

Министерство образования и науки Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электротехники и электроники

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Электротехника и основы электроники»  
для студентов неэлектротехнических специальностей

Часть 3

**ЭЛЕКТРОНИКА**

Минск 2003

## УДК 621.3 (07)

Настоящий лабораторный практикум предназначен в качестве учебного пособия для студентов неэлектротехнических специальностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Электроника», «Электротехника и электроника», «Электротехника и основы электроники», «Электроника и микропроцессорная техника»

Содержание пособия соответствует действующим программам названных курсов и включает девять лабораторных работ по следующим разделам: «Полупроводниковые приборы и устройства», «Операционные усилители», «Логические элементы, комбинационные и последовательностные устройства», «Элементы микропроцессорной техники».

Работы содержат расчетную и экспериментальную части. Предварительный расчет к эксперименту студенты должны выполнять в период подготовки к работе, затем полученные результаты подтверждают соответствующими измерениями.

Вошедшие в третью часть лабораторного практикума работы подготовили: Т.Т. Розум – 3.1, 3.4; Г.С. Климович – 3.2, 3.3, 3.6, 3.7, 3.8; Л.С. Пекарчик – 3.5; И.В. Новаш – 3.9.

Составители:

Г.С. Климович, И.В. Новаш, Л.С. Пекарчик, Т.Т. Розум

Рецензент:

Ю.В. Бладыко

© Белорусский национальный  
технический университет, 2003 .

## **ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

1. К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности.
2. Каждый студент должен подготовиться к занятию по данному учебному пособию и рекомендуемой литературе: выполнить предварительный расчет к эксперименту, начертить необходимые схемы, графики и таблицы. Не подготовившиеся студенты к занятию не допускаются.
3. Перед сборкой электрической цепи необходимо убедиться в отсутствии напряжения на элементах цепи.
4. Сборку цепи следует начинать от зажимов источника, прежде всего собрать цепи тока, а затем цепи напряжения.
5. Перед включением источника питания на регулируемых элементах должны быть установлены заданные параметры, а регулятор ЛАТРа должен находиться в нулевом положении.
6. Включение цепи под напряжение производится только после проверки ее преподавателем или лаборантом.
7. Изменения в структуре цепи производятся при отключенном источнике питания.
8. Согласно программе работы сделать необходимые измерения и заполнить соответствующие таблицы.
9. Показать результаты преподавателю и получить разрешение на разборку цепи.
10. Привести в порядок рабочее место: разобрать цепи, аккуратно сложить провода.
11. Оформить отчет о выполненной работе согласно требованиям к содержанию отчета в конкретной работе.
12. Представить отчет о работе преподавателю, ответить на контрольные вопросы, получить зачет по выполненной работе и задание к следующему занятию.

## Лабораторная работа 3.1

### ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Цель работы: изучение принципа действия и свойств однофазных и трехфазных выпрямителей; ознакомление с простейшими сглаживающими фильтрами.

#### Общие сведения

Выпрямителем называется устройство преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямительное устройство, помимо выпрямителя **В**, в который входят один или несколько включенных по определенной схеме вентиляй, содержит в себе силовой трансформатор **Т**, сглаживающий фильтр **СФ** и стабилизатор **Ст** (рисунок 1.1). В зависимости от условий работы и требований отдельные узлы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

Основным элементом выпрямителя является вентиль (диод) - это нелинейный элемент, обладающий незначительным сопротивлением току в прямом направлении и весьма большим - в обратном. Наибольшее распространение

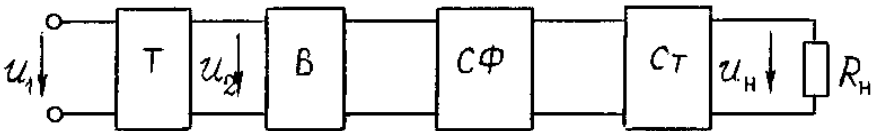


Рисунок 1.1

получили полупроводниковые диоды, вентильные свойства которых определяются свойствами  $p$ - $n$ -перехода – контактом двух полупроводниковых материалов с различными типами электропроводности.

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода и его условное графическое обозначение приведены на рисунке 1.2. Для указанных направлений положительный ток и напряжение называют прямыми, отрицательные – обратными.

Основные параметры диодов: предельно до-

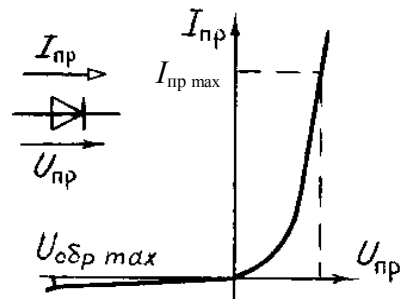


Рисунок 1.2

пустимый прямой ток (постоянная составляющая) и максимально допустимое постоянное обратное напряжение. Превышение их приводит к необратимым процессам в  $p$ - $n$ -переходе, разрушающим его.

Рассмотрим следующие выпрямители, имеющие широкое практическое использование: однофазный однополупериодный, однофазный мостовой и трехфазный мостовой. При анализе работы выпрямителей будем считать вентили идеальными, т.е. сопротивление вентиля в прямом направлении равно нулю, а в обратном – бесконечности.

Однофазный однополупериодный выпрямитель содержит один вентиль  $VD$ , который включен последовательно с нагрузочным резистором  $R_H$  и вторичной обмоткой трансформатора  $T$  (рисунок 1.3,а). Пренебрегаем индуктивным сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток трансформатора и считаем, что напряжение  $u_2$  на вторичной обмотке трансформатора изменяется по закону  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ . При положительных значениях этого напряжения вентиль  $VD$  открыт, и в нагрузочном резисторе  $R_H$  протекает ток

$$i_H = \frac{U_{2m}}{R_H} \sin \omega t$$

, являющийся для вентиля прямым током. В этом интервале

времени  $(0 \dots T/2; T \dots \frac{3}{2} T)$

$u_H = u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ ;  $u_B = 0$  (рисунок 1.3,б).

При отрицательных значениях  $u_2$  вентиль  $VD$  закрыт, его сопротивление бесконечно велико, значит,  $u_H = 0$ ;  $u_B = u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ .

Периодическое повторение этих процессов формирует на нагрузке несинусоидальное выпрямленное напряжение  $u_H$ , постоянная составляющая которого

$$U_{H \text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{H \text{ max}} \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} U_{H \text{ max}}$$

Учитывая, что  $U_{H \text{ max}} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2$ , получаем соотношение для выбора напряжения трансформатора по заданной постоянной составляющей выпрямленного напряжения:  $U_{H \text{ ср}} = \sqrt{2} U_2 / \pi = 0,45 U_2$  или  $U_2 = 2,22 U_{H \text{ ср}}$ .

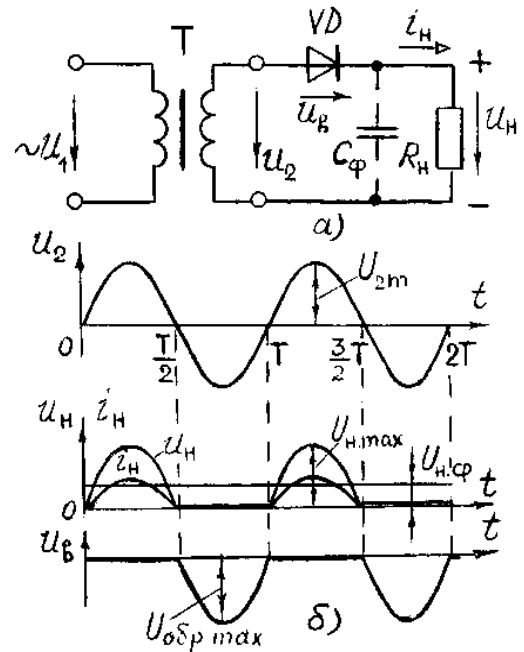


Рисунок 1.3

Для надежной работы вентиля выбирают из условий:  $I_{\text{пр max}} \geq I_{\text{н ср}}$ ,  
 $U_{\text{обр max}} \geq U_{2\text{м}} = \pi U_{\text{н ср}}$ .

Коэффициентом пульсаций выпрямленного напряжения  $p$  называют отношение амплитуды основной гармоники к постоянной составляющей. Для однополупериодного выпрямителя напряжение представляется рядом Фурье:

$$u_{\text{н}} = U_{\text{н ср}} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right)$$
 Тогда коэффициент пульсаций

$$p = \frac{U_{\text{н м осн}}}{U_{\text{н ср}}} = \frac{U_{\text{н ср}} \frac{\pi}{2}}{U_{\text{н ср}}} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Недостатком однополупериодных выпрямителей является высокий уровень пульсаций, подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током. Они применяются для питания цепей малой мощности (10 ... 15 Вт) высокого напряжения, например, электронно-лучевых трубок. Отмеченных недостатков лишены двухполупериодные выпрямители.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель (рисунок 1.4,а)

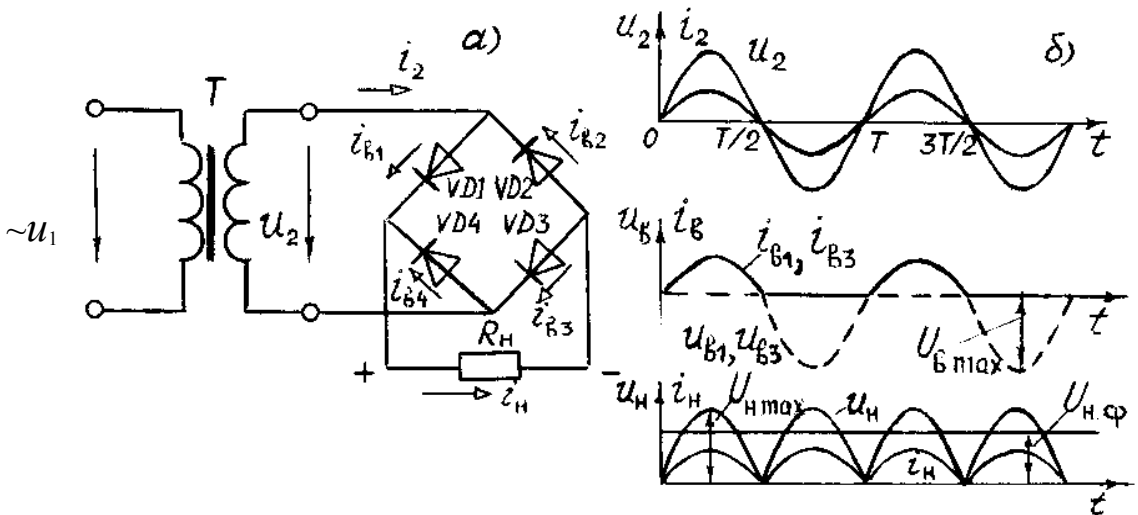


Рисунок 1.4

содержит четыре вентиля  $VD1 \dots VD4$ , включенных по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подано синусоидальное напряжение  $u_2 = U_{2\text{м}} \sin \omega t$ , к другой – подключен нагрузочный резистор  $R_n$ . При положительных значениях

напряжения  $u_2$  вентили  $VD1$  и  $VD3$  открыты, и в цепи трансформатор, вентиль  $VD1$ , резистор  $R_n$ , вентиль  $VD3$  протекает ток (рисунок 1.4,б). В этот интервал времени  $u_n = u_2$ , а к закрытым вентилям  $VD2$  и  $VD4$  напряжение  $u_2$  будет приложено как обратное. При отрицательных значениях  $u_2$  вентили  $VD1$  и  $VD3$  закрыты, а  $VD2$  и  $VD4$  - открыты. Протекающий в цепи трансформатор,  $VD2$ ,  $R_n$ ,  $VD4$  ток отрицателен для трансформатора, но положителен для нагрузочного резистора.

Периодическое повторение этих процессов определяет несинусоидальное напряжение нагрузки  $u_n$ , равное  $|u_2|$  (рисунок 1.4,б).

Постоянная составляющая этого напряжения вдвое больше, чем при одно-

полупериодном выпрямлении  $U_{n\text{ ср}} = \frac{2}{\pi} U_{n\text{ max}}$ .

Учитывая соотношения напряжений и токов, получим выражения для выбора напряжения трансформатора  $U_2$  и вентилей в схему выпрямителя:

$$U_{n\text{ ср}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9 U_2; U_2 = 1,11 U_{n\text{ ср}}; I_{np}$$

$$\geq 0,5 I_{n\text{ ср}}; U_{обр\text{ max}} \geq U_{2m} = 2 U_{n\text{ ср}}$$

Мостовой выпрямитель по сравнению с однополупериодным имеет то преимущество, что средний выпрямленный ток  $I_{n\text{ ср}}$  и напряжение  $U_{n\text{ ср}}$  вдвое больше, а пульсации напряжения и тока значительно меньше  $p = 0,67$ , вентили в схеме выбираются по меньшим обратным напряжениям и по половине тока нагрузки, трансформатор имеет хорошие условия работы. Применяется в устройствах малой и средней мощности (от единиц до сотен ватт).

Трехфазный мостовой выпрямитель содержит шесть вентилей (рисунок 1.5,а). Предложен в 1923 году А.И.Ларионовым. Полагаем, что потенциал нейтральной точки трансформатора  $n$  равен нулю, тогда графики напряжений  $u_a, u_b, u_c$  являются графиками потенциалов  $\varphi$  точек  $a, b, c$  (рисунок 1.5,б). В любой момент времени в цепи, включающей резистор  $R_n$  и

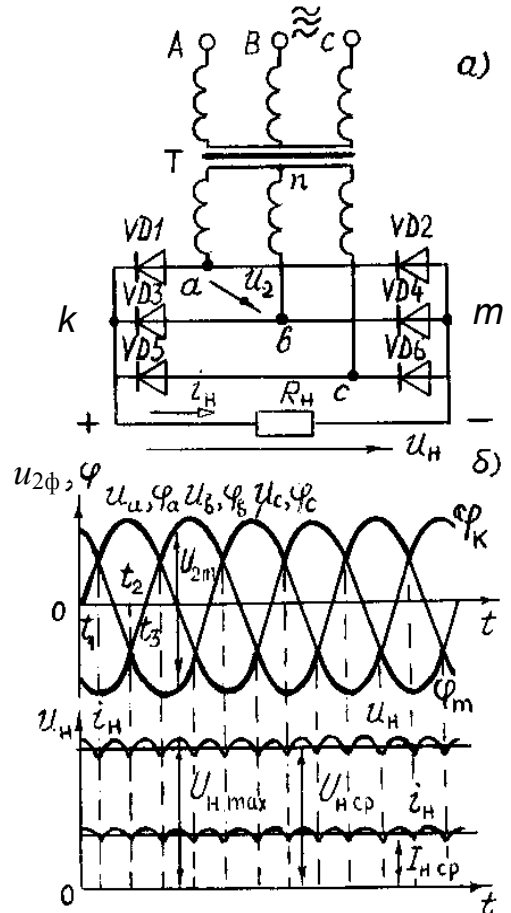


Рисунок 1.5

два вентиля протекает ток. Например, в интервале времени  $t_1 \dots t_2$  возникает ток в цепи вентиль  $VD1$ , резистор  $R_n$ , вентиль  $VD4$ ; в интервале  $t_2 \dots t_3$ :  $VD1$ ,  $R_n$ ,  $VD6$ . Ток в группе вентилях  $VD1$ ,  $VD3$ ,  $VD5$  может протекать только через один из них, подключенный к точке  $a$ ,  $b$  или  $c$  с наиболее высоким потенциалом. Два других вентиля закрыты, и проводящий вентиль обеспечивает потенциал точки  $k$ , равный наиболее высокому из потенциалов  $a$ ,  $b$  или  $c$  (рисунок 1.5,б). В группе вентилях  $VD2$ ,  $VD4$ ,  $VD6$  ток протекает через один из них, подключенный к точке  $a$ ,  $b$  или  $c$  с наиболее низким потенциалом. Тогда потенциал точки  $m$  равен наиболее низкому потенциалу точек  $a$ ,  $b$  или  $c$  (график  $\varphi_m$  рисунка 1.5,б).

Направление токов в  $R_n$  остается одинаковым, а выпрямленное напряжение  $u_n$  является разностью потенциалов точек  $k$  и  $m$  и определяется огибающими графиков  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  (рисунок 1.5,б). Напряжение  $u_n$  имеет малую пульсацию  $p=0,057$ , его постоянная составляющая

$$U_{n\text{ ср}} = \frac{6}{T} \int_{T/6}^{T/3} U_{n\text{ max}} \sin \omega t dt = \frac{3}{\pi} U_{n\text{ max}}$$

Амплитуда линейного напряжения трансформатора  $U_{2m} = \sqrt{2} U_2 = U_{n\text{ max}}$  (рисунок 1.5,б) и соотношение между  $U_{n\text{ ср}}$  и действующим значением линейного

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}$$

напряжения трансформатора  $U_{n\text{ ср}} = \frac{\pi}{3} U_2 = 1,35 U_2$ .

Так как ток в каждом вентиле протекает  $1/3$  периода, то выбор вентиля осуществляется по  $1/3$  тока нагрузки  $I_{\text{пр max}} \geq I_{n\text{ ср}}/3$ .

Выбор вентиля по обратному напряжению выполняют, исходя из максимального напряжения на закрытом вентиле:

$$U_{\text{обр max}} \geq U_{2m} = \frac{\pi}{3} U_{n\text{ ср}} = 1,045 U_{n\text{ ср}}$$

Достоинства выпрямителя: малая пульсация выпрямленного напряжения  $p=0,057$ , что позволяет отказаться от фильтров; отсутствие подмагничивания постоянным током сердечника трансформатора. Он применяется в устройствах средней и большой мощности.

Реальные трансформаторы и вентили имеют сопротивления. При изменении тока нагрузки  $I_{n\text{ ср}}$  возникают падения напряжения на сопротивлении вторичных обмоток трансформатора и прямом сопротивлении вентилях, в результате чего напряжение на

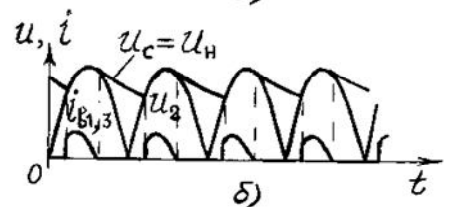
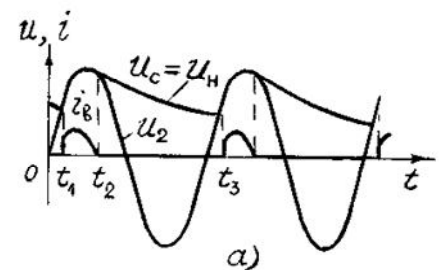


Рисунок 1.6



нагрузке уменьшается  $U_{н\text{ ср}} = \frac{U^X}{n} - (R_{np} + R_T) I_{н\text{ ср}}$  Зависимость  $U_{н\text{ ср}} = f(I_{н\text{ ср}})$  называют внешней характеристикой выпрямителя.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Основными элементами фильтров являются конденсаторы, индуктивные катушки и транзисторы, сопротивления которых различны для постоянного и переменного токов. Эффективность фильтра характеризуют коэффициентом сглаживания, равным отношению коэффициентов пульсаций до установки фильтра  $p_1$  и после установки фильтра  $p_2$ .

$$S = \frac{p_1}{p_2}$$

Емкостным фильтром служит конденсатор  $C_\phi$ , подключаемый параллельно нагрузке, при этом напряжение конденсатора  $u_c = u_n$  определяется процессами его заряда и разряда. В однополупериодном выпрямителе (рисунок 1.3,а) конденсатор  $C_\phi$  заряжается через вентиль, когда  $u_2 > u_c$  (интервал времени  $t_1 \dots t_2$  рисунок 1.6,а). Когда  $u_2 < u_c$  (интервал времени  $t_2 \dots t_3$ ), вентиль закрыт и конденсатор разряжается через резистор  $R_n$  с постоянной времени  $\tau_p = C_\phi R_n$  ( $u_c = U_{c(t=0)} e^{-t/\tau_p}$ ). Использование емкостного фильтра целесообразно в условиях  $R_n \gg R$  цепи заряда. Тогда быстрый процесс заряда конденсатора сменяется медленным его разрядом. Кривая  $u_c(t)$  – плавная, с малыми пульсациями.

