однофазный однополупериодный неуправляемый вентильный блок: принцип действия, параметры, достоинства, недостатки.
33. Двухфазный двухполупериодный неуправляемый вентильный блок: схема, принцип действия, параметры, достоинства, недостатки.
34. Однофазный мостовой неуправляемый вентильный блок: схема, принцип действия, параметры, достоинства, недостатки.
35. Трёхфазный неуправляемый вентильный блок с отводом от нулевой точки: схема, параметры, достоинства, недостатки.
36. Трёхфазный мостовой неуправляемый вентильный блок: схема, параметры, достоинства, недостатки.
37. Выпрямитель с ёмкостно-активной нагрузкой: схема, принцип действия, особенности.
38. Выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой: схема, принцип действия, особенности.
39. Сглаживающие фильтры: схемы, принцип действия.
40. Однофазные управляемые выпрямители: схемы, принцип работы, временные диаграммы, особенности.
41. Трёхфазные управляемые выпрямители: схемы, принцип работы, временные диаграммы, особенности.
42. Стабилизаторы напряжения и тока. Назначение, классификация, характеристики, основные параметры.
43. Однокаскадные параметрические стабилизаторы напряжения параллельного типа.
44. Многокаскадные параметрические стабилизаторы напряжения параллельного типа.
45. Параметрические стабилизаторы напряжения мостового типа.
46. Параметрические стабилизаторы напряжения последовательного типа.
47. Параметрические стабилизаторы тока.
48. Компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием: структурные схемы, уравнение компенсационного стабилизатора.
49. Компенсационный стабилизатор напряжения с непрерывным регулированием последовательного типа: схема, параметры.
50. Компенсационные стабилизаторы с импульсным регулированием с понижением напряжения. Принцип действия.
51. Компенсационные стабилизаторы с импульсным регулированием с повышением напряжения. Принцип действия.
52. Компенсационные стабилизаторы с импульсным регулированием с инвертированием напряжения. Принцип действия.
53. Интегральные стабилизаторы напряжения; способы включения.
54. Обратногоходовой одноктактный преобразователь напряжения с самовозбуждением.
55. Прямоходовой одноктактный преобразователь напряжения с самовозбуждением.
56. Регулируемый одноктактный преобразователь напряжения.
57. Регулируемый двухтактный преобразователь напряжения.
58. Автономные инверторы напряжения и тока.



59. Инверторы с самовозбуждением и способы их надёжного начального запуска.
60. Инверторы с внешним возбуждением.
61. Общие сведения и классификация электронных усилителей. Структурная схема.
62. Электронные усилители: основные параметры и характеристики.
63. Электронные усилители: виды искажений сигнала и причины их возникновения.
64. Обратные связи (ОС): структурная схема; определение; виды ОС.
65. Способы получения и введения сигнала ОС.
66. Обратная связь в усилителях: влияние ОС на амплитудную и частотные характеристики.
67. Обратная связь в усилителях: влияние ОС на входное и выходное сопротивление.
68. Режимы работы (классы усиления) усилительных элементов.
69. Способы обеспечения начального режима работы биполярного транзистора – схемы с фиксированным током базы (расчёт, достоинства, недостатки).
70. Способы обеспечения начального режима работы биполярного транзистора – схемы с фиксированным потенциалом базы (расчёт, достоинства, недостатки).
71. Стабилизация режима работы биполярного транзистора: эмиттерная стабилизация (принцип действия, расчёт).
72. Стабилизация режима работы биполярного транзистора: коллекторная стабилизация (принцип действия, расчёт).
73. Стабилизация режима работы биполярного транзистора: комбинированная (коллекторно-эмиттерная) стабилизация (принцип действия, расчёт).
74. Усилительный каскад (УК) на биполярном транзисторе (БТ) в схеме включения с общей базой (ОБ). Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальная схема замещения усилителя в рабочем диапазоне частот.
75. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений УК на БТ в схеме включения с ОБ в рабочем диапазоне частот.
76. Расчёт и анализ коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности УК на БТ в схеме включения с ОБ в рабочем диапазоне частот.
77. УК на БТ в схеме включения с общим эмиттером (ОЭ). Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальные схемы замещения усилителя в рабочем диапазоне.
78. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений УК на БТ в схеме включения с ОЭ в рабочем диапазоне частот.
79. Расчёт и анализ коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности УК на БТ в схеме включения с ОЭ в рабочем диапазоне частот.
80. УК на БТ в схеме включения с общим коллектором (ОК). Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальная схема замещения усилителя в рабочем диапазоне частот.
81. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений УК на БТ в схеме включения с ОК в рабочем диапазоне частот.
82. Расчёт и анализ коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности УК на БТ в схеме включения с ОК в рабочем диапазоне частот.
83. Способы задания в усилительных каскадах режима работы полевых транзисторов различных типов.

