

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Электротехника и электроника»

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,  
1-43 00 05 «Промышленная теплоэнергетика»,  
1-43 01 08 «Паротурбинные установки  
атомных электростанций»

В 3 частях

Часть 3

## ЭЛЕКТРОНИКА

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области энергетики и энергетического оборудования*

Минск  
БНТУ  
2020

УДК [621.3+621.38](076.5)

ББК 31.2 я 7

Э45

**Составители:**

*Е. И. Германович – 1, С. В. Домников – 2, Р. Р. Мороз – 3,  
Г. А. Михальцевич – 4; О. А. Пекарчик – 5, Ю. В. Бладыко – 6,  
Е. С. Счастливая – 7, Л. И. Новикова – 8, И. В. Новаш – 9*

**Рецензенты:**

заведующий кафедрой электроники УО БГУИР,  
канд. техн. наук, доцент *С. М. Сацук*;  
доцент кафедры «Автоматизированные системы управления производством»  
УО БГАТУ, канд. техн. наук, доцент *И. П. Матвеенко*

**Электротехника** и электроника : учебно-методическое пособие  
Э45 для студентов специальностей 1-43 01 04 «Тепловые электрические  
станции», 1-43 00 05 «Промышленная теплоэнергетика», 1-43 01 08  
«Паротурбинные установки атомных электростанций» : в 3 ч. / сост. :  
Ю. В. Бладыко [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Ч. 3 : Электроника. –  
79 с.

ISBN 978-985-550-852-7 (Ч. 3).

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по курсам «Электроника», «Электротехника и электроника», «Электротехника и основы электроники», «Электроника и микропроцессорная техника».

Содержание 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.

Часть 2 «Электрические машины и аппараты» была опубликована в 2015 году.

УДК [621.3+621.38](076.5)

ББК 31.2 я 7

ISBN 978-985-550-852-7 (Ч. 3)

ISBN 978-985-550-243-3

© Белорусский национальный  
технический университет, 2020

## **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 сделать необходимые измерения и заполнить соответствующие таблицы.

9. Отключить источник питания. 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 его содержанию.

12. Представить отчет о работе преподавателю, ответить на контрольные вопросы.

# Лабораторная работа № 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 вентиляей, содержит в себе силовой трансформатор **Т**, сглаживающий фильтр **СФ** и стабилизатор **Ст** (рис. 1.1). В зависимости от условий работы и требований отдельные узлы выпрямительного устройства могут отсутствовать.

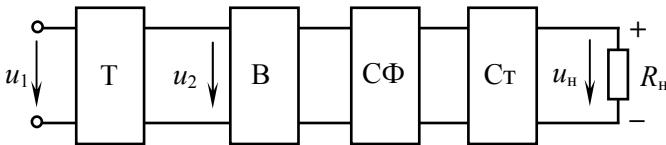


Рис. 1.1. Структурная схема выпрямителя

Основным элементом выпрямителя является вентиль (диод) – это нелинейный элемент, обладающий незначительным сопротивлением току в прямом направлении и достаточно большим – в обратном. Наибольшее распространение получили полупроводниковые диоды, вентильные свойства которых определяются свойствами *p-n*-перехода – контактом двух полупроводниковых материалов с различными типами электропроводности.

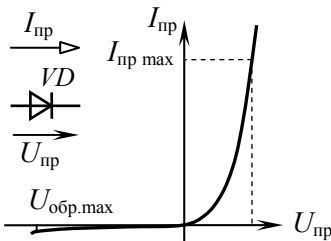


Рис. 1.2. Вольтамперная характеристика и условное обозначение диода

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

Основные параметры диодов: предельно допустимый 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, то есть 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  $T$  (рис. 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, являющийся для вентиля прямым током.

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

В этом интервале времени  $(0 - T/2; T - 3T/2)$

$u_H = u_2 = U_{2m} \sin \omega t; \quad u_B = 0$   
(рис. 1.3, б). При отрицательных значениях  $u_2$  вентиль  $VD$  закрыт, его сопротивление бесконечно велико, значит,  $u_H = 0; \quad u_B = u_2 = U_{2m} \sin \omega t$ .