Временные диаграммы двухполупериодного мостового выпрямителя с емкостным фильтром приведены на рисунке 1.6,б. Емкость конденсатора  $C_\phi$  вы-

бирают из условия:  $X_c = \frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_n; \quad C_\phi \gg \frac{1}{m\omega R_n},$

где  $m$  – число пульсаций выпрямленного напряжения.

Индуктивным фильтром служит индуктивная катушка с параметрами  $R_\phi$  и  $L_\phi$ , включаемая последовательно с сопротивлением нагрузки  $R_n$ . Несинусоидальное выпрямленное напряжение можно представить гармоническим рядом, состоящим из постоянной составляющей и суммы синусоид различных частот. Индуктивность  $L_\phi$  не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, а полное сопротивление цепи для гармоник тока

$Z_k = \sqrt{(R_n + R_\phi)^2 + (k\omega L_\phi)^2}$  возрастает с рос-

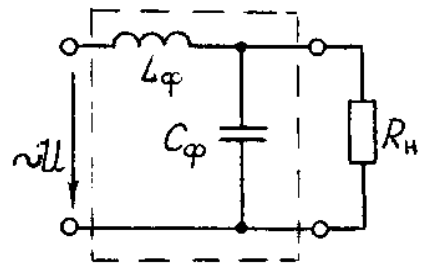


Рисунок 1.7

том номера гармоники  $k$ . Если  $R_{\phi} \ll R_n$  и  $\omega L_{\phi} \gg R_n$ , то при включении фильтра постоянная составляющая тока почти не изменяется, а переменные составляющие значительно меньше, и пульсации тока нагрузки, а значит, и напряжения  $u_n$  уменьшаются.

Более эффективное сглаживание выпрямленного напряжения получают с помощью Г-образных LC-фильтров (рисунок 1.7). Индуктивность катушки  $L_{\phi}$  уменьшает переменную составляющую тока, а емкость  $C_{\phi}$ , уменьшая эквивалентное сопротивление участка цепи  $R_n - C_{\phi}$ , снижает еще больше гармонические составляющие напряжения нагрузки.

В электронных фильтрах вместо индуктивных катушек включают транзисторы. Использование транзисторов обусловлено тем, что сопротивление промежутка коллектор-эмиттер постоянному току на 2-3 порядка меньше, чем переменному току, и пульсации уменьшаются в 3-5 раз.

### Предварительное задание к эксперименту

Для указанного в таблице 1.1 типа выпрямителя по заданным току  $I_{n\text{ ср}}$  и сопротивлению  $R_n$  нагрузки рассчитать напряжения  $U_{n\text{ ср}}$ ,  $U_2$ , коэффициент трансформации  $n$ , амплитуду обратного напряжения  $U_{\text{обр max}}$  и прямой ток  $I_{\text{пр ср}}$  вентиля. Напряжение питающей сети  $U_1=220$  В, частота  $f=50$  Гц.

Определить напряжение при холостом ходе  $U_{n\text{ ср}}^X$  ( $I_{n\text{ ср}}=0$ ), полагая сопротивление диодов и трансформатора  $R_{\text{пр}}+R_{\text{т}}=5$  Ом.

Результаты расчетов записать в таблицу 1.2.

Таблица 1.1

| Вариант               | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Тип выпрямителя       | Рис. 1.3 | Рис. 1.4 | Рис. 1.5 | Рис. 1.3 | Рис. 1.4 | Рис. 1.5 | Рис. 1.4 | Рис. 1.5 |
| $R_n$ , Ом            | 25       | 25       | 25       | 32       | 32       | 32       | 41       | 39       |
| $I_{n\text{ ср}}$ , А | 0,5      | 1,0      | 1,5      | 0,4      | 0,8      | 1,2      | 0,6      | 1,0      |

Таблица 1.2

|           | $R_{\text{пр}}+R_{\text{т}}$ | $I_{n\text{ ср}}$ | $U_{n\text{ ср}}$ | $U_2$ | $n$ | $U_{\text{обр max}}$ | $I_{\text{пр ср}}$ | $U_{n\text{ ср}}^X$ | $U_{n\text{ ср}}^X / U_2$ |
|-----------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------|-----|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
| Вычислено | 5                            | из табл. 1.1      |                   |       |     |                      |                    |                     |                           |
| Измерено  |                              |                   |                   |       |     |                      |                    |                     |                           |

### Порядок выполнения эксперимента



4. Собрать электрическую цепь по схеме однофазного мостового выпрямителя (рисунок 1.8, В1 отключен) и выполнить исследования согласно указаниям пп. 2,3.

5. Собрать электрическую цепь по схеме трехфазного мостового выпрямителя (рисунок 1.8, В1, В2 включены) и снять его внешнюю характеристику.

6. Измерить цифровым вольтметром напряжение  $U_2$  и вычислить для каж-

дого выпрямителя отношение  $U_{н\text{ ср}}^X / U_2^X$  в режиме холостого хода.

7. По внешней характеристике указанного в таблице 1.1 выпрямителя рассчитать сопротивление  $R_{нр} + R_{т}$ , сравнить результат с заданным в таблице 1.2.

8. Экспериментом проверить расчеты предварительного задания, результаты записать в таблицу 1.2.

### Содержание отчета

Цель работы; схемы исследованных выпрямителей (рисунки 1.3, 1.4, 1.5); расчет предварительного задания, таблица 1.2; таблица 1.3; графики внешних характеристик выпрямителей в общей системе координат; соотношения для выбора вентиля к выпрямителям рисунков 1.3, 1.4, 1.5 и соотношения между  $U_{н\text{ ср}}$  и  $U_2$ ; осциллограммы  $u_n(t)$ ; сравнительная оценка исследованных схем и выводы.

### Контрольные вопросы

1. Каковы основные параметры полупроводникового диода? 2. Принцип действия каждого рассмотренного выпрямителя, достоинства и недостатки. 3. Как выбирают вентили для выпрямителей и коэффициент трансформации трансформатора для выпрямительной установки? 4. Объяснить характер полученных внешних характеристик. К каким точкам внешних характеристик относятся зарисованные осциллограммы? 5. Каковы отношения  $U_{н\text{ ср}}/U_2$ ,  $U_{н\text{ ср}}/U_{н\text{ max}}$  для различных выпрямителей? Почему эти отношения указывают для режима холостого хода? 6. Что такое коэффициент пульсаций, чему он равен для различных выпрямителей? 7. Принцип действия емкостного, индуктивного, электронного и LC-фильтров. 8. Как определяется коэффициент сглаживания фильтра?

### Лабораторная работа 3.2

### УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Цель работы: изучение устройства и принципа действия управляемого выпрямителя, экспериментальное исследование его характеристик при работе на активную нагрузку

### Общие сведения

Регулирование выходного напряжения выпрямителя возможно с помощью реостата или потенциометра в цепи постоянного тока или автотрансформатора в цепи переменного тока. Оба способа просты, но имеют существенные недостатки: низкий КПД вследствие значительного потребления энергии регулирующими элементами, громоздкость и высокая стоимость регуляторов. В настоящее время широко применяют более экономичные и удобные управляемые выпрямители. В качестве вентилей в них используются тиристоры, позволяющие совместить процессы выпрямления и регулирования.

Тиристор представляет собой полупроводниковый прибор с тремя или более  $p$ - $n$ -переходами и тремя выводами. Структура, условное обозначение и

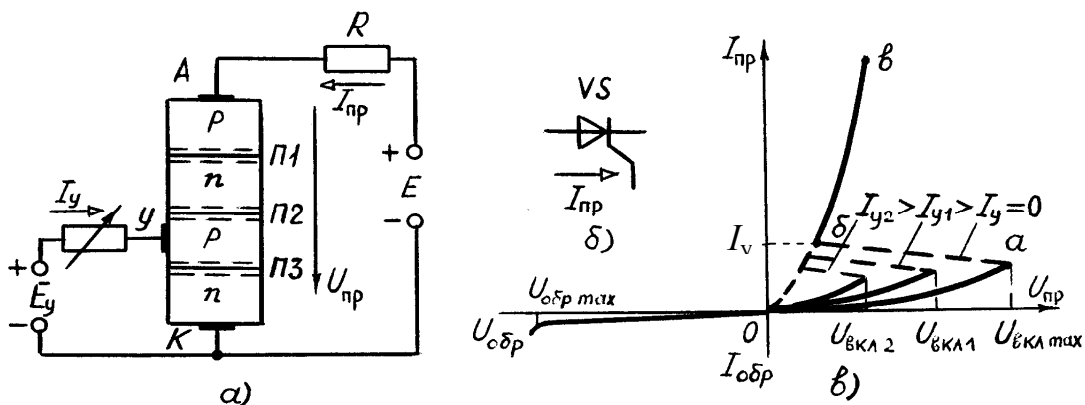


Рисунок 2.1

вольтамперная характеристика тиристора приведены на рисунке 2.1. Его основу составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний  $p$ -слой называют анодом (А), внешний  $n$ -слой – катодом (К), а два внутренних слоя – базами. Одна из баз имеет вывод – управляющий электрод (У). При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении и ток  $I_{np}$  определяется высоким сопротивлением закрытого перехода П2. До тех пор пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю. При поступлении на управляющий электрод импульсного сигнала за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается. Сопротивление его уменьшается и тиристор переходит на рабочую часть характеристики, подобную прямой вет-

ви характеристики диода. Таким образом, тиристор можно считать управляемым диодом, который проводит ток только в одном направлении после поступления разрешающего сигнала на управляющий электрод. Он остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания  $I_{уд}$ . Как только  $I_{пр}$  станет меньше  $I_{уд}$ , тиристор закрывается.

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3 и тиристор тока не проводит. Для нормальной работы тиристора надо, чтобы напряжение на нем не превышало при прямом и при обратном включении допустимых значений  $U_{вкл\ max}$  и  $U_{обр\ max}$ .

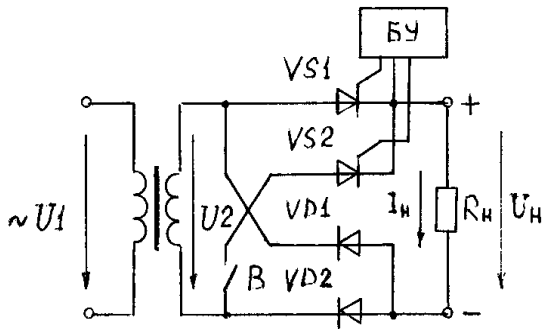


Рисунок 2.2

На рисунке 2.2 показана схема стенда для исследования управляемого выпрямителя. При отключенном выключателе **В** цепь тиристора  $VS2$  разомкнута и получаем схему однополупериодного выпрямителя на двух последовательно включенных вентилях  $VD2$  и  $VS1$ . Диод  $VD2$  открыт все положительные полупериоды напряжения, и процессы управления выпрямленным напряжением определяются работой тиристора  $VS1$ .

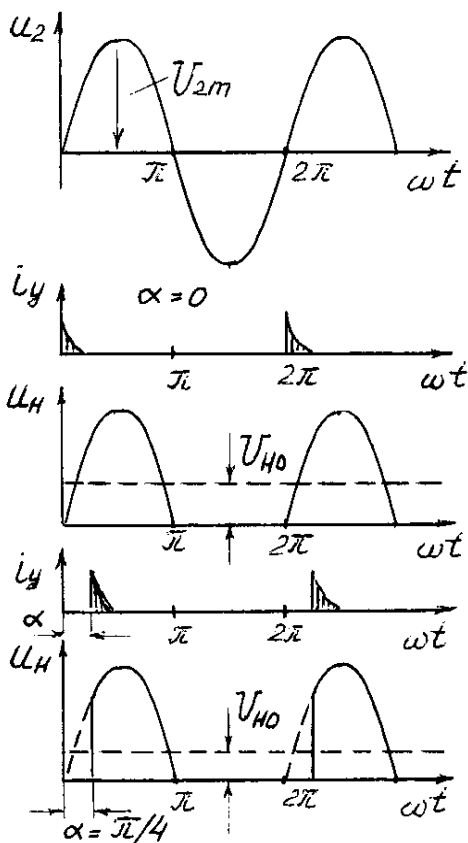


Рисунок 2.3

$$\frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_{2=0,45} U_2.$$

Если с помощью БУ импульсы  $i_y$  сместить на угол  $\alpha$  относительно напряжения  $u_2$ , то тиристор откроется с запаздыванием, и будет пропускать ток только часть полупериода от  $\alpha$  до  $\pi$ . В этом случае

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{H0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Таким образом, изменяя  $\alpha$  от  $0$  до  $180^\circ$ , можно плавно регулировать  $U_{H\text{ ср}}$  от  $U_{H0}$  до  $0$ . Ток нагрузки повторяет  $u_H$

$$I_{H\text{ ср}} = \frac{U_{H\text{ ср}}}{R_H} = I_{H0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Без управляющего тока  $i_y$  тиристор не откроется даже в положительные полупериоды  $u_2$ . Напряжение на нагрузке  $u_H$  и ток  $i_H$  будут равны нулю. Управляющий ток  $i_y$  в виде коротких импульсов вырабатывается и подается на управляющий электрод тиристора блоком управления БУ. Эти импульсы синхронизированы с положительными полупериодами напряжения  $u_2$ . С помощью потенциометра их можно смещать по фазе относительно  $u_2$  на угол  $\alpha$ , называемый углом управления. Угол  $\alpha$  можно изменять в пределах от  $0$  до  $180^\circ$ .

Если управляющие импульсы приходят на тиристор в начале каждого положительного полупериода ( $\alpha=0^\circ$ ), то тиристор сразу открывается и ток через нагрузку протекает весь полупериод (рисунок 2.3) Среднее напряжение на нагрузке будет такое же, как и при работе неуправляемого выпрямителя

$$U_{H0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t =$$

При включенном выключателе **B** работают все четыре вентиля и получаем схему мостового управляемого выпрямителя. Принцип работы тиристоров в этой схеме не отличается от описанного выше. Управляющие импульсы  $i_y$  подаются на  $VS1$  и  $VS2$  синхронно с положительными полупериодами напряжения на каждом из них.

Среднее значение выпрямленного напряжения вдвое больше, чем при однополупериодном выпрямлении

$$U_{н\text{ ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = U_{но} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \text{ где } U_{но} = 0,9U_2.$$

Возможности управляемых выпрямителей определяют две основные характеристики:

Характеристика управления, представляющая зависимость  $U_{н\text{ ср}}(\alpha)$  при  $R_n = \text{const}$ .

Внешняя характеристика, отражающая зависимость  $U_{н\text{ ср}}(I_{н\text{ ср}})$  при  $\alpha = \text{const}$ .

Предварительное задание к эксперименту

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора (рисунок 2.2)  $U_2 = 30$  В, частота  $f = 50$  Гц. Для заданного в таблице 2.1 управляемого выпрямителя и угла управления  $\alpha$ :

- 1) рассчитать  $U_{2m}$  и построить в масштабе временную диаграмму напряжения на нагрузке (не менее 2 периодов);
- 2) рассчитать среднее напряжение на нагрузке и указать его на построенной временной диаграмме;
- 3) рассчитать и построить в масштабе характеристику управления  $U_{н\text{ ср}}(\alpha)$ , полагая трансформатор и вентили идеальными;
- 4) определить, на какие напряжения  $U_{обр\text{ max}}$  и  $U_{вкл\text{ max}}$  должны быть выбраны вентили для заданного выпрямителя, работающего на активную нагрузку.

Результаты расчетов записать в таблицу 2.2.

Таблица 2.1

| Вариант          | 1                 | 2  | 3  | 4   | 5        | 6  | 7  | 8   |
|------------------|-------------------|----|----|-----|----------|----|----|-----|
| Выпрямитель      | однополупериодный |    |    |     | мостовой |    |    |     |
| $\alpha, ^\circ$ | 30                | 60 | 90 | 120 | 30       | 60 | 90 | 120 |

Таблица 2.2

|           | $\alpha, ^\circ$ | $U_2, \text{ В}$ | $U_{2m}, \text{ В}$ | $U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$ | $U_{обр\text{ max}}, \text{ В}$ | $U_{вкл\text{ max}}, \text{ В}$ |
|-----------|------------------|------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Вычислено | из табл. 2.1     |                  |                     |                              |                                 |                                 |
| Измерено  |                  |                  |                     |                              |                                 |                                 |



### Порядок выполнения работы

Собрать электрическую цепь по схеме рисунка 2.2 (выключатель **В** разомкнут). К зажимам нагрузки  $R_n$  подключить осциллограф.

Изменяя с помощью  $R_n$  ток нагрузки от нуля до наибольшего значения, снять внешние характеристики однополупериодного выпрямителя  $U_{н\text{ ср}}(I_{н\text{ ср}})$  для трех значений угла управления  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ). Результаты измерений записать в таблицу 2.3.

Таблица 2.3

|                    |                              |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $\alpha=0^\circ$   | $U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$ |  |  |  |  |  |  |
|                    | $I_{н\text{ ср}}, \text{ А}$ |  |  |  |  |  |  |
| $\alpha=60^\circ$  | $U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$ |  |  |  |  |  |  |
|                    | $I_{н\text{ ср}}, \text{ А}$ |  |  |  |  |  |  |
| $\alpha=120^\circ$ | $U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$ |  |  |  |  |  |  |
|                    | $I_{н\text{ ср}}, \text{ А}$ |  |  |  |  |  |  |

3. При среднем значении  $R_n$ , изменяя угол управления от 0 до максимального, снять характеристику управления однополупериодного выпрямителя  $U_{н\text{ ср}}(\alpha)$  при  $R_n=\text{const}$ . Результаты измерений записать в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

| $\alpha, ^\circ$             | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 |
|------------------------------|---|----|----|----|-----|-----|
| $U_{н\text{ ср}}, \text{ В}$ |   |    |    |    |     |     |

4. Проследить на экране осциллографа за изменением формы кривой  $u_n(t)$  при разных  $\alpha$ . Зарисовать в масштабе эти кривые для трех значений  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) и для  $\alpha$ , указанного в предварительном задании. Измерить вольтметром среднее значение напряжения  $U_{н\text{ ср}}$  для данных  $\alpha$  и указать на осциллограммах.

5. Выключателем **В** включить диод  $VD2$ . Исследовать однофазный мостовой управляемый выпрямитель согласно пунктам 2-4.

6. По результатам измерений в общих координатах построить семейства внешних характеристик при заданных значениях  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) для обоих выпрямителей.

7. По внешним характеристикам определить внутреннее сопротивление выпрямителя. Для этого представить выпрямитель эквивалентным генератором с  $E_3=U_{н\text{ х}}$ .

8. На построенной в предварительном задании характеристике управления нанести экспериментальные точки из таблицы 2.4.

9. Экспериментально проверить расчеты предварительного задания, результаты записать в таблицу 2.2. Сравнить экспериментальные характеристики и осциллограммы с полученными в предварительном задании.