84. Усилительные каскады на полевых транзисторах с управляющим переходом (ПТУП) в схеме включения с общим истоком (ОИ). Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальные схемы замещения усилителей в рабочем диапазоне частот.
85. Усилительные каскады на полевых транзисторах с изолированным затвором (ПТИЗ) в схеме включения с ОИ. Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальные схемы замещения усилителей в рабочем диапазоне частот.
86. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений УК на полевых транзисторах (ПТ) различных типов в схеме включения с ОИ в рабочем диапазоне частот.
87. Расчёт и анализ коэффициента усиления по напряжению УК на ПТ различных типов в схеме включения с ОИ в рабочем диапазоне частот.
88. Усилительные каскады на полевых транзисторах различных типов в схеме включения с общим стоком (ОС). Назначение всех элементов. Расчёт по постоянному току. Малосигнальные схемы замещения усилителя в рабочем диапазоне частот.
89. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений УК на ПТ различных типов в схеме включения с ОС в рабочем диапазоне частот.
90. Расчёт и анализ коэффициента усиления по напряжению УК на ПТ различных типов в схеме включения с ОС в рабочем диапазоне частот.
91. Усилители мощности: назначение, классификация, классы усиления.
92. Усилители мощности класса А.
93. Двухтактные усилители мощности класса В и АВ с биполярным питанием.
94. Двухтактные усилители мощности класса В и АВ с однополярным питанием.
95. Фазоинверсный каскад. Назначение. Расчёт по постоянному току. Малосигнальная эквивалентная схема в рабочем диапазоне частот.
96. Расчёт и анализ входного и выходного сопротивлений фазоинверсного каскада в рабочем диапазоне частот.
97. Расчёт и анализ коэффициентов усиления по напряжению, току и мощности фазоинверсного каскада в рабочем диапазоне частот.
98. Назначение и особенности усилителей постоянного тока (УПТ). Дрейф нуля в УПТ и методы его устранения. Классификация УПТ.
99. Дифференциальный усилитель на транзисторах. Принцип действия; параметры.
100. Операционные усилители (ОУ). Функциональное назначение, структурная схема, основные параметры и характеристики.
101. Основные источники входных ошибок ОУ. Методы коррекции ошибок.
102. Инвертирующий усилитель на ОУ. Расчёт параметров
103. Неинвертирующий усилитель на ОУ. Расчёт параметров. Повторитель напряжения на ОУ.
104. Дифференциальный усилитель и сумматор на ОУ.
105. Интегратор на базе ОУ.
106. Дифференциатор на базе ОУ.
107. Усилители с логарифмической и экспоненциальной передаточной характеристикой.
108. Ключевой режим работы транзистора и ОУ. Параметры импульсных сигналов.
109. Генераторные устройства: назначение; классификация; структурная схема; условия генерации.

110. Характеристика режимов работы и принципов построения генераторов импульсов. Автоколебательный и ждущий режимы работы мультивибратора.
111. Мультивибраторы на транзисторах.
112. Мультивибраторы на ОУ.
113. Генераторы линейно изменяющегося напряжения.
114. Генераторы гармонических колебаний  $LC$ -типа.
115. Генераторы гармонических колебаний  $RC$ -типа.
116. Электронные ключи на диодах и биполярных транзисторах. Характеристика и параметры. Режимы работы. Способы повышения быстродействия.
117. Цифровые ИМС диодно-транзисторной и транзисторно-транзисторной логики. Основные параметры.
118. Цифровые ИМС эмиттерносвязанной и КМОП-транзисторной логики. Основные параметры.
119. Комбинационные схемы: сумматоры.
120. Комбинационные схемы: преобразователи кодов; шифраторы, дешифраторы.
121. Комбинационные схемы: мультиплексор, демльтиплексор.
122. Триггеры. Классификация, основные типы и способы управления. Статические и динамические входы.
123. Асинхронные и синхронные  $RS$ -триггеры. Принцип действия.
124.  $D$ -триггеры.  $JK$ -триггеры.
125.  $T$ -триггеры.  $MS$ -триггеры.
126. Регистры, их назначение. Параллельные и последовательные регистры.
127. Счётчики, их назначение и реализация. Асинхронные счётчики. Достоинства и недостатки.
128. Синхронные счётчики. Достоинства и недостатки.
129. Счётчики с произвольным модулем счёта.
130. Цифро-аналоговые преобразователи. Методы преобразования. Характеристики преобразователей. Основные типы преобразователей.
131. Аналого-цифровые преобразователи. Методы преобразования. Характеристики преобразователей. Основные типы преобразователей.
132. Запоминающие устройства. Структура простейшей памяти. Структура адресного пространства.
133. Архитектура микропроцессорной системы.
134. Архитектура микропроцессора.
135. Шинная организация связей микро-ЭВМ, виды команд.

## Приложение 1. Параметры некоторых биполярных транзисторов

Транзи- стор	$h_{21э}$	$U_{КЭ \text{ доп. max}}$ , В	$I_{К \text{ доп. max}}$ , мА	$P_{К \text{ доп. max}}$ , мВт	$I_{КБЭ}$ , мкА	$C_{э}$ , пФ	$C_{к}$ , пФ	$f_{\alpha}$ , МГц	Тип тран- зистора
КТ104А	9...36	- 30	50	150	$\leq 1$	10	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ104Б	20...80	- 15	50	150	$\leq 1$	10	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ104В	40...160	- 15	50	150	$\leq 1$	10	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ201А	20...60	+ 20	100	150	$\leq 1$	20	20	10	<i>n-p-n</i>
КТ201Б	30...90	+ 20	100	150	$\leq 1$	20	20	10	<i>n-p-n</i>
КТ201В	30...90	+ 10	100	150	$\leq 1$	20	20	10	<i>n-p-n</i>
КТ201Г	70...210	+ 10	100	150	$\leq 1$	20	20	10	<i>n-p-n</i>
КТ203А	$\geq 9$	- 60	10	150	$\leq 1$	10	10	5	<i>p-n-p</i>
КТ203Б	30...150	- 30	10	150	$\leq 1$	10	10	5	<i>p-n-p</i>
КТ203В	30...200	- 15	10	150	$\leq 1$	10	10	5	<i>p-n-p</i>
КТ208А	20...60	- 15	300	200	$\leq 1$	100	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ208Б	40...120	- 15	300	200	$\leq 1$	100	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ208В	80...210	- 15	300	200	$\leq 1$	100	50	5	<i>p-n-p</i>
КТ312А	10...100	+ 20	30	225	$\leq 10$	20	500	80	<i>n-p-n</i>
КТ312Б	25...100	+ 35	30	225	$\leq 10$	20	500	80	<i>n-p-n</i>
КТ312В	50...280	+ 20	30	225	$\leq 10$	20	500	80	<i>n-p-n</i>
КТ315А	20...90	+ 25	100	150	$\leq 1$	7	7	100	<i>n-p-n</i>
КТ315Б	50...350	+ 20	100	150	$\leq 1$	7	7	100	<i>n-p-n</i>
КТ315В	20...90	+ 40	100	150	$\leq 1$	7	7	100	<i>n-p-n</i>
КТ315Г	50...350	+ 35	100	150	$\leq 1$	7	7	100	<i>n-p-n</i>
КТ316В	40...120	+ 10	30	150	$\leq 0,5$	2,5	3	100	<i>n-p-n</i>
КТ316Д	60...300	+ 10	30	150	$\leq 0,5$	2,5	3	100	<i>n-p-n</i>
КТ325А	30...90	+ 10	30	225	$\leq 0,5$	2,5	2,5	100	<i>n-p-n</i>
КТ349А	20...80	- 15	40	200	$\leq 1$	8	6	100	<i>p-n-p</i>
КТ349Б	40...160	- 15	40	200	$\leq 1$	8	6	100	<i>p-n-p</i>
КТ349В	120...300	- 15	40	200	$\leq 1$	8	6	100	<i>p-n-p</i>
КТ355А	80...300	+ 15	30	225	$\leq 0,5$	2	2	100	<i>n-p-n</i>
КТ361А	20...90	- 25	100	150	$\leq 1$	9	9	300	<i>p-n-p</i>
КТ361Б	50...350	- 20	100	150	$\leq 1$	9	9	300	<i>p-n-p</i>
КТ361В	40...160	- 40	100	150	$\leq 1$	7	7	300	<i>p-n-p</i>
КТ361Г	50...350	- 35	100	150	$\leq 1$	7	7	300	<i>p-n-p</i>