### Содержание отчета

Цель работы и схема исследуемого выпрямителя; расчет (таблица 2.2) и графики предварительного задания; осциллограммы  $u_n(t)$  для обоих выпрямителей; таблицы измерений; характеристики выпрямителей ( $U_{н\text{ ср}}(\alpha)$ ,  $U_{н\text{ ср}}(I_{н\text{ ср}})$ ); сравнительная оценка исследованных схем и выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называют управляемым выпрямителем? 2. Для чего применяются эти выпрямители? 3. Каковы их основные достоинства? 4. Что такое тиристор? 5. Каковы его принцип действия, основные характеристики и параметры? 6. Почему тиристоры применяют в качестве вентилях в управляемых выпрямителях? 7. Назовите основные элементы управляемых выпрямителей и их назначение. 8. Что такое угол управления  $\alpha$  и как его можно измерить с помощью осциллографа? 9. Каковы основные характеристики управляемого выпрямителя? 10. Можно ли в мостовой схеме в качестве вентилях использовать четыре тиристора?

### Лабораторная работа 3.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора постоянного напряжения на полупроводниковых приборах.

### Общие сведения

Многие устройства, источником питания которых служит выпрямитель, требуют для нормальной работы высокой стабильности питающего напряжения. Между тем выходное напряжение выпрямителя значительно меняется при колебаниях напряжения в сети переменного тока и при изменении нагрузки. В этих случаях между выпрямителем и нагрузкой включают стабилизатор.

Стабилизатором называют устройство, автоматически поддерживающее на нагрузке напряжение с требуемой точностью при изменении питающего напряжения и сопротивления нагрузки в обусловленных пределах.

Основным параметром, характеризующим стабилизатор, является коэффициент стабилизации, который представляет собой отношение изменения напряжения на входе к изменению напряжения на выходе стабилизатора:

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} : \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}$$

Качество работы стабилизатора под нагрузкой оценивается внешней характеристикой  $U_{\text{вых}}(I_{\text{вых}})$  или выходным сопротивлением:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}}; U_{\text{вх}} = \text{const}$$

Применяют два типа стабилизаторов напряжения: параметрические и компенсационные.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой, обеспечивающей постоянство напряжения на элементе при значительных изменениях протекающего через него тока. Такими элементами могут быть полупроводниковые стабилитроны. Коэффициент стабилизации для этого типа стабилизаторов достигает 30 ... 50. Недостатками являются небольшой коэффициент полезного действия, не превышающий 0.3,

и большое внутреннее сопротивление (5 ... 20 Ом).

Компенсационные стабилизаторы напряжения обладают большим коэффициентом стабилизации и меньшим внутренним сопротивлением. Они представляют собой систему автоматического регулирования с отрицательной обратной связью.

Блок-схема компенсационного стабилизатора

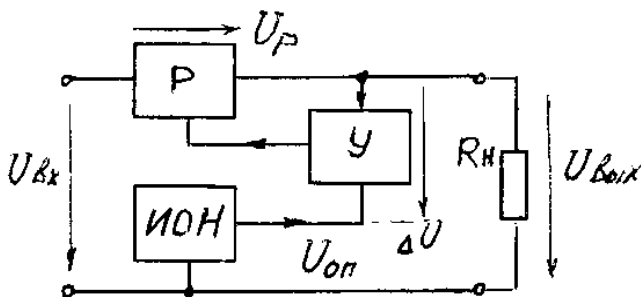


Рисунок 3.1

приведена на рисунке 3.1. Она состоит из регулирующего элемента **Р**, управляющего элемента **У** и источника опорного напряжения **ИОН**.

Принцип действия компенсационного стабилизатора основан на непрерывном сравнении напряжения нагрузки  $U_{\text{вых}}$  (или части его) с опорным (образцовым) напряжением. Разность  $\Delta U = U_{\text{оп}} - U_{\text{вых}}$  усиливается и подается на регулирующий элемент (обычно транзистор), сопротивление которого изменяется в зависимости от величины и знака  $\Delta U$ , компенсируя изменения  $U_{\text{вых}}$ .

В данной работе предлагается исследовать простейший компенсационный стабилизатор, схема которого приведена на рисунке 3.2. В качестве источника опорного напряжения используется параметрический стабилизатор на стабилитроне  $VD$ , режим работы которого задается резистором  $R1$ . Управляющим элементом служит транзистор  $VT2$ , потенциал эмиттера которого постоянен, а база подключена через делитель  $R3, R4$  на часть выходного напряжения. Изменение  $U_{\text{вых}}$  приводит к изменению напряжения на эмиттерном переходе  $VT2$ , изменению тока базы  $I_{B2}$  и тока коллектора  $I_{K2}$ . Но  $I_{K2} + I_{B1} = I_1 \approx \text{const}$ , поэтому изменение  $I_{K2}$  вызывает противоположное изменение тока  $I_{B1}$ , который управляет падением напряжения на регулирующем транзисторе  $VT1$ .

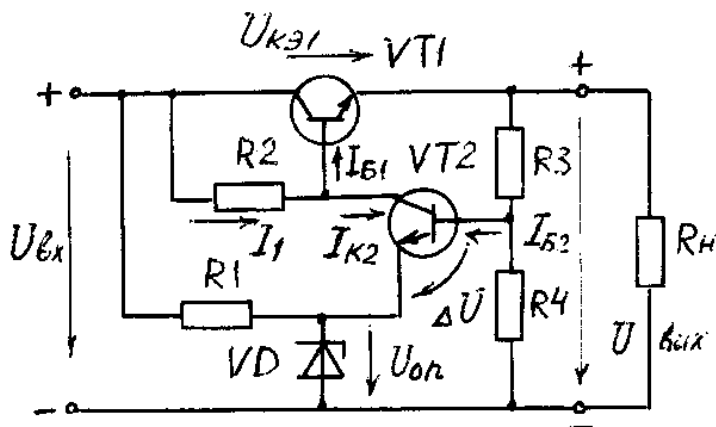


Рисунок 3.2

Пусть  $U_{\text{вых}}$  уменьшилось, тогда уменьшится  $\Delta U = U_{B2}$  и соответственно  $I_{B2}$  и  $I_{K2}$ . Ток базы регулирующего транзистора  $I_{B1}$  увеличивается, транзистор  $VT1$  откроется и  $U_{KЭ1}$  уменьшится. Это поддержит  $U_{\text{вых}}$  в заданных пределах, так как  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{KЭ1}$ .

В последнее время широко применяются компенсационные стабилизаторы в интегральном исполнении. Например, микросхема К142ЕН1 представляет собой регулируемый стабилизатор напряжения с пределами регулирования от 3 до 12 В на ток до 150 мА. Он имеет защиту от перегрузки и коротких замыканий на выходе.

#### Предварительное задание к эксперименту

Для стабилизатора с  $K_{\text{ст}} = 40$ , номинальным входным напряжением  $U_{\text{вх}} = 24$  В и выходным  $U_{\text{вых}} = 12$  В определить изменение выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}}$  при заданном в таблице 3.1 изменении входного  $\Delta U_{\text{вх}}$ .

Напряжение холостого хода стабилизатора  $U_{\text{вых}} = 12$  В, выходное (внутреннее) сопротивление  $R_{\text{вых}} = 3$  Ом. Определить напряжение на нагрузке при заданном токе нагрузки  $I_{\text{н}}$ .

Таблица 3.1

|                                   |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Вариант                           | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| $\Delta U_{\text{вх}}, \text{ В}$ | 12 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| $I_{\text{н}}, \text{ мА}$        | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 45 | 40 |

### Порядок выполнения эксперимента

1. Подать на входные зажимы стенда напряжение от лабораторного автотрансформатора ЛАТР. Для измерения выходного напряжения подключить цифровой вольтметр.

Снять зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  стабилизатора при максимальном сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$  (потенциометр  $R_{\text{н}}$  влево до упора), регулируя  $U_{\text{вх}}$  от 0 до 30 В. Результаты измерений записать в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

|                             |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}, \text{ В}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{\text{вых}}, \text{ В}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |

Снять внешнюю характеристику стабилизатора  $U_{\text{вых}}(I_{\text{вых}})$  при  $U_{\text{вх}} = \text{const}$ . Предварительно установить на холостом ходу  $U_{\text{вых}} = 12 \text{ В}$ , регулируя с помощью ЛАТРа  $U_{\text{вх}}$ . Результаты измерений записать в таблицу 3.3. Ток нагрузки изменять с помощью потенциометра  $R_{\text{н}}$ .

Таблица 3.3

|                              |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{вых}}, \text{ мА}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $U_{\text{вых}}, \text{ В}$  |  |  |  |  |  |  |  |  |

4. По результатам измерений построить графики  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  и  $U_{\text{вых}}(I_{\text{вых}})$ . На первом из них указать рабочий диапазон стабилизатора и для него определить коэффициент стабилизации.

5. Сравнить результаты расчетов предварительного задания с результатами эксперимента.

6. По внешней характеристике определить выходное сопротивление стабилизатора.

### Содержание отчета

Цель работы; полная схема компенсационного стабилизатора (рисунок 3.2) с обозначением всех элементов и указанием токов и напряжений; результаты расчета предварительного задания; результаты эксперимента в виде таблиц и

графиков; расчет коэффициента стабилизации и выходного сопротивления стабилизатора; сравнительный анализ результатов.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов? 2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор? 3. Поясните назначение основных элементов компенсационного стабилизатора 4. Какую роль в схеме играет стабилитрон  $VD$ ? 5. Можно ли включить базу  $VT2$  на напряжение  $U_{\text{вых}}$  непосредственно, без делителя  $R_3, R_4$ ? 6. Как можно осуществить регулирование  $U_{\text{вых}}$ ? 7. Изменится ли коэффициент стабилизации стабилизатора, если цепь стабилитрона через  $R_1$  питать от независимого источника постоянного напряжения?

### Лабораторная работа 3.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение принципа действия и определение основных параметров и характеристик однокаскадного транзисторного усилителя.

### Общие сведения

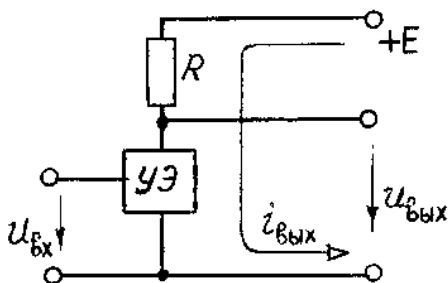


Рисунок 4.1

Усилителем называют устройство, позволяющее увеличить напряжение, ток, мощность слабых электрических сигналов. В усилителях используют биполярные и полевые транзисторы, а последние годы - интегральные микросхемы (ИМС). Усилители на ИМС обладают высокой надежностью и экономичностью, большим быстродействием, имеют малые размеры и массу, высокую чувствительность. Они обеспечивают усиление очень слабых сигналов (напряжение порядка  $10^{-13}$  В, токи до  $10^{-17}$  А, мощность порядка  $10^{-24}$  Вт).

Многие усилители состоят из нескольких ступеней, осуществляющих последовательное усиление сигнала и называемых каскадами. В зависимости от выполняемых функций усилительные каскады подразделяют на каскады предварительного усиления, предназначенные для повышения уровня сигнала

по напряжению, и выходные каскады – для получения требуемых тока или мощности в нагрузке.

Рассмотрим принцип построения и работы усилительного каскада на структурной схеме рисунка 4.1. Основными элементами являются управляемый элемент УЭ (биполярный или полевой транзистор) и резистор  $R$ , которые совместно с источником питания  $E$  образуют выходную цепь каскада. Усиление выходного сигнала  $u_{\text{вых}}$  происходит за счет энергии источника постоянного напряжения  $E$ . При подаче входного сигнала  $u_{\text{вх}}$  изменяются сопротивление УЭ и ток выходной цепи  $i_{\text{вых}}$  по закону, задаваемому  $u_{\text{вх}}$ . Переменная составляющая  $i_{\text{вых}}$  создает переменный сигнал  $u_{\text{вых}}$ . Усилительные свойства каскада зависят от степени влияния  $u_{\text{вх}}$  на ток управляемого элемента. Чем больше изменяется ток, тем больше будет падение напряжения на резисторе  $R$ , а значит, и сигнал  $u_{\text{вых}}$ , который также зависит и от величины  $R$ .

Основные параметры усилительного каскада:

- коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по току

$$K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}};$$

- коэффициент усиления по мощности

$$K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} I_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} I_{\text{вх}} = K_U K_I;$$

(в соотношениях используются амплитуды тока и напряжения).

В настоящей работе исследуется усилитель на биполярном транзисторе, который выполняет роль управляемого элемента. Транзистор - это полупроводниковый прибор с двумя  $p$ - $n$ -переходами, имеющий три вывода. В зависимости от чередования областей полупроводников с различными типами электропроводности различают транзисторы типа  $p$ - $n$ - $p$  и типа  $n$ - $p$ - $n$ . Их схематическое устройство и условное графическое обозначение показано на рисунке 4.2.

Центральный слой транзистора называют базой (Б), наружный слой, являющийся источником зарядов (электронов или дырок), – эмиттером(Э), а наружный слой, принимающий заряды, – коллектором(К).

На переход эмиттер – база напряжение источника  $E_э$  подается в прямом направлении, и прямое сопротивление перехода мало, поэтому даже при малых  $E_э$  возникает значительный ток эмиттер – база  $I_э$ . На переход коллектор-база напряжение источника  $E_к$  подается в обратном направлении.

Рассмотрим работу транзистора типа  $p-n-p$  (рисунок 4.2) (транзистор типа  $n-p-n$  работает аналогично). При отсутствии источника  $E_3$  эмиттерный ток  $I_3=0$ , и в транзисторе через коллекторный переход в обратном направлении протекает малый ток (у кремниевых транзисторов  $I_{к0}=0,1 \dots 10 \text{ мкА}$ ).

При подключении источника  $E_3$  возникает эмиттерный ток  $I_3$ : дырки преодолевают переход эмиттер-база и попадают в область базы, где частично ре-

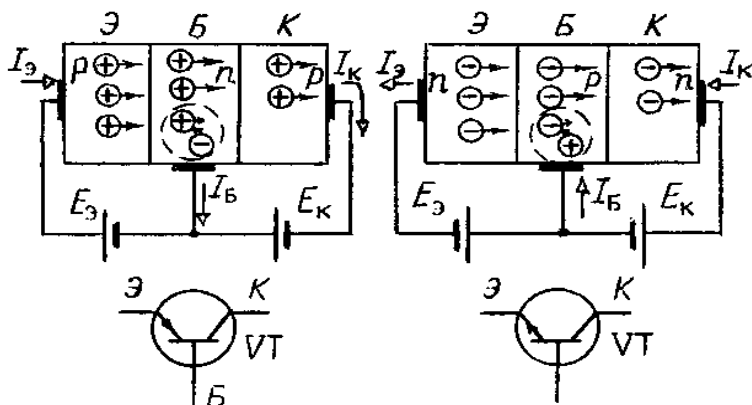


Рисунок 4.2

комбинируют со свободными электронами базы. Убыль электронов в базе пополняется электронами, поступающими из внешней цепи, образуя ток базы  $I_6$ . Благодаря диффузии часть дырок в базе, продолжая движение, доходит до коллектора и под действием электрического поля источника  $E_K$  проходит коллекторный  $p-n$ -переход. В цепи база-коллектор протекает ток  $I_K=I_3-I_6$ .

Соотношение между приращениями эмиттерного и коллекторного токов характеризуют коэффициентом передачи тока

$$\alpha = \left. \frac{dI_K}{dI_3} \right|_{U_{к6}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_3} \right|_{U_{к6}=\text{const}}$$

Так как  $\Delta I_K < \Delta I_3$ , то для биполярных транзисторов  $\alpha=0,9 \dots 0,995$ , и ток коллектора  $I_K=I_{к0}+\alpha I_3 \approx I_3$ .

Рассмотренная схема включения транзистора, где база является общим электродом для эмиттерной и коллекторной цепей, называется схемой с общей базой. Ее применяют крайне редко из-за низкого коэффициента передачи тока.

Существует три способа включения транзистора: с общей базой, с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (электрод, находящийся на входе и выходе схемы одновременно, определяет название схемы). Основной является схема с общим эмиттером (рисунок 4.3,а), в которой входной ток равен току базы

$$I_6=I_3-I_K=I_3-(I_{к0}+\alpha I_3)=(1-\alpha)I_3-I_{к0} \ll I_3 \approx I_K.$$



Широкое применение схемы с общим эмиттером обусловлено малым входным (управляющим) током  $I_6$ . Коэффициент передачи тока для схемы с общим эмиттером  $\beta = \Delta I_K / \Delta I_6$  колеблется в пределах 10 ... 200.

Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 4.3,б) отражают зависимость тока базы от напряжения, приложенного между базой и эмиттером, при  $U_{кэ} = \text{const}$ . Они мало зависят от  $U_{кэ}$ , поэтому обычно приводят одну характеристику  $I_6(U_{6э})$ .

Выходные характеристики отражают зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при  $I_6 = \text{const}$  (рисунок 4.3,в).

Рассмотрим один из наиболее распространенных усилительных каскадов на транзисторах – каскад с общим эмиттером (рисунок 4.4,а).

Источник усиливаемого сигнала подключается к входной цепи каскада (между базой и эмиттером) через конденсатор  $C1$ , а нагрузка  $R_n$  – к выходу каскада через конденсатор  $C2$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разделяют эти цепи по постоянному току и связывают их по переменному. В выходную цепь включается источник  $E_k$ , за счет которого происходит усиление мощности выходного сигнала.

Напряжение покоя между базой и эмиттером  $U_{6эп}$  определяется делителем

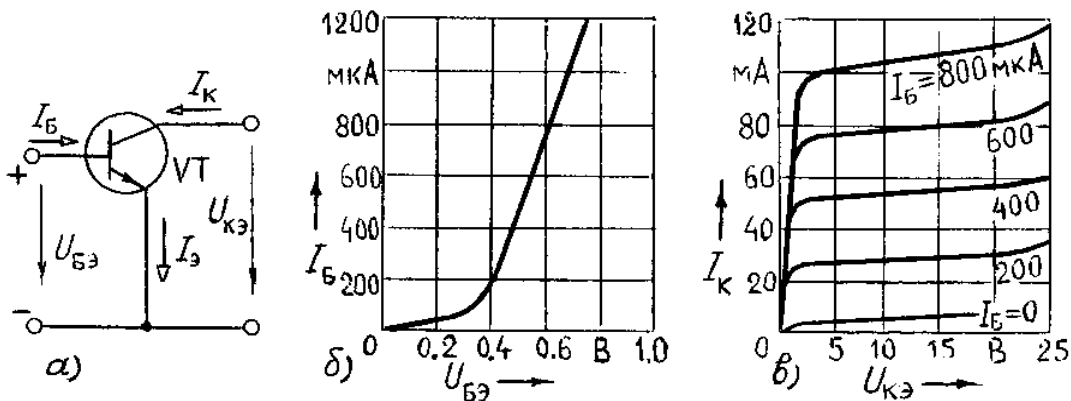


Рисунок 4.3

напряжении  $R1 - R2$  и резистором  $R_3$ , в результате возникают токи базы  $I_{6п}$  и коллектора  $I_{кп}$ . Режим работы усилителя при  $u_{вх} = 0$  называют режимом покоя.

При подаче входного сигнала  $u_{вх}$  на постоянную составляющую тока  $I_{6п}$  накладывается переменная составляющая  $i_6$ , и ток базы становится пульсирующим  $i_6$  (рисунок 4.4, б). Он вызывает пульсацию тока коллектора  $i_k = \beta i_6$  и коллекторного напряжения  $u_k$ . Переменная составляющая напряжения  $u_k$  через конденсатор  $C2$  передается в нагрузку:  $u_n = u_{вых}$ .

По второму закону Кирхгофа для выходной цепи

$$E_k = u_k + R_k i_k = (U_{кп} + u_{к-}) + R_k (I_{кп} + i_{к-}).$$

Так как  $E_k = \text{const}$  и режим по постоянному току не меняется, то видно, что с увеличением тока  $i_{к-}$  напряжение  $u_{к-}$  уменьшается, оно сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на  $180^\circ$  (рисунок 4.4, б).