## Приложение 2. Параметры некоторых полевых транзисторов

Транзи- стор	$S$ , мА/В	$\frac{U_{ЗИ\text{ отс.}}}{U_{ЗИ\text{ пор.}}}$ , В	$U_{СИ\text{ макс доп.}}$ , В	$I_C\text{ макс доп.}$ , мА	$P_C\text{ макс доп.}$ , мВт	Тип транзистора
КП103Е	0,4...2,4	+ (0,4...1,5)	- 10	0,3...2,5	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП103Ж	0,5...2,8	+ (0,5...2,2)	- 10	0,35...3,8	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП103И	0,8...2,6	+ (0,8...3)	- 10	0,8...1,8	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП103К	1,0...3,0	+ (1,4...4)	- 10	1,0...5,5	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП103Л	1,8...3,8	+ (2...6)	- 10	1,8...6,6	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП103М	1,3...4,4	+ (2,8...7,0)	- 10	3,0...12	120	ПТУП с каналом <i>p</i> -типа
КП301Б	1...2,6	$\overline{-(2,7...5,4)}$	- 20	15	200	ПТИЗ с индуцирован- ным каналом <i>p</i> -типа
КП302А	5...12	$\overline{-(1...5)}$	+ 20	3...24	300	ПТУП с каналом <i>n</i> -типа
КП302Б	7...14	$\overline{-(2,5...7)}$	+ 20	18...43	300	ПТУП с каналом <i>n</i> -типа
КП302В	5...12	$\overline{-(3...10)}$	+ 20	33...43	300	ПТУП с каналом <i>n</i> -типа
КП304А	$\geq 4$	$\overline{-(4...5)}$	- 25	30	300	ПТИЗ с индуцирован- ным каналом <i>p</i> -типа
КП305Ж	5,2...10,5	$\overline{\leq -6}$	+ 15	15	150	ПТИЗ с встроенным каналом <i>n</i> -типа
КП312А	4...5,8	$\overline{-(2...8)}$	+ 25	8...25	100	ПТУП с каналом <i>n</i> -типа
КП312Б	2...5	$\overline{-(0,8...6)}$	+ 25	1,5...7	100	ПТУП с каналом <i>n</i> -типа

### Приложение 3. Параметры некоторых операционных усилителей

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

Тип ОУ	$K_{U0}$	$R_{вх0}$ , 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	$I_{ВЫХ. доп.}^{OU}$ , мА
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
К157УД1	50 000	1	15	5	500	150	70	20	300
К157УД2	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
К544УД1А	50 000	10	10	30	0,15	0,02	64	10	5
К544УД1Б	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
К544УД2А	20 000	10	10	30	0,1	0,1	70	10	5
К544УД2Б	10 000	10	10	50	0,5	0,5	70	10	5
К544УД2В	20 000	10	10	50	1	1	70	10	5
К551УД1А	500 000	1	10	1,5	100	20	60	13,5	5
К551УД1Б	250 000	1	10	2,5	125	35	60	13,5	5
КМ551УД2А	5 000	0,5	11,5	5	400	200	60	4	6
КМ551УД2Б	5 000	0,5	11,5	5	400	200	60	8	6
К553УД1А	15 000	0,5	10	7,5	1,5	0,5	65	8	5
К553УД1Б	25 000	0,5	10	2	0,2	0,05	80	8	5
К553УД2	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
К574УД1А	20 000	10 000	10	50	0,5	0,2	80	30	5
К574УД1Б	50 000	10 000	10	50	0,5	0,2	80	30	5
К574УД1В	10 000	10 000	10	100	1	0,2	80	30	5
К574УД2А	100 000	1 000	10	25	0,3	0,1	80	10	1
К574УД2Б	100 000	1 000	10	25	0,3	0,1	80	10	1
К574УД3	100 000	1 000	13,5	8	0,3	0,05	80	10	1
КР1408УД1	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