Недостатком полупроводниковых усилителей является зависимость их па-

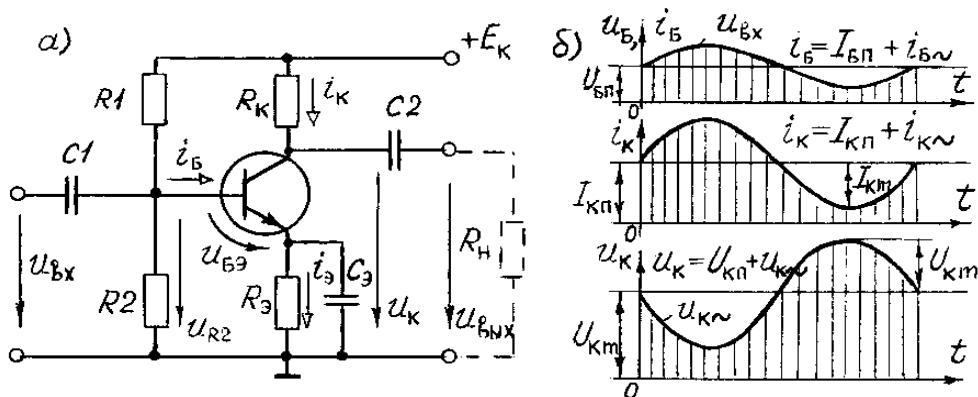


Рисунок 4.4

раметров от температуры. Для уменьшения влияния температуры в рассмотренном усилительном каскаде с ОЭ применена эмиттерная температурная стабилизация: в цепь эмиттера включен резистор  $R_3$ , шунтированный конденсатором  $C_3$ . С увеличением температуры возрастают токи транзистора  $I_{кп}$ ,  $I_{эп}$ , но возникающее падение напряжения на резисторе  $R_3$  уменьшает напряжение  $U_{бэп} = U_{R2} - R_3 I_{эп}$  (при  $U_{R2} = \text{const}$ ), что повлечет уменьшение токов  $I_{бп}$ ,  $I_{эп}$ ,  $I_{кп}$ . Стабилизация тем эффективнее, чем больше  $R_3$ . Но падение напряжения на  $R_3$  уменьшает  $U_{бэ}$  и снижает коэффициент усиления, что нежелательно. Это явление называют отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС по переменному напряжению резистор  $R_3$  шунтируют конденсатором  $C_3$ , сопротивление которого  $X_{C3} \ll R_3$ , для всех частот  $u_{вх}$ . Тогда падение напряжения на участке  $R_3 - C_3$  от переменной составляющей  $i_3$  незначительно, и усиливаемое напряжение практически не меняется:  $u_{бэ} \approx u_{вх}$ .

Основные характеристики усилителя: амплитудная  $U_{вых}(U_{вх})$  и амплитудно-частотная  $K_U(f)$ , определяющая

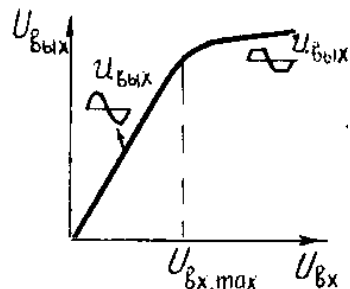


Рисунок 4.5

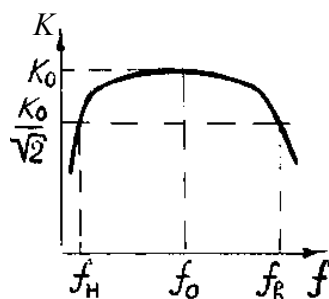


Рисунок 4.6

зависимость модуля коэффициента усиления напряжения от частоты усиленного сигнала.

Амплитудная характеристика (рисунок 4.5) позволяет определить диапазон входного напряжения, в пределах которого зависимость  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  линейная. При большой амплитуде входного напряжения  $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх, max}}$  появляются нелинейные искажения  $u_{\text{вых}}$ , обусловленные нелинейностью входной и выходной характеристик транзистора (рисунок 4.3, б, в).

Амплитудно-частотная характеристика (рисунок 4.6) важна при усилении несинусоидальных сигналов, так как гармонические составляющие  $u_{\text{вх}}$  усиливаются в различной степени, и форма  $u_{\text{вых}}$  искажается. По амплитудно-частотной характеристике определяют полосу пропускания усилителя – диапазон от низших  $f_{\text{н}}$  до высших  $f_{\text{в}}$  частот, в котором коэффициент усиления  $K_U \geq K_0 / \sqrt{2}$ , где  $K_0$  – максимальный коэффициент усиления.

Уменьшение  $K_U$  при низших частотах обусловлено влиянием конденсаторов

$\frac{1}{\omega C}$

$C_1, C_2, C_3$ . С понижением частоты  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  увеличивается, и возрастают падения напряжения на конденсаторах. В диапазоне средних частот влиянием разделительных конденсаторов можно пренебречь из-за малости их сопротивления, и коэффициент усиления максимален. В области высших частот усилительные свойства ухудшаются.

Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4.4, а), проанализировать назначение всех его элементов. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта в таблице 4.1.

Таблица 4.1

| Вариант | Вопрос  |
|---------|---|
| 1       | Назначение конденсатора $C_2$ . Какое влияние он оказывает на коэффициент усиления $K_U$ ?  |
| 2       | Как изменится коэффициент усиления $K_U$ , если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ увеличится?   |
| 3       | Каково назначение элементов $R_3, C_3$ ? Изменится ли коэффициент усиления $K_U$ , если исключить конденсатор $C_3$ ?                     |
| 4       | Как изменится амплитуда выходного сигнала $u_{\text{вых}}$ , если $R_{\text{н}}$ уменьшится при неизменной амплитуде входного сигнала?    |
| 5       | Почему конденсаторы $C_1, C_2$ называют разделительными? Как изменится выходной сигнал $u_{\text{вых}}$ , если емкость конденсатора $C_2$ |

|   |   |
|---|---|
|   | увеличится при неизменной амплитуде входного сигнала?   |
| 6 | Что такое отрицательная обратная связь (ООС)? Как ослабляется в усилителе ООС по переменному напряжению? Как изменится $u_{\text{ВЫХ}}$ , если емкость $C_3$ уменьшить до нуля? |
| 7 | Назначение резистора $R_3$ . Что такое отрицательная обратная связь по постоянному напряжению? Каково влияние конденсатора $C_3$ на коэффициент усиления $K_U$ ?                |
| 8 | Как изменится коэффициент усиления $K_U$ , если емкость конденсатора $C_2$ уменьшится?  |

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать электрическую цепь по схеме однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4.4,а).

2. Подготовить к работе осциллограф, генератор звуковых частот и цифровой вольтметр: подключить питание, прогреть в течение 5 минут. Подключить цифровой вольтметр для измерения выходного напряжения усилителя (зажимы  $R_H$ ) и электронный осциллограф для визуального наблюдения этого напряжения. Подать на вход усилителя напряжение от генератора звуковых частот.

3. Изменяя напряжение  $u_{\text{ВХ}}$  от 0 до 100 мВ (6 ... 7 значений), снять амплитудные характеристики усилителя  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$  при частоте входного сигнала  $f=1000$  Гц для двух значений нагрузки  $R_H=1$  кОм и  $R_H=10$  кОм. Амплитуду выходного напряжения  $u_{\text{ВЫХ}}$  при синусоидальной его форме определить, умножив показание цифрового вольтметра на  $\sqrt{2}$ . При искажении выходного сигнала измерение его амплитуды выполнять с помощью осциллографа, определив масштаб по оси "У". Результаты измерений записать в таблицу 4.2, построить графики в общей системе координат.

Таблица 4.2

|                      |                      |   |  |  |  |  |  |
|----------------------|----------------------|---|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{ВХ}}$ , мВ |                      |   |  |  |  |  |  |
| $R_H=1$ кОм          | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |   |  |  |  |  |  |
| $R_H=10$ кОм         |                      | В |  |  |  |  |  |

Таблица 4.3

|              |                      |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------|----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
|              | $f$ , Гц             |  |  |  |  |  |  |  |
| $C_2=1$ мкФ  | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |  |  |  |  |  |  |  |
|              | $K_U$                |  |  |  |  |  |  |  |
| $C_2=10$ мкФ | $U_{\text{ВЫХ}}$ , В |  |  |  |  |  |  |  |
|              | $K_U$                |  |  |  |  |  |  |  |

4. Определить с помощью осциллографа, при каком напряжении  $U_{\text{вх}}$  наступает заметное искажение формы  $u_{\text{вых}}(t)$ . Зарисовать для этого режима кривую  $u_{\text{вых}}(t)$ . Отметить значение  $U_{\text{вх}}$  на графиках  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ .

5. Определить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  для двух значений сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}=1 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{н}}=10 \text{ кОм}$  при  $U_{\text{вх}}=10 \text{ мВ}$ .

6. Изменяя частоту входного напряжения от 20 Гц до 200000 Гц, снять амплитудно-частотные характеристики  $K_U(f)$  при  $U_{\text{вх}}=5 \text{ мВ}$ ,  $R_{\text{н}}=1 \text{ кОм}$  для двух значений емкости  $C_2$ : 1 мкФ и 10 мкФ.

Результаты измерений записать в таблицу 4.3 и построить графики  $K_U(f)$  в общей системе координат. Определить и указать на графиках полосу пропускания усилителя.

7. Экспериментально проверить правильность ответа на вопрос предварительного задания.

### Содержание отчета

Цель работы; схема однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рисунок 4.4,а); обоснованный ответ на вопрос предварительного задания; таблицы измерений, графики амплитудных  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  и амплитудно-частотных  $K_U(f)$  характеристик усилителя, расчетные значения  $K_U$ , полоса пропускания усилителя для двух значений емкости  $C_2$ ; оценка влияния нагрузки  $R_{\text{н}}$  и емкости связи  $C_2$  на коэффициент усиления  $K_U$ , выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое биполярный транзистор? Каково его устройство и принцип работы в схеме с ОЭ? 2. Объяснить принцип действия транзисторного усилителя. Каково назначение транзистора в усилительном каскаде? 3. Какими параметрами характеризуется усилитель? 4. Как снимается амплитудная и амплитудно-частотная характеристики каскада? 5. Как определить полосу пропускания усилителя? 6. Как осуществляется температурная стабилизация в усилителе? 7. В чем причины появления нелинейных искажений выходного напряжения и спада амплитудно-частотной характеристики на низких и высоких частотах?

### Лабораторная работа 3.5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: исследование усилительных свойств операционного усилителя (ОУ); изучение типовых схем и аналоговых устройств на базе ОУ.

## Общие сведения

Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = 3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$  и высокое входное сопротивление  $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм} \dots 10 \text{ МОм}$ . Современные ОУ выполняются в интегральном исполнении двух- и трехкаскадными. Основу ОУ составляет дифференциальный усилитель, служащий входным каскадом, а выходной каскад – обычно эмиттерный повторитель, обеспечивающий должную нагрузочную способность.

Массовое применение ОУ обусловлено их универсальностью: могут осуществлять усиление с постоянным коэффициентом, сложение, вычитание, дифференцирование, интегрирование сигналов, сравнение электрических величин, генерацию сигналов разной формы и др.

Условное обозначение ОУ показано на рисунке 5.1. ОУ имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на неинвертирующе-

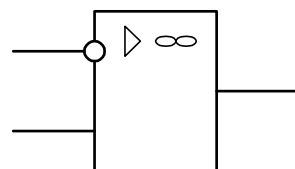
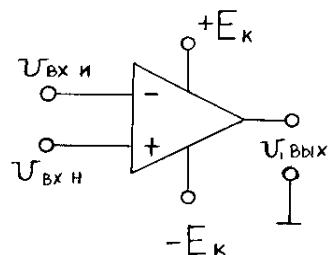


Рисунок 5.1

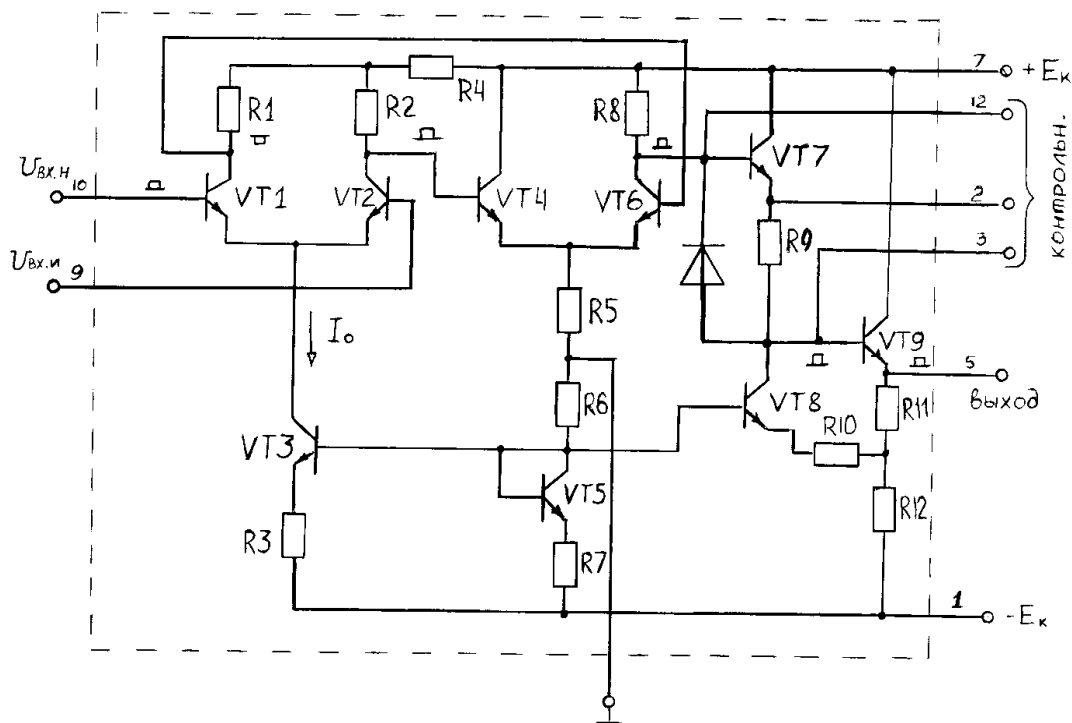


Рисунок 5.2



$K_{UOY} \rightarrow \infty$ , то напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{\text{ВЫХ}}/K_{UOY} \rightarrow 0$ , тогда  $U_{\text{ВХ}}/R_1 = -U_{\text{ВЫХ}}/R_{\text{ОС}}$ .

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}.$$

Коэффициент усиления  $K_{UI} =$

Для уменьшения погрешностей от изменения входных токов делают симметричными входы, выбирая  $R_2 = R_1 \parallel R_{\text{ОС}}$ .

Неинвертирующий усилитель (рисунок 5.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного. Выразим ток в резисторе  $R_1$ , полагая  $U_0 = 0$ ,  $I_{\text{ОУ}} = 0$ :  $U_{\text{ВЫХ}}/(R_1 + R_{\text{ОС}}) = U_{\text{ВХ}}/R_1$ .

Тогда

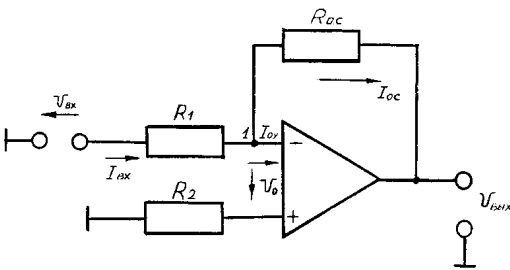


Рисунок 5.4

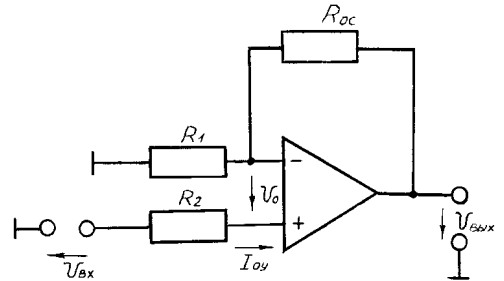


Рисунок 5.5

$$\frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}.$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$$

$$; K_{UI} =$$

$$\frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}.$$

Вычитатель-усилитель (рисунок 5.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если  $R_1 = R_2$  и  $R_{\text{ОС}} = R$ , то

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}) R_{\text{ОС}} / R_1.$$

Сумматоры. Для инвертирующего сумматора (рисунок 5.7,а) формула выполняемой операции

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left( \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1} U_{\text{ВХ1}} + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_2} U_{\text{ВХ2}} + \dots + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_n} U_{\text{ВХn}} \right).$$

Для неинвертирующего сумматора (рисунок 5.7,б)

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{nR_1} (U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + \dots + U_{\text{ВХn}}),$$

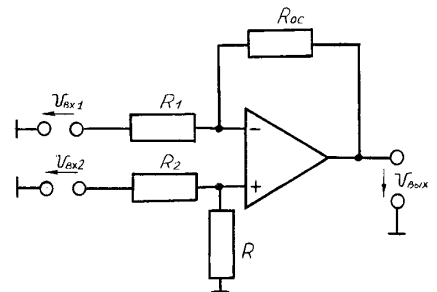
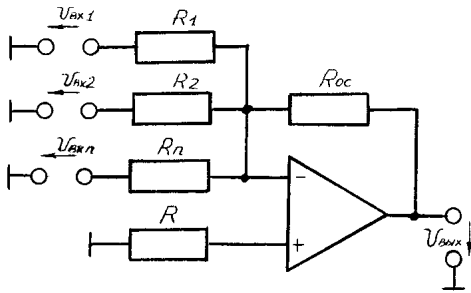


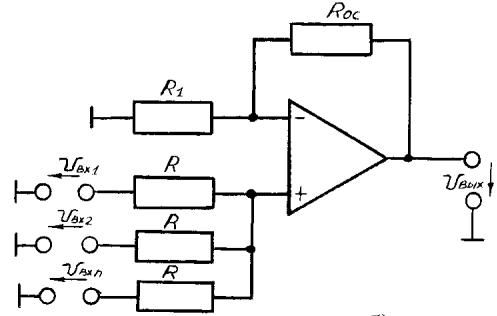
Рисунок 5.6



где  $n$  – число входов.



а)



б)

Рисунок 5.7

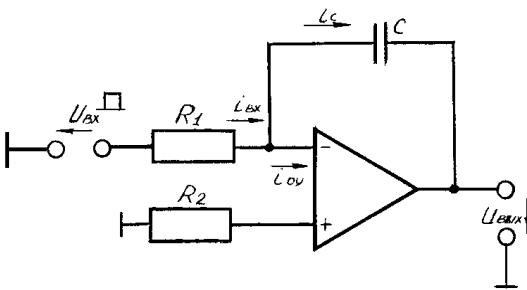


Рисунок 5.8

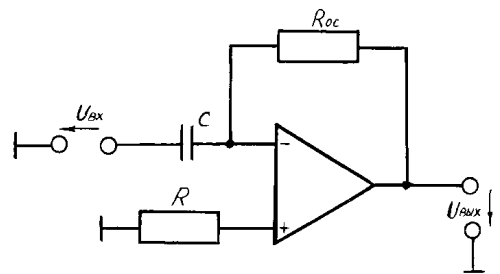


Рисунок 5.9

Интеграторы создают заменой резистора  $R_{oc}$  конденсатором (рисунок 5.8). Они широко распространены в аналоговых решающих и моделирующих устройствах. Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от

входного сигнала. Так как  $i_{вх} = i_c$  или  $\frac{u_{вх}}{R_1} = -C \frac{du_{вых}}{dt}$ , то

$u_{вых} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_{вх} dt + U_{вых 0}$ . Обычно при  $t=0$   $U_{вых 0} = 0$ , тогда  $u_{вых} = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{вх} dt$ , где  $\tau = R_1 C$  - постоянная времени.

Дифференциаторы (рисунок 5.9). Входной сигнал подается на инвертирующий вход и формула выполняемой операции

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}}C \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина является самовозбуждающимся генератором (рисунок 5.10). Он преобразует энергию постоянного тока в переменный ток требуемой частоты. Мост Вина, состоящий из элементов  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи (ПОС). Входной сигнал генератора - это часть его выходного напряжения, передаваемая звеном ПОС. При  $R_1=R_2=R$  и  $C_1=C_2=C$  частота генерации  $f_0=1/(2\pi RC)$ . Элементы  $R_0$ ,  $R_{\text{OC}}$  предназначены для получения требуемого коэффициента усиления.

Мультивибратор служит для получения прямоугольных импульсов. Мультивибратор на ОУ (рисунок 5.11) относится к самовозбуждающимся генераторам. ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики), он сравнивает два входных сигнала: по неинвертирующему

входу  $U_1 = U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  и по инвертирующему входу  $U_c$  - напряжение конденсатора  $C$ . В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от  $U_{\text{ВЫХ max}}$  до  $U_{\text{ВЫХ min}} = -U_{\text{ВЫХ max}}$ . При  $R_1=R_2$  длительность и период импульса  $t_{\text{и}} \approx 1,1RC$ ;  $T = 2t_{\text{и}} \approx 2,2RC$ . Изменяя  $\tau=RC$  или величины  $R_1$ ,  $R_2$ , можно регулировать длительность и частоту импульсов.

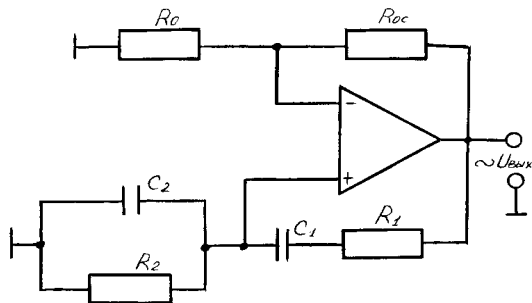


Рисунок 5.10

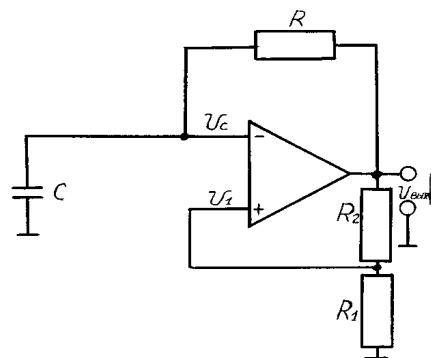


Рисунок 5.11

#### Предварительное задание к эксперименту

1. По заданным в таблице 5.1 значениям  $R_{\text{OC}}$  и  $R_1=10$  кОм рассчитать коэффициент  $K_U$  и построить амплитудную характеристику при изменении  $U_{\text{ВХ}}$  от 0 до 1 В.

Рассчитать длительность периода и частоту выходного напряжения генератора гармонических колебаний или мультивибратора по заданным значениям  $R$  и  $C$  (таблица 5.1).

Таблица 5.1

| Вариант        | 1            | 2  | 3   | 4   | 5            | 6  | 7   | 8   |
|----------------|--------------|----|-----|-----|--------------|----|-----|-----|
| Тип усилителя  | Рисунок 5.4  |    |     |     | Рисунок 5.5  |    |     |     |
| $R_{oc}$ , кОм | 20           | 50 | 100 | 510 | 20           | 50 | 100 | 510 |
| Тип генератора | Рисунок 5.10 |    |     |     | Рисунок 5.11 |    |     |     |
| $R$ , кОм      | 5            | 5  | 10  | 10  | 5            | 5  | 10  | 10  |
| $C$ , нФ       | 10           | 2  | 10  | 2   | 10           | 2  | 10  | 2   |

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать электрическую цепь усилителя, заданного вариантом в таблице 5.1 ( $R_1=R_2=10$  кОм,  $R_{oc}$  из таблицы 5.1). На вход усилителя подать напряжение  $U_{вх}$  от одного из источников опорного напряжения. Необходимую полярность  $U_{вх}$  установить переключателями П1 или П2 (+ или –).

2. При  $U_{вх}=0$  произвести корректировку «нуля» ОУ (Уст. «0»).

3. Изменяя  $U_{вх}$  от 0 до 1000 мВ (затем от 0 до –1000 мВ), снять амплитудную характеристику усилителя, заданного вариантом в таблице 5.1. Результаты измерений записать в таблицу 5.2. Точки нанести на амплитудную характеристику, рассчитанную в предварительном задании.

Таблица 5.2

|               |   |  |  |  |  |  |  |       |
|---------------|---|--|--|--|--|--|--|-------|
| $U_{вх}$ , мВ | 0 |  |  |  |  |  |  | 1000  |
| $U_{вых}$ , В |   |  |  |  |  |  |  |       |
| $U_{вх}$ , мВ | 0 |  |  |  |  |  |  | –1000 |
| $U_{вых}$ , В |   |  |  |  |  |  |  |       |

4. Собрать электрическую цепь вычитателя-усилителя по схеме рисунка 5.6 (для нечетных вариантов) или сумматора по схеме рисунка 5.7,б (для четных вариантов). Установить  $R_{oc}=10$  кОм, на входы подать  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  по указанию преподавателя. Измерить  $U_{вых}$  и рассчитать коэффициент усиления. Результаты записать в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

| $U_{вх1}$ , мВ | $U_{вх2}$ , мВ | $U_{вых}$ , мВ | $K$ |
|----------------|----------------|----------------|-----|
|                |                |                |     |

5. Собрать электрическую цепь интегратора по схеме рисунок 5.8 (для нечетных вариантов) или дифференциатора по схеме рисунка 5.9 (для четных вариантов).  $C=2$  нФ;  $R=5$  кОм. На инвертирующий вход подать прямоугольные импульсы с выхода генератора.

6. Включить и подготовить к работе осциллограф. Снять осциллограммы входного и выходного напряжений.

7. Собрать электрическую цепь по схеме рисунка 5.10 или 5.11 согласно варианту таблицы 5.1. Получить осциллограмму выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(t)$ . Определить частоту и период  $U_{\text{вых}}(t)$ , сравнить их с рассчитанными в предварительном задании.

### Содержание отчета

Цель работы; схема заданного в таблице 5.1 усилителя, расчетные коэффициент усиления  $K_U$  и амплитудные характеристики усилителя, экспериментальные точки на этих характеристиках, таблице 5.2, схема генератора гармонических колебаний (рисунок 5.10) или схема мультивибратора (рисунок 5.11) соответственно варианту таблицы 5.1, расчетные и опытные частоты и период  $T$  выходного напряжения; схема вычитателя усилителя и интегратора (для нечетных вариантов), сумматора и дифференциатора (для четных вариантов); таблица 5.3; осциллограммы входного и выходного напряжения дифференциатора или интегратора,  $u_{\text{вых}}(t)$  генератора гармонических колебаний или мультивибратора; выводы о достоинствах ОУ и их практическом использовании.

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой операционные усилители, каковы их достоинства и область применения? 2. Что такое положительная и отрицательная обратная связи? Почему в усилителях используют отрицательную обратную связь? 3. Каковы основные характеристики ОУ? Где используются линейные и нелинейные режимы работы ОУ? 4. Поясните принцип построения инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ. Как определяется их коэффициент усиления? 5. Поясните принципы построения вычитателя, сумматора, дифференциатора, интегратора, генератора гармонических колебаний. 6. Какое влияние оказывают величины внешних элементов на функции, выполняемые ОУ?

### Лабораторная работа №3.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И  
КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: изучение принципа построения логических элементов цифровых интегральных микросхем и комбинационных устройств на их основе; экспериментальное исследование логических элементов и комбинационных устройств.

### Общие сведения

Логические элементы (ЛЭ) вместе с запоминающими элементами составляют основу вычислительных машин, цифровых измерительных приборов и устройств автоматики. ЛЭ выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, который характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено» - «Отключено». Поэтому цифровую информацию обычно представляют в двоичной форме, когда сигналы принимают только два значения: «0» (логический нуль) и «1» (логическая единица), соответствующие двум состояниям ключа.

Логическая операция преобразует по определенным правилам входную информацию в выходную. Основными логическими операциями являются:

1) логическое умножение (конъюнкция) или операция И, обозначаемая знаками “·” или  $\wedge$  :  $F = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n$ ;

2) логическое сложение (дизъюнкция) или операция ИЛИ, обозначаемая знаками “+” или  $\vee$  :  $F = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$ ;

3) логическое отрицание (инверсия) или операция НЕ, обозначаемая чертой над переменной:  $F = \bar{x}$  .

Логические элементы, реализующие операцию И, называют элементами И. Выходной сигнал  $F$  элемента И равен единице, если на все его входы подан сигнал «1». Обозначение элемента И и его таблица истинности показаны на рисунке 6.1,а.

Логические элементы, реализующие операцию ИЛИ, называют элементами ИЛИ. Выходной сигнал его  $F$  равен единице, если хотя бы на один из входов подан сигнал «1». Обозначение элемента ИЛИ и его таблица истинности показаны на рисунке 6.1,б.

Логический элемент НЕ реализует операцию НЕ (инвертор). Обозначение элемента НЕ и таблица истинности показаны на рисунке 6.1, в.

В зависимости от вида используемых сигналов ЛЭ подразделяют на потен-

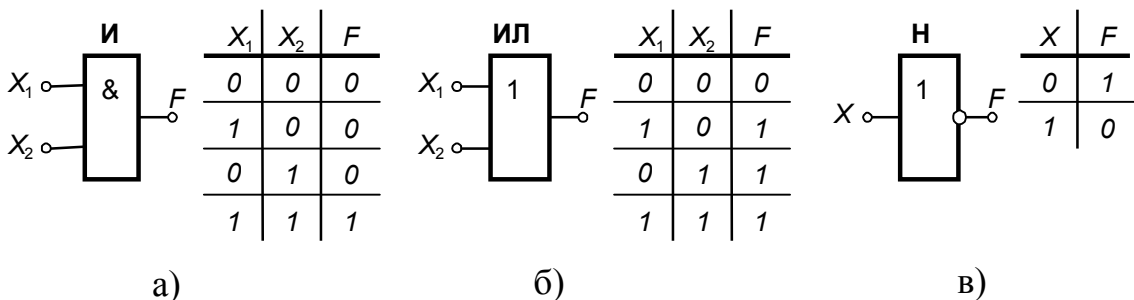


Рисунок 6.1

циальные, в которых «0» или «1» задаются двумя различными уровнями постоянного напряжения (низкий уровень напряжения соответствует «0», высокий уровень – «1») и импульсные, в которых значениям «0» или «1» соответствует отсутствие или наличие импульса. Наибольшее распространение получили потенциальные элементы. ЛЭ выполняется в виде интегральных микросхем (ИМС).

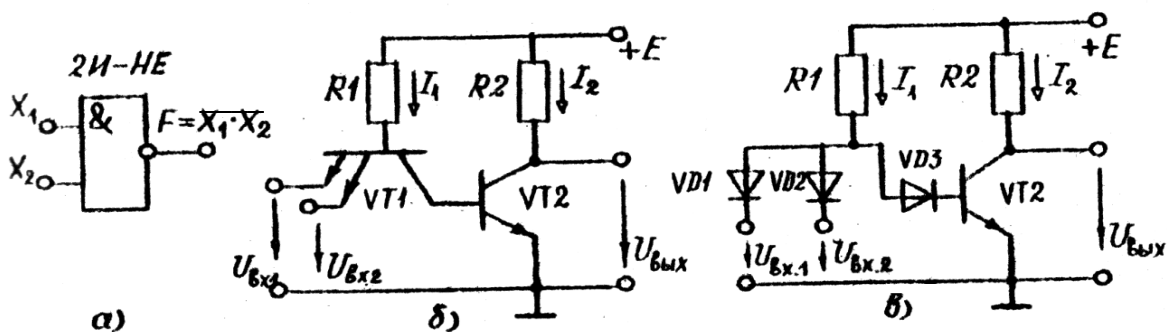


Рисунок 6.2

В данной работе исследуются логические элементы 2И-НЕ (ИМС К155ЛА3) и 2ИЛИ-НЕ (ИМС К155ЛЕ1). Условное обозначение и схемы реализации элемента 2И-НЕ показаны на рисунке 6.2.

Операция И осуществляется многоэмиттерным транзистором  $VT1$ , который можно представить в виде трех диодов. Диоды  $VD1$  и  $VD2$  моделируют эмиттерно-базовые переходы, а  $VD3$  – базово-коллекторный переход (рисунок

6.2,в). Если хотя бы на один из входов  $VT1$  подан низкий уровень напряжения (сигнал «0»), то соответствующий переход открыт (один из диодов  $VD1 - VD2$ ). Через транзистор протекает ток  $I_1$ . Напряжение между базой и общей шиной  $U = E - R_1 I_1$  недостаточно, чтобы открыть два последовательно включенных перехода ( $VD3$  и переход база-эмиттер  $VT2$ ). Транзистор  $VT2$  закрыт, ток  $I_2 \approx 0$  и  $U_{\text{вых}} \approx E$ . Только при высоких уровнях напряжения (сигнал «1») на обоих входах  $VT1$  все переходы эмиттер-база  $VT1$  закрыты, и потенциал базы повышается, транзистор  $VT2$  открывается и  $U_{\text{вых}} = E - R_2 I_2$ . Таким образом,  $VT2$  выполняет роль инвертора. Сигнал «0» на выходе только при наличии сигналов «1» на всех входах, что соответствует операции И-НЕ.

Условное обозначение и схема элемента 2ИЛИ-НЕ приведены на рисунке 6.3. Операцию логического сложения выполняют два параллельно включенных транзистора  $VT1$  и  $VT2$ , которые управляют работой  $VT3$ , выполняющего роль инвертора. При подаче высокого уровня на один из входов эмиттерный переход соответствующего транзистора закрывается. Напряжение между базой этого транзистора и общей шиной становится достаточным для того, чтобы открыть диод  $VD1(2)$  и эмиттерный переход  $VT3$ . Транзистор  $VT3$  переходит в режим насыщения (открыт) и  $U_{\text{вых}} = 0$ . Только при низких уровнях на базах обоих транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  открыты. Ток протекает через  $R1$  и  $R2$ , за счет падения напряжения на этих резисторах потенциал базы  $VT3$  близок к нулю и  $VT3$  закрыт ( $U_{\text{вых}} \approx E$ ).

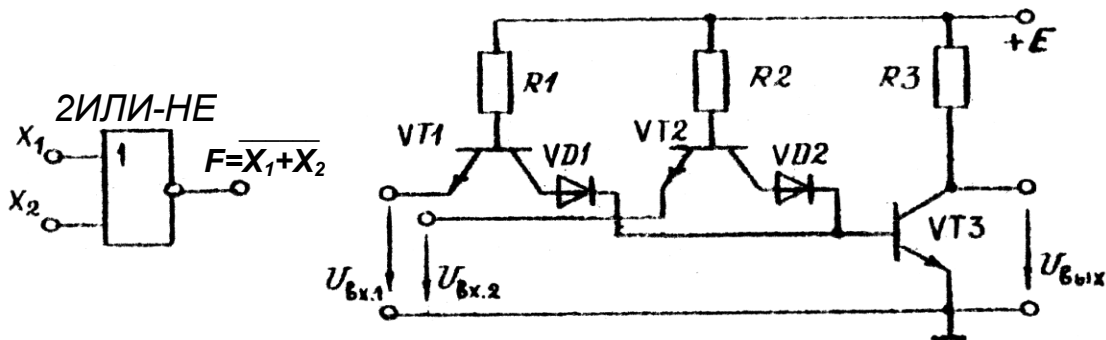


Рисунок 6.3

На основе базовых логических элементов могут быть созданы логические устройства, выполняющие операции любой сложности. В комбинационных устройствах сигнал на выходе  $F$  определяется комбинацией входных сигналов  $x_1, x_2, \dots$ .

Пусть требуется составить комбинационную схему с тремя входами  $x_1, x_2, x_3$  и одним выходом  $F$ . Высокий уровень напряжения должен появляться на выходе только при наличии высоких уровней на двух входах, т.е.  $F=1$  при  $x_1=x_2=1$  и  $x_3=0$ . Такую схему можно составить путем подбора элементов. Если использовать элементы с двумя входами 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, то она будет содержать не менее двух элементов. Так как схема должна реагировать на одинаковые сигналы  $x_1$  и  $x_2$ , то эти входы следует объединить элементом 2И-НЕ, на выходе которого появляется низкий уровень только при  $x_1=x_2=1$ . Второй элемент должен давать на выходе  $F=1$  при поступлении на его входы двух низких уровней. Таким элементом является элемент 2ИЛИ-НЕ. Полученная таким образом схема представлена на рисунке 6.4.

При большом числе входов метод подбора трудоемок. Более рационально составление уравнения логической функции и последующее преобразование по правилам алгебры логики. Для данного примера  $F = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3$ . Используя тождество  $x = \bar{\bar{x}}$  и формулы де Моргана  $\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$  и  $\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$ , эту функцию можно представить в виде суммы или произведения функций  $F_1 = \overline{x_1 \cdot x_2}$  и  $F_2 = \overline{x_1 + x_2}$ , соответствующих элементам 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ:

$$F = x_1 \cdot x_2 \cdot \bar{x}_3 = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2} \cdot \bar{x}_3} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2} + x_3}$$

Полученному уравнению логической функции отвечает схема на рисунке 6.4.

Многие комбинационные устройства, часто встречающиеся в цифровой технике (шифраторы, дешифраторы, сумматоры и др.), представляют собой готовые ИМС. В работе исследуется четырехразрядный сумматор, выполненный на микросхеме К155ИМ3. Его структурная схема показана на рисунке 6.5. Он состоит из четырех одноразрядных сумматоров  $SM$ .

Одноразрядный сумматор имеет входы  $A$  и  $B$  для ввода двух суммируемых чисел одного разряда и вход  $P$ , на который поступает сигнал с выхода  $P$  предыдущего разряда – перенос. На выходе  $S$  появляется сигнал, соответствующий сумме, а на выходе  $P$  – сигнал переноса, если в результате сложения получается двузначное число. Например, пусть складываются два двоичных четырехразрядных числа  $A=0101$  и  $B=1001$ . На входы сумматора  $SM_0$  поступают сигналы  $A_0=1$  и  $B_0=1$ , результат сложения  $1+1=10$ . На выходе  $S_0$  появляется 0,

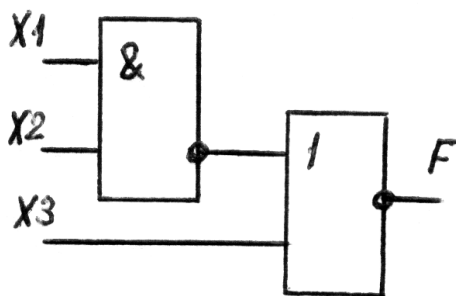


Рисунок 6.4



и  $P_0=1$ . На входы второго сумматора  $SM_1$  поступает три числа  $A=0$ ,  $B=0$  и  $P_0=1$ . На выходе  $S_1=1$ ,  $P_1=0$  и т.д. Чтобы получить сумматор с большим числом разрядов, объединяют несколько более простых. Так, два сумматора К155ИМ3 позволяют складывать восьмиразрядные числа.