<b>E24</b>	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

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

Например, если в результате расчётов получены следующие значения:

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

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



## Приложение 5. Условные графические обозначения в схемах

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

<p>Транзистор полевой с р-каналом</p> <p>VT7</p> <p>VT8</p>	<p>Транзистор полевой с изолированным затвором и р-каналом</p> <p>VT9</p> <p>Вывод подложки</p> <p>1,5</p> <p>4</p> <p>VT10</p>	<p>Транзистор полевой с двумя изолированными затворами и п-каналом</p> <p>VT11</p>	<p>Фоторезистор</p> <p>R20</p> <p>R19</p> <p>45°</p> <p>6</p> <p>12</p>
<p>Фото- и светодиод</p> <p>VD13</p> <p>HL1</p> <p>VD14</p> <p>HL2</p> <p>10</p>	<p>Фототранзистор</p> <p>VT12</p> <p>VT13</p>	<p>Оптрон резисторный</p> <p>U1</p> <p>8</p> <p>3</p> <p>12</p> <p>30</p> <p>R6</p>	<p>Оптрон диодный</p> <p>U2</p> <p>U2.1</p> <p>U2.2</p>
<p>Оптрон тиристорный</p> <p>U3</p>	<p>Оптрон транзисторный</p> <p>U4</p> <p>U5</p>	<p>Усилитель операционный</p> <p>DA1</p> <p>FC</p> <p>DA2</p> <p>NC</p> <p>NC</p> <p>+U</p> <p>-U</p> <p>5</p> <p>10</p> <p>15</p> <p>10</p> <p>10</p> <p>2</p>	<p>Элементы логические</p> <p>DD1.1</p> <p>DD2.1</p> <p>DD3.1</p> <p>DD4.1</p> <p>10</p> <p>15</p>
<p>Элементы логические</p> <p>DD5.1</p> <p>DD6.1</p> <p>DD7.1</p> <p>DD8.1</p> <p>10</p> <p>45</p>	<p>D-триггер</p> <p>DD8.1</p> <p>S</p> <p>TT</p> <p>D</p> <p>C</p> <p>R</p> <p>5</p> <p>10</p> <p>35</p>	<p>Штырь и гнездо разъемного соединителя (XW1-XW4 – коаксиального)</p> <p>XP1</p> <p>XW1</p> <p>XW2</p> <p>XW3</p> <p>XW4</p> <p>XS1</p> <p>X1</p> <p>X2</p> <p>90°</p> <p>6</p> <p>5</p> <p>10</p>	<p>Вилка и розетка разъемного соединителя</p> <p>XP1</p> <p>X1</p> <p>X2</p> <p>XS1</p> <p>X3</p> <p>5</p> <p>10</p>
<p>Контакты разборного и неразборного соединений</p> <p>XT1</p> <p>XT2</p> <p>XT3</p> <p>XT4</p> <p>1,5...2</p> <p>1,5...2</p>	<p>Ответвления линий электрической связи</p> <p>45°</p>	<p>Элемент гальванический, аккумуляторный, батарея элементов</p> <p>G1</p> <p>GB1</p> <p>1,5 В</p> <p>9 В</p> <p>1,5</p> <p>8</p> <p>4</p>	<p>Соединение с общим проводом (корпусом), заземление</p> <p>90°</p> <p>6</p> <p>6...10</p>

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Задания к контрольной работе	4
Общие требования к оформлению контрольной работы	5
Методические указания к выполнению контрольной работы	6
Задание 1. Расчёт усилительных каскадов на транзисторах	6
Расчёт по постоянному току УК на биполярных транзисторах	6
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	27
Мультивибраторы на транзисторах	31
Мультивибраторы на операционном усилителе	32
Программа курса «Электроника и микропроцессорная техника»	34
Рекомендуемая литература	38
Контрольные вопросы	39
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	49

Учебное издание

Составители:

**Игорь Михайлович Панасюк**  
**Александр Сергеевич Смаль**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

*к выполнению контрольных работ*  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»  
*для студентов специальности*  
**1 – 36 01 01 «Технология машиностроения»**  
*заочной формы обучения*

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

---

Подписано к печати 15.12.2015 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Снегурочка».  
Уч. изд. л. 3,25. Усл.п.л. 3,02. Тираж 100 экз. Заказ № 1273.  
Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.