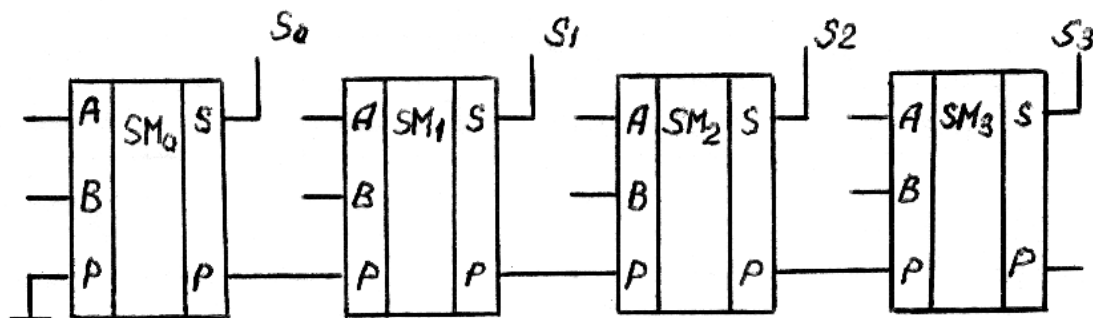


Рисунок 6.5

#### Предварительное задание к эксперименту

Составить комбинационную схему на логических элементах 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ с тремя или четырьмя входами, чтобы на выходе появлялся высокий уровень напряжения (логическая единица) при значениях сигналов на входах, заданных таблице 6.1. Проверить работоспособность схемы, отметить уровни напряжения (0 или 1) на входах и выходах логических элементов.

Перевести в двоичный код и сложить два числа  $A$  и  $B$ , приведенных в таблице 6.1. Результаты записать в табл.6.2.

Таблица 6.1

| Вариант | 1  | 2  | 3  | 4  | 5 | 6  | 7  | 8  |
|---------|----|----|----|----|---|----|----|----|
| $x_1$   | 1  | 0  | 0  | 0  | 0 | 1  | 0  | 0  |
| $x_2$   | 1  | 1  | 0  | 0  | 0 | 1  | 0  | 1  |
| $x_3$   | 1  | 1  | 1  | 0  | 0 | 1  | 1  | 1  |
| $x_4$   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0 | -  | -  | -  |
| $A$     | 2  | 4  | 6  | 8  | 9 | 11 | 13 | 15 |
| $B$     | 15 | 14 | 13 | 12 | 7 | 10 | 5  | 3  |

## Порядок выполнения эксперимента

Исследовать логический элемент 2ИЛИ-НЕ, для чего на входы  $x_1$  и  $x_2$  поочередно подать напряжения логической единицы и нуля. Для индикации уровня выходного напряжения выход элемента соединить с индикатором  $F$ . Составить и заполнить таблицу истинности (таблица 6.2).

Исследовать логический элемент 2И-НЕ. Составить и заполнить таблицу истинности (таблица 6.2).

Собрать электрическую цепь по составленной в предварительном задании комбинационной схеме. Проверить ее работу, подав на вход значения входных сигналов (таблица 6.1) и включив на выход индикатор  $F$ . Набрать 2-3 комбинации, отличных от заданной. Результаты привести в таблице 6.3.

Набрать на входе сумматора двоичные числа  $A$  и  $B$  соответствующего варианта, проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании (таблица 6.4).

Таблица 6.2    Таблица 6.3    Таблица 6.4

| $x_1$ | $x_2$ | $F = \overline{x_1 + x_2}$ | $F = \overline{x_1 \cdot x_2}$ |
|-------|-------|----------------------------|--------------------------------|
| 0     | 0     |                            |                                |
| 0     | 1     |                            |                                |
| 1     | 0     |                            |                                |
| 1     | 1     |                            |                                |

| $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $F$ |
|-------|-------|-------|-------|-----|
|       |       |       |       |     |
|       |       |       |       |     |

|       | Десятичный код | Двоичный код |
|-------|----------------|--------------|
|       |                |              |
| $A$   |                |              |
| $B$   |                |              |
| $A+B$ |                |              |

## Содержание отчета

Цель работы; схемы логических элементов 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ (рисунки 6.2, 6.3); заданная в предварительном задании логическая функция и реализующая ее комбинационная схема; структурная схема сумматора (рисунок 6.5); заданные числа  $A$  и  $B$  в двоичном коде и результат суммирования (таблица 6.4); результаты эксперимента в виде таблиц; краткие выводы по сопоставлению результатов эксперимента с предварительным заданием.

## Контрольные вопросы

1. Каковы назначение и область применения логических элементов? 2. Назовите основные логические операции. 3. Что представляют собой потенциальные логические ИМС? 4. Как работают логические элементы И-НЕ, ИЛИ-

НЕ (рисунки 6.2 и 6.3)? 5. Что такое сумматор? 6. Как происходит сложение в четырехразрядном сумматоре?

### Лабораторная работа 3.7

## ТРИГГЕРЫ НА ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

Цель работы: изучение схем и функциональных возможностей основных типов триггеров на логических элементах и экспериментальное исследование триггеров и схем управления.

### Общие сведения

Триггерами называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Каждому состоянию триггера соответствует определенный (высокий или низкий) уровень выходного напряжения, который может сохраняться как угодно долго. Поэтому триггеры относят к цифровым автоматам с памятью. В настоящее время большинство триггеров выполняется на основе логических элементов в виде интегральных микросхем (ИМС). Они применяются как переключающие элементы самостоятельно или входят в состав более сложных цифровых устройств, таких как счетчики, делители частоты, регистры и др.

Как правило, триггер имеет два выхода: прямой и инверсный, сигналы на которых противоположны по уровню. Если на прямом выходе  $Q$  высокий уровень (1), то на инверсном  $\bar{Q}$  – низкий (0). По способу управления триггеры делятся на асинхронные, состояние которых может меняться в любой момент времени с приходом управляющего или информационного сигнала, и синхронизируемые, которые срабатывают только при подаче разрешающего или синхронизирующего сигнала. В соответствии с этим различают информационные и синхронизирующие входы триггера. Их принято обозначать следующим образом:

$S$  – вход установки триггера в состояние с высоким уровнем напряжения на выходе  $Q$  ( $Q=1$ );

$R$  – вход установки триггера в состояние с низким уровнем напряжения на выходе  $Q$  ( $Q=0$ );

$D$  – информационный вход (триггер устанавливается в состояние с уровнем напряжения на выходе  $Q$ , соответствующим уровню на входе  $D$ );

$C$  – вход синхронизации;

$T$  – счетный вход, сигнал на этом входе переводит триггер в новое состояние;

$J$  – вход установки  $JK$ -триггера в состояние  $Q=1$ ;

$K$  – вход установки  $JK$ -триггера в состояние  $Q=0$ ;

Наибольшее распространение получили  $RS$ -,  $T$ -,  $D$ - и  $JK$ -триггеры.

Асинхронный  $RS$ -триггер можно построить на двух элементах 2ИЛИ-НЕ.

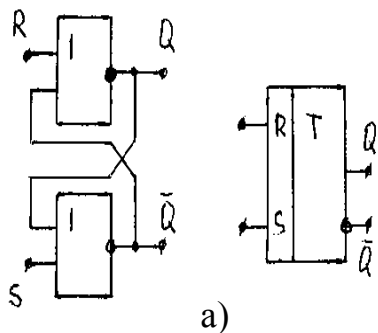
Схема и условное обозначение  $RS$ -триггера показаны на рисунке 7.1,а; временная диаграмма – на рисунке 7.1,б; таблица истинности – таблица 7.1.

Пусть в исходном состоянии до прихода информационного импульса на выходе триггера был низкий уровень напряжения ( $Q^t=0, \bar{Q}^t=1$ ). Подача высокого уровня на  $R$ -вход состояние триггера не изменит ( $R=1, Q^{t+1}=0$ ), так как верхний элемент 2ИЛИ-НЕ уже имеет на нижнем входе высокий уровень ( $\bar{Q}=1$ ).

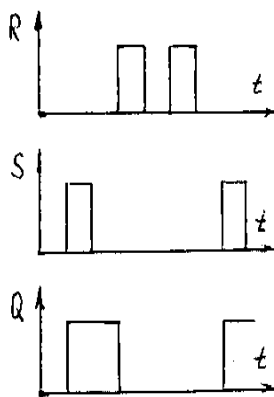
Таблица 7.1

| $R$ | $S$ | $Q^t$ | $Q^{t+1}$ |
|-----|-----|-------|-----------|
| 0   | 0   | 0     | 0         |
| 0   | 1   | 0     | 1         |
| 1   | 0   | 1     | 0         |
| 0   | 0   | 1     | 1         |
| 1   | 1   | 1     | н.о.      |

Для перевода триггера в состояние  $Q^{t+1}=1$  надо подать управляющий сигнал на вход  $S$ .



а)



б)

Рисунок 7.1

Тогда  $\bar{Q}^{t+1}=0$ , этот сигнал попадает на вход верхнего элемента и так как на обоих его входах низкий уровень, на выходе  $Q=1$ . Этот сигнал попадает на вход нижнего элемента и удерживает его в состоянии  $\bar{Q}=0$ . Таким образом,  $RS$ -

триггер переключается при поочередной подаче сигналов высокого уровня (1) на  $S$ - и  $R$ -входы. При  $S=0$  и  $R=0$  состояние триггера не меняется, а комбинация  $S=1$  и  $R=1$  запрещена, так как после этой команды состояние его неопределенно.

Тактируемый  $D$ -триггер имеет информационный вход  $D$  и синхровход  $C$ . Его можно построить на основе  $RS$ -триггера, добавив схему управления из двух логических элементов 2И и одного элемента НЕ (рисунок 7.2,а). Условное обозначение и временные диаграммы приведены на рисунках 7.2,б и 7.2,в; таблица истинности – таблица 7.2.

Таблица 7.2

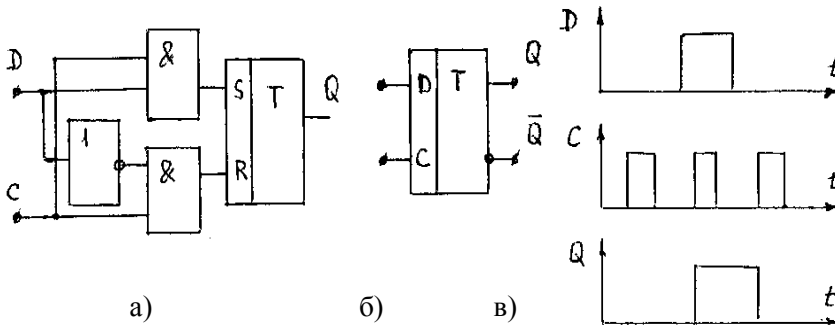


Рисунок 7.2

| $D$ | $C$ | $Q^t$ | $Q^{t+1}$ |
|-----|-----|-------|-----------|
| 0   | 0   | 0     | 0         |
| 1   | 0   | 0     | 0         |
| 1   | 1   | 0     | 1         |
| 0   | 1   | 1     | 0         |

На вход  $C$  подаются синхроимпульсы ( $C=1$ ) от специального генератора импульсов. Они поступают на оба элемента 2И и готовят срабатывание схемы управления. Если синхроимпульсы отсутствуют, схема пассивна при любом сигнале на входе  $D$ , так как на выходах элементов 2И удерживаются низкие уровни напряжения (0).

Пусть в момент прихода синхроимпульса  $D=0$ , тогда на вход  $S$  попадает сигнал 0, а на вход  $R$  – 1. Триггер переходит в состояние  $Q=0$ . Он сохранит это состояние до следующего синхроимпульса, даже если на входе  $D$  появится высокий уровень ( $D=1$ ). Только при  $D=1$  и  $C=1$  окажется  $S=1$ ,  $R=0$  и триггер примет состояние  $Q=1$ . Это состояние опять задержится на один такт. Поэтому  $D$ -триггеры называют триггерами задержки.

Счетный  $T$ -триггер имеет один управляющий вход  $T$ . Его условное обозначение показано на рисунке 7.3,а; временные диаграммы состояний на рисунке 7.3,б. Смена состояний триггера происходит всякий раз, когда меняется управляющий сигнал.  $T$ -триггеры

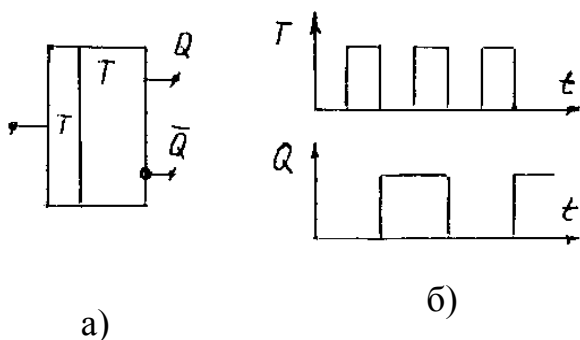


Рисунок 7.3

одного типа реагируют на фронт импульса, т.е. на перепад 0-1, другие - на срез (перепад 1-0). В любом случае частота выходных импульсов в 2 раза ниже частоты входных. Поэтому  $T$ -триггеры используются как делители частоты на 2 или счетчики по модулю 2. В виде ИМС триггеры этого типа не выпускаются. Их можно легко создать на основе  $D$ - и  $JK$ -триггеров.

$JK$ -триггеры относятся к универсальным, имеют информационные входы  $J$  и  $K$  и синхронизирующий вход  $C$ . Они используются при создании счетчиков, регистров и других устройств. При определенном переключении входов  $JK$ -триггеры могут работать как  $RS$ -триггеры,  $D$ -триггеры и  $T$ -триггеры. Благодаря такой универсальности они имеются во всех сериях ИМС. Условное обозначение  $JK$ -триггера показано на рисунке 7.4,а. Асинхронная установка триггера в исходное состояние  $Q=1$  или  $Q=0$  осуществляется подачей сигналов  $S=0$  или  $R=0$ . Эти команды выполняются при любых сигналах на других входах. В остальном  $JK$ -триггер работает, как синхронный, т.е. команды выполняются только при поступлении импульса на вход  $C$ . Наличие высокого уровня на  $J$ -входе ( $J=1$ ) переводит триггер в состояние  $Q=1$ , а сигнал  $K=1$  соответствует  $Q=0$ . При высоком уровне на обоих входах ( $J=K=1$ ) он работает как  $T$ -триггер (рисунок 7.4,б). На рисунке 7.4,в показана схема использования  $JK$ -триггера в

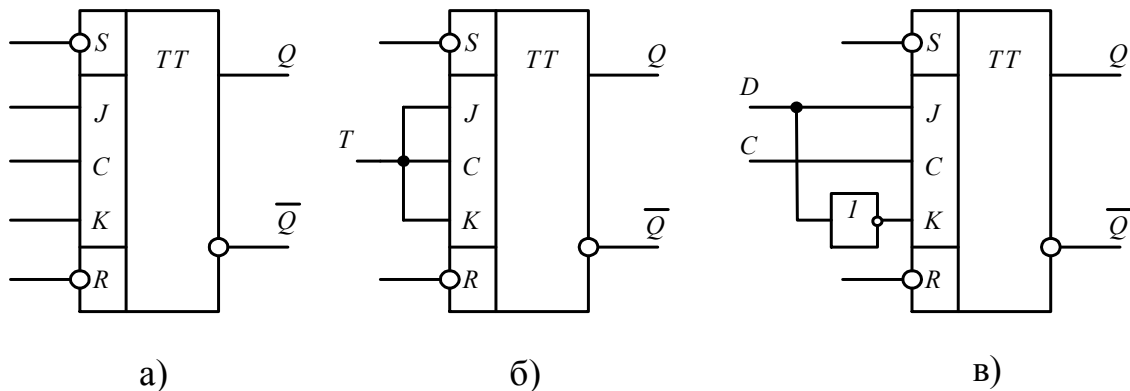


Рисунок 7.4

качестве  $D$ -триггера.

Предварительное задание к  
эксперименту

Составить схему  $RS$ - или  $D$ - триггера на логических элементах и начертить временную диаграмму ее работы для выходов  $Q$  или  $\overline{Q}$ . Тип триггера и набор логических элементов, которые надо использовать, приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3

| Вариант                  | 1     | 2     | 3       | 4                | 5              | 6              | 7              | 8                 |
|--------------------------|-------|-------|---------|------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| Тип триггера             | $RS$  | $D$   | $RS$    | $D$              | $RS$           | $D$            | $RS$           | $D$               |
| Тип логических элементов | 2И-НЕ | 2И-НЕ | 2ИЛИ-НЕ | 2ИЛИ-НЕ<br>2И-НЕ | 2И-НЕ          | 2И-НЕ          | 2ИЛИ-НЕ        | 2ИЛИ-НЕ,<br>2И-НЕ |
| Выход                    | $Q$   | $Q$   | $Q$     | $Q$              | $\overline{Q}$ | $\overline{Q}$ | $\overline{Q}$ | $\overline{Q}$    |

#### Порядок выполнения эксперимента

Используя наборное поле, на элементах ИМС К155ЛА3 и К155ЛЕ1 собрать составленную в предварительном задании схему триггера. В качестве индикатора уровня  $Q$  использовать светодиод  $F$ .

Подавая на информационный вход триггера сигналы 0 и 1, проверить его работу. Заполнить таблицы истинности исследуемых триггеров.

Для  $D$ -триггера в качестве источника синхроимпульсов использовать гнезда «1» и «0» с переключателем.

3. На временной диаграмме пункта 1 предварительного задания пунктиром отметить уровни выходов  $Q$  и  $\overline{Q}$  при разных наборах входных сигналов.

4. Исследовать работу  $JK$ -триггера на микросхеме К155ТВ1 в режиме  $D$ -триггера, для чего собрать цепь по схеме рисунка 7.4,в. Подавая на входы  $D$  и  $C$  сигналы от источника сигналов «0» и «1», начертить временную диаграмму его работы.

5. Исследовать работу  $JK$ -триггера, собрав цепь по схеме рисунка 7.4,б. Подавая на  $T$ -вход сигнал с клемм «0»-«1» (с переключателем), проследить изменение уровней  $Q$ . Начертить временную диаграмму.

6. Проверить работу  $T$ -триггера в качестве делителя частоты импульсов. Для этого на вход  $T$  подать сигнал от генератора импульсов. Включить осциллограф и просмотреть форму входных импульсов, зарисовать осциллограммы и определить частоту следования  $f_1$ . Включить осциллограф на выход  $Q$  триггера.

гера и зарисовать осциллограмму выходного напряжения, определить частоту  $f_2$ .

7. На выход  $T$ -триггера  $Q$  включить еще один триггер. Зарисовать осциллограмму выходного напряжения и определить частоту  $f_3$ . Проверить соотношения  $f_1/f_2$  и  $f_1/f_3$ . Сделать выводы о возможном использовании делителя частоты.

### Содержание отчета

Цель работы; схема триггера, составленная по предварительному заданию, временные диаграммы, таблицы истинности; схема соединений входов  $JK$ -триггера для получения на его основе  $D$ -триггера и  $T$ -триггера, временные диаграммы; осциллограммы импульсов генератора импульсов и выходные сигналы триггеров с указанием масштаба времени и напряжения.

### Контрольные вопросы

1. Что такое триггер? 2. Для чего используются триггеры? 3. Чем отличается прямой и инверсный выходы триггера? 4. Как работают  $RS$ -триггеры? Начертите временную диаграмму и таблицу истинности. 5. Как работают  $D$ -триггеры? 6. Для чего применяют синхровход триггера? 7. Поясните принцип работы  $T$ -триггера? Начертите временные диаграммы. 8. Начертите схему делителя частоты импульсов на 8.

## Лабораторная работа 3.8

### ЦИФРОВЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Цель работы: изучение структуры и принципа действия цифровых счетчиков; исследование работы двоичного счетчика и счетчиков с постоянным модулем счета.

### Общие сведения

Цифровые счетчики импульсов предназначены для подсчета входных импульсов и фиксации их числа в каком-либо коде. Они относятся к наиболее распространенным цифровым устройствам и строятся на основе триггеров.

Коэффициентом или модулем счета  $K$  называют наибольшее число импульсов, которое может сосчитать счетчик. По модулю счетчики делятся на двоичные ( $K=2^N$ ), декадные ( $K=10$ ), с произвольным постоянным модулем, с переменным модулем.

По принципу работы различают: последовательные или асинхронные счетчики, у которых информация передается по цепочке триггеров, начиная с



входного; параллельные или синхронные, у которых входные импульсы поступают одновременно на все триггеры, что увеличивает быстродействие.

По целевому назначению счетчики бывают суммирующими, вычитающими и реверсивными. Суммирующий счетчик с приходом каждого нового импульса увеличивает показание на единицу, вычитающий – уменьшает. Реверсивные счетчики могут работать на обоих режимах в зависимости от сигнала на схеме управления.

Схема, условное обозначение и временная диаграмма работы последовательного суммирующего счетчика на трех  $T$ -триггерах приведены на рисунке 8.1. Триггеры меняют свое состояние по спаду входного импульса, т.е. при изменении уровня от 1 до 0.  $R$ -входы всех триггеров объединены и на них подается высокий уровень напряжения ( $R=1$ ) для предварительной очистки счетчика и установки  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ . Когда на вход триггера  $T_1$  поступает первый импульс, триггер переходит в состояние  $Q_1=1$ . При этом записывается единица в

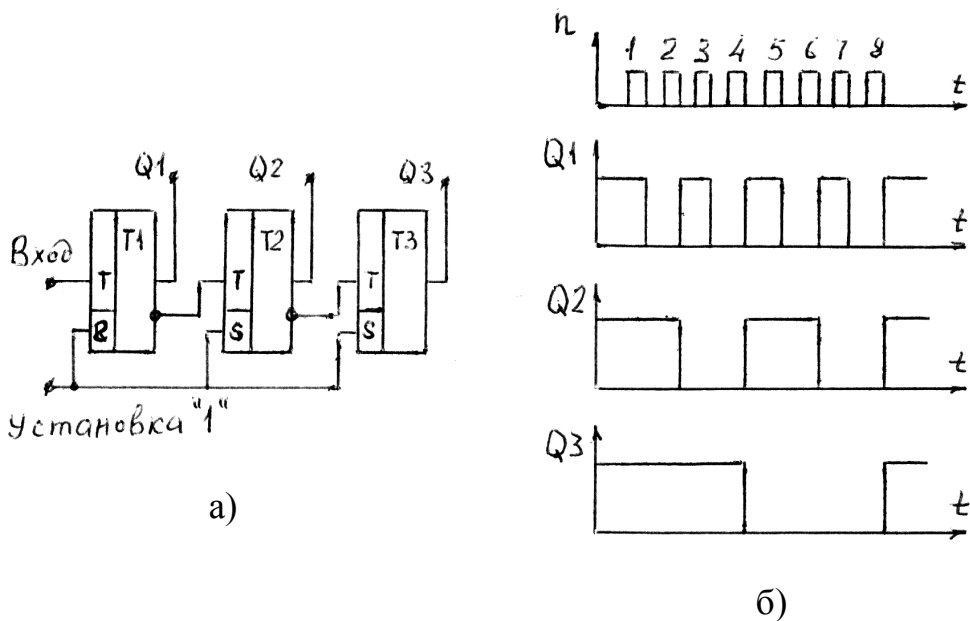


Рисунок 8.1

первый разряд счетчика. Положение остальных триггеров не меняется. Второй импульс перебрасывает  $T_1$  в состояние  $Q_1=0$ . Выход  $Q_1$  соединен со входом второго триггера и по спаду сигнала ( $Q_1$  изменился с 1 до 0)  $T_2$  тоже изменит свое состояние –  $Q_2=1$ . Записывается единица во второй разряд счетчика, что соответствует числу 2 в десятичной системе. Третий импульс –  $Q_1=1$  и  $Q_2=1$ . После четвертого импульса  $Q_1=0$ ,  $Q_2=0$  и  $Q_3=1$ , т.к. сработал третий триггер по

среза выходного сигнала  $T_2$ . Восьмой импульс вернет все триггеры в исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ . Модуль счета счетчика  $K=2^3=8$ . Если счетчик состоит из  $N$  триггеров, то  $K=2^N$ . Число, записанное в счетчике, считывается от старшего триггера  $T_3$  к младшему  $T_1$ . Например, после пяти импульсов будем иметь 101 или в десятичном коде  $2^2+2^0=5$ .

На рисунке 8.2 приведены схема и временная диаграмма вычитающего счетчика. Исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=1$  устанавливается подачей высокого уровня на  $S$ -входы триггеров. Входы  $T_2$  и  $T_3$  соединены с инверсными выходами  $\overline{Q_1}$  и  $\overline{Q_2}$  и на них удерживается низкий уровень напряжения. Первый импульс переводит  $T_1$  в состояние  $Q_1=0$ ,  $\overline{Q_1}=1$ . До прихода первого импульса в счетчике было записано число 111, после прихода оно уменьшилось на единицу – 110. Второй импульс возвращает  $T_1$  в состояние  $Q_1=1$ ,  $\overline{Q_1}=0$ . По спаду уровня на выходе  $\overline{Q_1}$  срабатывает  $T_2$  -  $Q_2=0$ ,  $\overline{Q_2}=1$ . Третий импульс устанавливает  $Q_1=0$  и  $\overline{Q_1}=1$ . На этот перепад сигнала  $T_2$  не реагирует и сохраняет предыдущее состояние. После четвертого импульса  $Q_1=1$ ,  $\overline{Q_1}=0$ ,  $Q_2=1$  и  $\overline{Q_2}=0$ . По срезу сигнала на  $\overline{Q_2}$   $T_3$  перейдет в состояние  $Q_3=0$ . Седьмой импульс вызовет  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ , а восьмой – вернет все триггеры в исходное состояние. Этот принцип построения и работы двоичных счетчиков сохраняется при любом

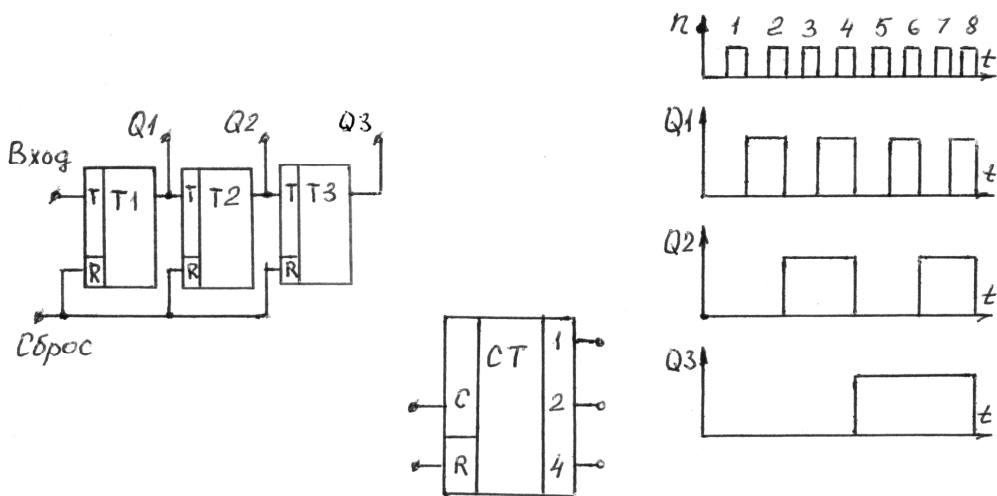


Рисунок 8.2

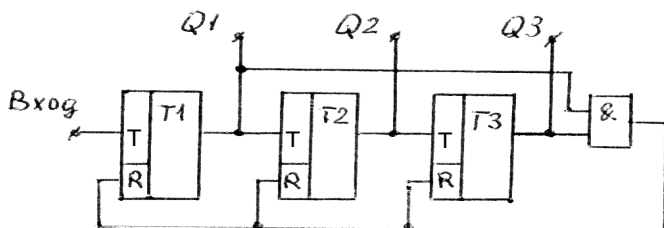
числе разрядов.

При модуле счета  $K \neq 2^N$  счетчик должен состоять из  $N$  триггеров, так чтобы  $2^{N-1} < K < 2^N$ . Тогда соответствующий двоичный счетчик будет иметь избыточные устойчивые состояния, которые надо устранить за счет внутренней связи между триггерами. Пусть надо создать счетчик с  $K=5$ . число триггеров должно быть не менее трех. Двоичный счетчик на трех триггерах имеет 8 устойчивых состояний. Таблица состояний такого счетчика, т.е. значения  $Q_1, Q_2, Q_3$  до и после прихода импульса, приведена ниже (таблица 8.1).

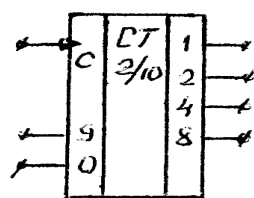
Таблица 8.1

В исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=0$  счетчик возвращается после восьмого импульса, а при модуле счета  $K=5$  должен возвращаться после пятого, т.е. сразу после состояния  $Q_1=Q_2=0, Q_3=1$ . Исключить оставшиеся состояния можно с помощью комбинационной схемы, которая после набора  $Q_1=1, Q_2=0, Q_3=1$  подавала бы сигнал на  $R$ -входы триггеров и возвращала бы их в состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ . Такая схема показана на рисунке 8.3. После пятого импульса на входы элемента И поступают высокие уровни с выходов  $Q_1$  и  $Q_3$ . На его выходе появляется тоже высокий уровень, который подается на  $R$ -входы триггеров и перебрасывает их в исходное состояние. Таким же образом можно построить счетчики на любой другой модуль счета.

Для наиболее часто встречающихся модулей, таких как 5, 10, 12 счетчики изготавливаются в виде готовых микросхем. Например, микросхема К155ИЕ2 представляет собой двоично-десятичный счетчик, который имеет вход  $C$ , два входа предварительной установки 0 и 9 и четыре выхода (рисунок 8.4). Микросхема К155ИЕ4 имеет модуль счета 12, а К155ИЕ6 – реверсивный счетчик с предустановкой. Он имеет один вход для операции сложения, второй – для



Рисунк 8.3



Рисунк 8.4

операции вычитания, четыре входа для предварительно заданного числа от

| $n$ | До прихода $n$ |       |       | После прихода $n$ |       |       |
|-----|----------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|     | $Q_1$          | $Q_2$ | $Q_3$ | $Q_1$             | $Q_2$ | $Q_3$ |
| 1   | 0              | 0     | 0     | 1                 | 0     | 0     |
| 2   | 1              | 0     | 0     | 0                 | 1     | 0     |
| 3   | 0              | 1     | 0     | 1                 | 1     | 0     |
| 4   | 1              | 1     | 0     | 0                 | 0     | 1     |
| 5   | 0              | 0     | 1     | 1                 | 0     | 1     |
| 6   | 1              | 0     | 1     | 0                 | 1     | 1     |
| 7   | 0              | 1     | 1     | 1                 | 1     | 1     |
| 8   | 1              | 1     | 1     | 0                 | 0     | 0     |

0 до 9, которое может быть записано в счетчик, и четыре выхода.

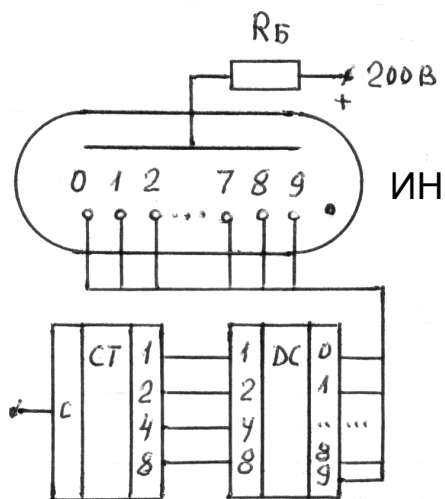


Рисунок 8.5

дах 1 и 4 дешифратора и низкий уровень на выходе 5. На всех остальных выходах остается высокий потенциал.

Газоразрядный индикатор ИН представляет собой прибор тлеющего разряда с анодом и десятью катодами, выполненными в виде цифр от 0 до 9. На анод от отдельного источника питания подается напряжение порядка 200 В. Каждый катод имеет вывод, который соединен с одноименным выводом дешифратора. Как только на выводе дешифратора появляется низкий уровень, напряжение между анодом и соответствующим катодом оказывается достаточным для возникновения разряда между ними и катод светится. Через стеклянный баллон видна, например, цифра 5. Приход следующего импульса на вход счетчика изменит состояние его выходов, изменится и вывод с низким потенциалом дешифратора. Разряд перейдет на другой катод, и начнет высвечиваться цифра 6. Наряду с газоразрядными в настоящее время широко применяются индикаторы на светодиодах и жидких кристаллах.

Предварительное задание к эксперименту

Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе *JK*-триггеров К155ТВ1 с модулем счета, заданным в таблице 8.2. Для сокращения

На шкалы измерительных приборов и на табло устройств автоматики информация подается в виде десятичных цифр. Преобразование двоично-десятичного кода, в котором работают декадные счетчики, в десятичный осуществляют дешифраторы. На рисунке 8.5 приведена схема включения счетчика и газоразрядного индикатора ИН. Дешифратор К155ИД1 имеет четыре входа для подачи сигналов с выходов счетчика и десять выходов, соответствующих числам от 0 до 9. В зависимости то комбинации входных сигналов появляется сигнал на одном из выходов. Пусть счетчик отсчитал пять импульсов. В этом состоянии появится высокий уровень на входах 1 и 4 дешифратора и низкий уровень на выходе 5. На всех остальных выходах остается высокий потенциал.

числа свободных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ, 2ИЛИ-НЕ.

Заполнить таблицу состояний полученного счетчика.

Таблица 8.2

|              |   |   |   |    |    |    |    |    |
|--------------|---|---|---|----|----|----|----|----|
| Вариант      | 1 | 2 | 3 | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
| Модуль счета | 6 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать схему трехразрядного двоичного суммирующего счетчика на *JK*-триггерах К155ТВ1.

2. Подать с наборного поля сигнал  $R=0$ ,  $S=1$  и установить счетчик в исходное состояние  $Q_1=Q_2=Q_3=0$ . Для индикации состояния триггеров используются светодиоды. Наличие высокого уровня вызывает их свечение.

3. Подать от генератора импульсов, работающего в ручном режиме, 10 импульсов и начертить временную диаграмму работы счетчика.

4. Собрать схему трехразрядного двоичного вычитающего счетчика. Установить счетчик в исходное положение  $Q_1=Q_2=Q_3=1$  и исследовать его работу. Начертить временную диаграмму.

Собрать схему счетчика, составленную по предварительному заданию. Проверить его работу и начертить временную диаграмму. Сравнить с таблицей состояний предварительного задания.

Включить генератор импульсов на вход счетчика К155ИЕ2 и проверить его работу с дешифратором К155ИД1 и индикатором ИН-17.

### Содержание отчета

Цель работы; схема счетчика с заданным (таблица 8.2) модулем счета и таблица состояний триггеров, временная диаграмма; схемы двоичных суммирующего и вычитающего счетчиков и временные диаграммы их работы; схема счетчика К155ИЕ2 с дешифратором К155ИД1 и индикатором ИН-17, краткое пояснение работы схемы.

### Контрольные вопросы

1. Классификация счетчиков. 2. Как устроен и как работает двоичный суммирующий счетчик? Поясните на временной диаграмме. 3. Как устроен и как работает двоичный вычитающий счетчик? 4. Что такое реверсивный счетчик? 5. Как строятся счетчики с  $K \neq 2^N$ ? 6. Для чего применяют дешифратор? 7. Как устроен газоразрядный цифровой индикатор? 8. Какая цифра будет высвечена

на индикаторе, если высокие уровни поданы на следующие входы К155ИД1: 1 и 2; 1 и 4; 1 и 8; 2 и 4.

### Лабораторная работа 3.9

## ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы: изучение схемотехники и работы семисегментных индикаторов, шифраторов, дешифраторов, а также их применения в цифровых и микропроцессорных устройствах.

### Общие сведения

Любая микропроцессорная система реализует пять основных этапов преобразования информации: *ввод исходной информации*, *обработка* (выполнение логических, арифметических и других операций), *управление процессом обработки*, *хранение* и *вывод результатов*.

В простейшей цифровой системе, представленной на рисунке 9.1, функцию ввода информации выполняет кнопочная *клавиатура*, с помощью которой осуществляется ввод численной или символьной информации (цифр, букв и других символов).

Для формирования двоичного кода, вводимого в *однокристалльную микро-*

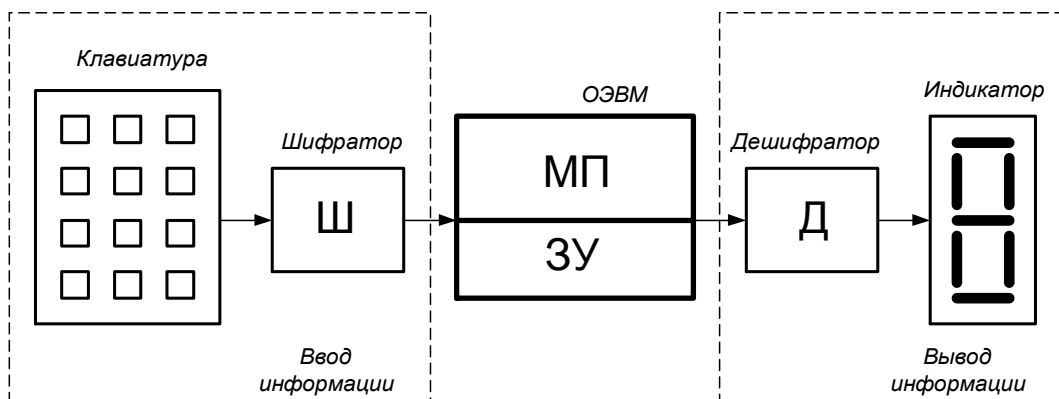


Рисунок 9.1

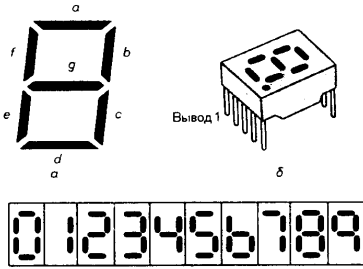
*ЭВМ* (ОЭВМ) при нажатии соответствующей клавиши на клавиатуре, применяется цифровое устройство, называемое *шифратором* (Ш). Обработка и управление процессом обработки информации осуществляется *микропроцессором* (МП), входящим в состав микроЭВМ. Хранение исходных данных,

промежуточных и конечных результатов, а также программ, по которым происходит обработка информации, осуществляется *запоминающим устройством* (ЗУ), входящим также в состав ОЭВМ. Вывод информации осуществляется на *семисегментный светодиодный индикатор*.

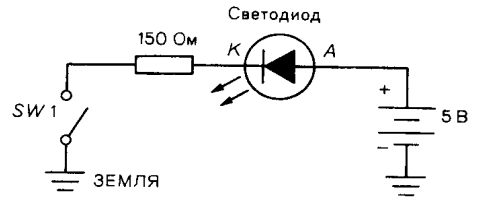
Отображение соответствующего символа (цифры или буквы) на семисегментном индикаторе осуществляется при подаче на его входы семиразрядного управляющего двоичного кода, который формируется цифровым устройством, называемым *дешифратором* (Д). Дешифратор выполняет преобразование двоичной информации на выходе ОЭВМ в специальный двоичный код семисегментного индикатора, соответствующий отображаемому символу.

*Семисегментный индикатор* – представляет собой светодиодную матрицу, состоящую из семи светодиодов с общим анодом или катодом в одном корпусе. На рисунке 9.2 показан внешний вид и схемы подключения светодиодного индикатора АЛС320. Различные комбинации светящихся сегментов, обеспечиваемые внешней коммутацией, позволяют воспроизвести цифры от 0 до 9 и некоторые символы. В 8-сегментных индикаторах (АЛС321) восьмой сегмент отображает десятичную точку.

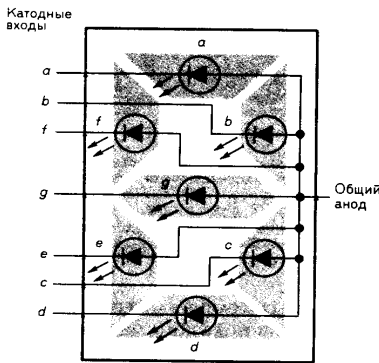
*Шифратор* (кодер) – это комбинационное логическое устройство, вырабатывающее на выходах параллельный двоичный код при подаче сигнала только на один какой-либо его вход. Такое кодирующее устройство применяется для преобразования символов определенного кода в  $n$ -разрядный двоичный код. Число информационных входов шифратора равно числу преобразуемых символов (клавиш клавиатуры) и удовлетворяет условию  $N_{\text{вх}} \leq 2^n$ , где  $n$  – число информационных выходов. Разрядность шифратора соответствует разрядности выходного двоичного кода. 4-х разрядный шифратор позволяет получить шестнадцать ( $2^4=16$ ) вариантов выходного двоичного кода, достаточных для преобразования шестнадцатеричных цифр от 0 до  $F$ .



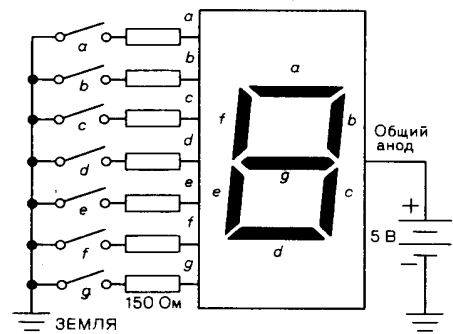
а)



б)



в)



г)

Рисунок 9.2

*Дешифратор* (декодер) – это комбинационное логическое устройство, которое при появлении на входах параллельного двоичного кода вырабатывает выходной сигнал на одном из выходов. Как правило, номер выхода, на котором появляется выходной сигнал, соответствует определенному входному двоичному коду. Такое декодирующее устройство применяется для распознавания входных двоичных кодов и преобразования двоичного кода в другие виды кодов, например, в *семисегментный код* для управления семисегментными индикаторами. Число входов дешифратора равно числу разрядов входного двоичного кода, а число выходов определяется выражением  $N_{\text{вых}} \leq 2^n$ , где  $n$  – число информационных входов. Полный двоичный дешифратор имеет  $2^n$  выходов. Разрядность дешифратора определяется разрядностью входного кода. Так полный 4-разрядный дешифратор имеет четыре входа и шестнадцать выходов.



В настоящей работе рассматривается схемотехника подключения семисегментных индикаторов и управление процессами ввода и отображения информации. Исследование работы конкретных схем выполняется на ПЭВМ с использованием моделирующей программы *Electronics Workbench (EWB)*.

Предварительное задание к эксперименту

Изучив работу светодиодного индикатора, дешифратора-формирователя семисегментного кода и шифратора, определите для цифры, соответствующей Вашему номеру варианта, двоичный и семисегментный коды. Результаты запишите в соответствующие графы таблицы 9.1.

Таблица 9.1

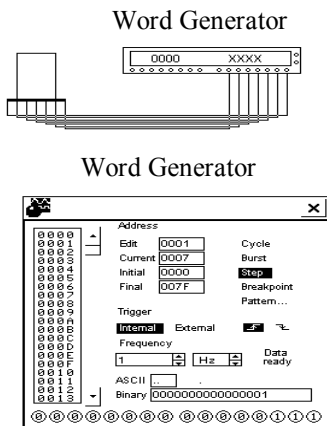
| Вариант задания      | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| «Семисегментный код» |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Двоичный код         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Порядок выполнения эксперимента

**Схема включения семисегментного индикатора** (файл «Indicator.EWB»).

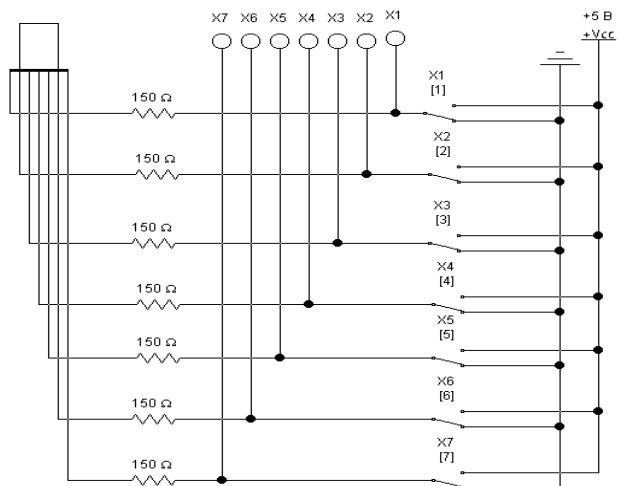
После загрузки файла *Indicator.EWB* на экране монитора в рабочей области программы *EWB* появятся схемы подключения семисегментного индикатора к

Indicator.EWB



X7X6X5X4X3X2X1

а)



б)

Рисунок 9.3

генератору двоичного кода (*Word Generator*) и к источнику постоянного напряжения +5 В (рисунок 9.3).

В схеме на рисунке 9.3,а генератор двоичного кода вырабатывает на выходах  $X_7$ , ...,  $X_1$  двоичный код, увеличивающийся на 1 при каждом нажатии указателем «мыши» кнопки «*Step*», и подаваемый на входы индикатора. В пошаговом режиме можно подать на индикатор  $2^7=128$  семиразрядных двоичных кодов (от  $0000000_2$  до  $1111111_2$ ) и увидеть соответствующую отображаемую им информацию.

В схеме на рисунке 9.3,б под действием подаваемого напряжения от шины +5 В на отдельные входы индикатора через управляемые ключи  $X_1$  ...  $X_7$  можно заставить светиться один или несколько сегментов. Таким образом, включив и отключив соответствующие ключи, можно отобразить на индикаторе нужную информацию. Управление ключами осуществляется нажатием клавиш (1 ... 7) на цифровой клавиатуре компьютера.

**Задание к эксперименту.** 1) В пошаговом режиме, нажимая указателем «мыши» кнопку «*Step*» и подавая, таким образом, двоичные коды на индикатор, определите и запишите в таблицу 9.2 коды, соответствующие цифрам от 0 до 9.

Таблица 9.2

| Цифра              | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Код<br>$X_7...X_1$ |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

2) С помощью ключей  $X_1$  ...  $X_7$  подайте на индикатор двоичные коды из таблицы 9.2 и убедитесь в правильности отображения информации и выполнения предварительного задания.

**Схема включения индикатора с дешифратором-формирователем семисегментного кода** (файл *Decoder.EWB*).

После загрузки файла *Decoder.EWB* на экране монитора в рабочей области программы **EWB** появится схема подключения индикатора к дешифратору-формирователю, преобразующему двоичный код в семисегментный код индикатора для отображения десятичных цифр (рисунок 9.4).

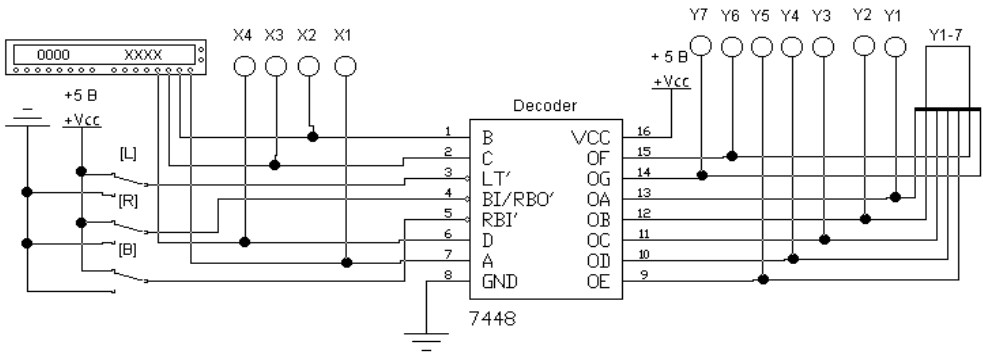


Рисунок 9.4

На рисунке 9.4 приведена схема для исследования совместной работы генератора двоичного кода, микросхемы дешифратора 7448 и семисегментного индикатора. Микросхема *K155ИД1* является аналогом микросхемы 7447А, условное обозначение которой показано на рисунке 9.5,а. Микросхемы *K155ИД1* и 7447А имеют инверсные входы и выходы в отличие от микросхемы 7448. Двоичный код подается на информационные входы *A, B, C, D*. Вход *LT* используется для активизации всех выходов дешифратора – при подаче на него НИЗКОГО напряжения на индикаторе светятся все сегменты, независимо от кода на информационных входах. Входы *RBI* и *BI/RBO* – входы «гашения» – используются для гашения индикатора при подаче на них НИЗКОГО напряжения.

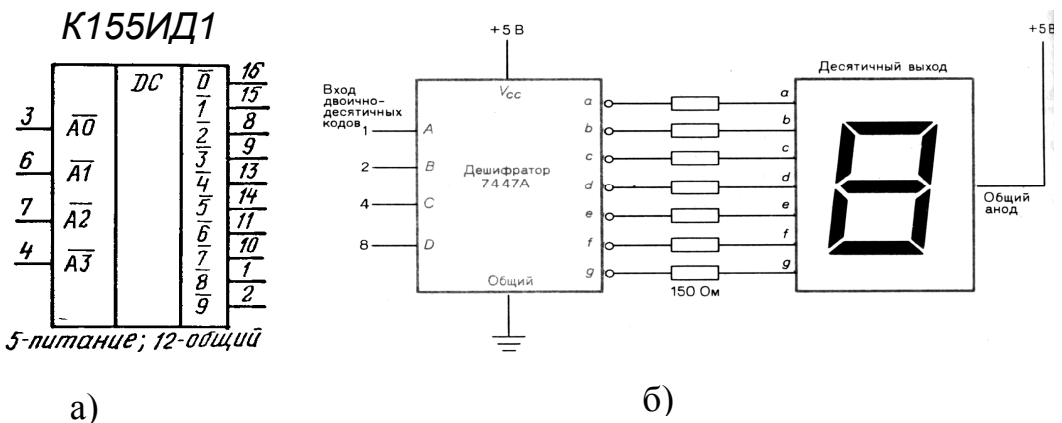


Рисунок 9.5

**Задание к эксперименту. 1)** В пошаговом режиме, подавая двоичные коды на входы дешифратора, заполните таблицу состояний (таблицу 9.3) микросхемы 7448. Обратите внимание на изображение цифр «шесть» и «девять», а также на специфические символы для некоторых входных кодов, которым соответствуют неполные цифровые изображения на индикаторе.

Таблица 9.3.

| $N_{10}$ | Входы<br>(двоичный код) |     |     |     | Выходы<br>(семисегментный код) |    |    |    |    |    | Изображение на индикаторе |    |
|----------|-------------------------|-----|-----|-----|--------------------------------|----|----|----|----|----|---------------------------|----|
|          | X4                      | X3  | X2  | X1  | Y7                             | Y6 | Y5 | Y4 | Y3 | Y2 |                           | Y1 |
| 0        | 0                       | 0   | 0   | 0   |                                |    |    |    |    |    |                           |    |
| ...      | ...                     | ... | ... | ... |                                |    |    |    |    |    |                           |    |
| 15       | 1                       | 1   | 1   | 1   |                                |    |    |    |    |    |                           |    |

2) В циклическом режиме генератора входных кодов проверьте работу дешифратора при подаче поочередно на его управляющие входы ( $LT$ ,  $RBI$  и  $BI/RBO$ ) НИЗКОГО напряжения.

3) Проверьте результат предварительного задания.

**Схема отображения информации, вводимой с цифровой клавиатуры**  
(файл *Coder.EWB*).

После загрузки файла *Coder.EWB* на экране монитора в рабочей области

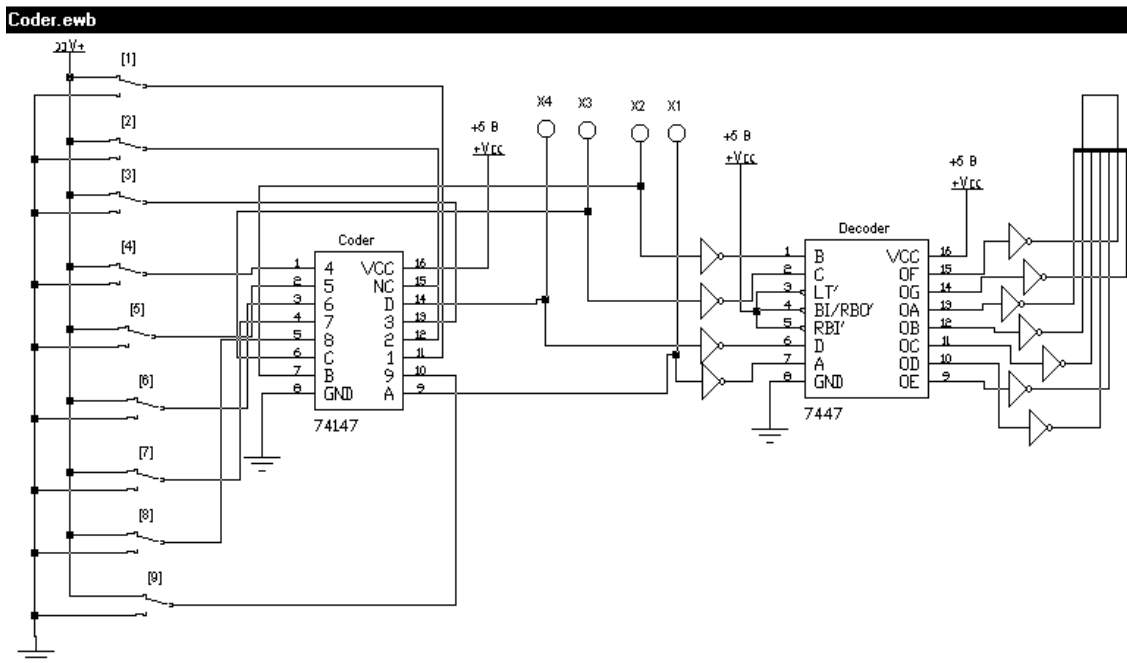


Рисунок 9.6

программы **EWB** появится схема включения цифровой клавиатуры (ключи 1 ... 9), шифратора (микросхема 74147), дешифратора-формирователя (микросхема 7447) и семисегментного индикатора (рисунок 9.6).

Микросхема 74147 – *приоритетный шифратор* имеет девять входов  $\bar{1} \dots \bar{9}$  и формирует выходной двоичный код на четырех выходах  $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ . Входы и выходы - инверсные (активный сигнал – НИЗКИЙ уровень напряжения). Адресные входы - приоритетные, высший приоритет - у входа  $\bar{9}$ .

Приоритет входов проявляется в том, что при подаче активного сигнала на несколько входов активизируется (откликается) вход с большим приоритетом. Нуль кодируется на выходе, когда на все девять входов подано напряжение ВЫСОКОГО уровня, поэтому нулевого входа нет. Аналогом микросхемы 74147 является микросхема K155ИВ3, условное обозначение которой показано на рисунке 9.7.

При нажатии какой-либо клавиши цифровой клавиатуры компьютера происходит замыкание ключа с соответствующим номером (1 ... 9) на шину «земля» (НИЗКИЙ уровень напряжения), и на один из входов микросхемы 74147 подается сигнал НИЗКОГО уровня (логический нуль). Выходной двоичный код шифратора отображается индикаторами X4, X3, X2, X1 и подается через инверторы на входы дешифратора-формирователя, который преобразует полученный двоичный код в код управления семисегментного индикатора. С выходов дешифратора семисегментный код через инверторы подается на индикатор, на котором высвечивается цифра, соответствующая нажатой клавише цифровой клавиатуры (номеру ключа, замкнутому на заземленную шину).

**Задание к эксперименту. 1)** Поочередно нажимая клавиши цифровой клавиатуры компьютера, установите все ключи в исходное состояние – замкните их на шину +5 В. При этом на индикаторе должен высветиться «нуль».

**2)** Поочередно нажимайте клавиши цифровой клавиатуры в последовательности 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, заполняя после каждого нажатия таблицу состояния шифратора (таблица 9.4). После нажатия клавиши «9» все ключи будут замкнуты на шину «земля», а на индикаторе будет высвечиваться цифра «9». В этом проявляется наивысший приоритет девятого входа шифратора – при замкнутом ключе «9» на шину «земля» нажатие в любой последовательности клавиш 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 не изменит выходного кода шифратора и состояния индикатора.

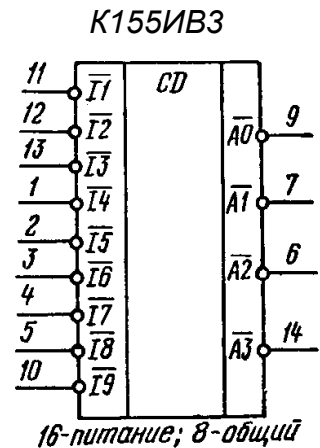


Рисунок 9.7

Таблица 9.4.

| Номер ключа | Входы |   |   |   |   |   |   |   |   | Выходы   |          |          |          | Символ индикатора |
|-------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----------|----------|----------|----------|-------------------|
|             | 1     | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | <i>D</i> | <i>C</i> | <i>B</i> | <i>A</i> |                   |
| 0           | В     | В | В | В | В | В | В | В | В |          |          |          |          |                   |
| 1           | Н     | В | В | В | В | В | В | В | В |          |          |          |          |                   |
| ...         |       |   |   |   |   |   |   |   |   |          |          |          |          |                   |
| 9           |       |   |   |   |   |   |   |   |   |          |          |          |          |                   |

*Примечание:* В – ВЫСОКИЙ и Н – НИЗКИЙ уровень напряжения.

### Содержание отчета

Цель работы, структурная схема микропроцессорной системы (рисунок 9.1), условные обозначения шифратора и дешифратора (рисунки 9.5,а и 9.7), схемы включения светодиодного индикатора (рисунки 9.2,г и 9.5,б), таблицы с результатами экспериментов, выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какие устройства называют комбинационными? 2. Каким образом описывается работа комбинационных устройств? 3. Что такое дешифратор и как он работает? 4. Что понимают под понятием семисегментный код? 5. Как устроен светодиодный индикатор и как он подключается для отображения информации. 6. Что такое шифратор и как он работает? 7. Какие особенности имеет приоритетный шифратор? 8. Какие бывают разновидности дешифраторов?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/ Под ред. В.А.Лабунцова. - М.: Энергоатомиздат, 1988.-320с., ил.
2. Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем./ Под ред. В.А.Лабунцова.-М.: Энергоатомиздат, 1987-464с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учеб.пособие для приборостроит. спец.вузов.-2-е изд., перераб. и доп.-М.: Высш.шк. 1991.-622с., ил.
4. Микроэлектронные устройства в автоматике: Учеб. пособие для вузов/ А.А.Сазонов, А.Ю.Лукичев,В.Т.Николаев и др.;Под ред. А.А.Сазонова.-М.: Энергоатомиздат, 1991.-384с., ил.
5. Фурунжиев Р.И., Бохан Н.И. Микропроцессорная техника в автоматике: Учеб.пособие.-Мн.: Ураджай, 1991.-280с., ил.
6. Токхейм Р. Основы цифровой электроники: Пер. с англ. М.: Мир, 1988.-392с., ил.
- Жеребцов И.П. Основы электроники. - Л.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. - М.: Высшая школа, 1982.