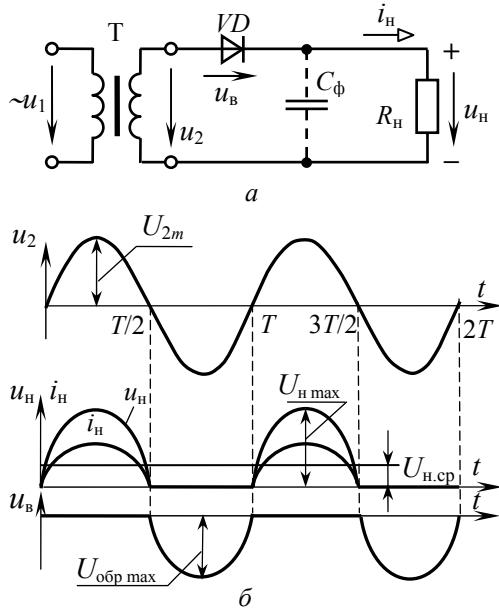


Рис. 1.3. Однофазный однополупериодный выпрямитель:

а – схема; б – временные диаграммы

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

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

Учитывая, что

$$U_{н. max} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2,$$

получаем соотношение для выбора напряжения трансформатора по заданной постоянной составляющей выпрямленного напряжения:

$$U_{н. ср} = \sqrt{2} U_2 / \pi = 0,45 U_2 \quad \text{или} \quad U_2 = 2,22 U_{н. ср}.$$

Для надежной работы вентили выбирают из условий:

$$I_{пр. max} \geq I_{н. ср}, \quad U_{обр. max} \geq U_{2m} = \pi U_{н. ср}.$$

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

$$u_n = U_{н. ср} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Тогда коэффициент пульсаций равен:

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

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 (рис. 1.4, а) содержит четыре вентиля  $VD1-V D4$ , включенных по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подано синусоидальное напряжение  $u_2 = U_{2m}\sin\omega t$ , к другой – подключен нагрузочный резистор  $R_H$ . При положительных значениях напряжения  $u_2$  вентили  $VD1$  и  $VD3$  открыты, и в цепи трансформатор – вентиль  $VD1$  – резистор  $R_H$  – вентиль  $VD3$  – протекает ток (рис. 1.4, б). В этот интервал времени  $u_H = u_2$ , 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 –  $VD2$  –  $R_H$  –  $VD4$  – ток отрицателен для трансформатора, но положителен для нагрузочного резистора.

Периодическое повторение этих процессов определяет несинусоидальное напряжение нагрузки  $u_H$ , равное  $|u_2|$  (см. рис. 1.4, б).

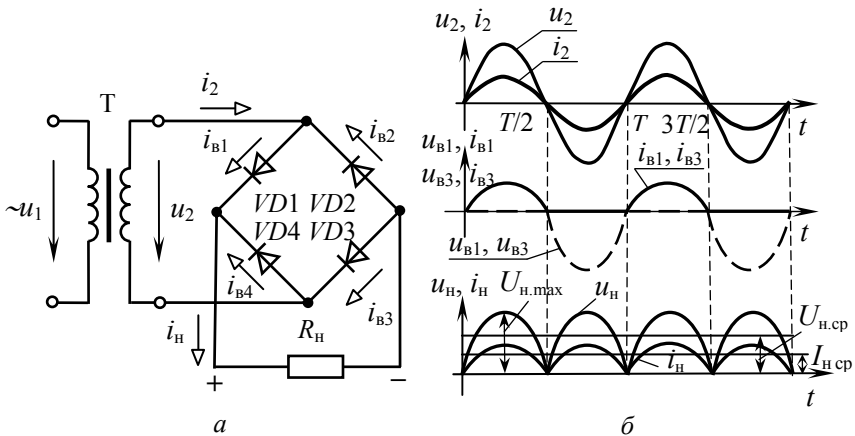


Рис. 1.4. Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель:  
а – схема; б – временные диаграммы

Постоянная составляющая этого напряжения вдвое больше, чем при однополупериодном выпрямлении:

$$U_{H, \text{cp}} = \frac{2}{\pi} U_{H, \text{max}}.$$

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

$$U_{н. ср} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9U_2;$$

$$U_2 = 1,11U_{н. ср};$$

$$I_{пр} \geq \max 0,5I_{н. ср};$$

$$U_{обр. max} \geq U_{2m} = \frac{\pi}{2} U_{н. ср}.$$

Мостовой выпрямитель по сравнению с однополупериодным имеет преимущество: средний выпрямленный ток  $I_{н. ср}$  и напряжение  $U_{н. ср}$  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*, предложенный в 1923 году А. Н. Ларионовым, содержит шесть вентилях (рис. 1.5, а). Полагаем, что потенциал нейтральной точки трансформатора  $n$  равен нулю, тогда диаграмма напряжений  $u_a, u_b, u_c$  является диаграммой потенциалов  $\varphi$  точек  $a, b, c$  (рис. 1.5, б). В любой момент времени в цепи, содержащей резистор  $R_n$  и два вентиля, протекает ток.

Например, в интервале времени  $t_1-t_2$  возникает ток в цепи вентиль  $VD1$  – резистор  $R_n$  – вентиль  $VD4$ ; в интервале  $t_2-t_3$ :  $VD1$  –  $R_n$  –  $VD6$ . Ток в группе вентилях  $VD1, VD3, VD5$  может протекать только через один из них, подключенный к точке  $a, b$  или  $c$ , той, которая имеет наиболее высокий потенциал. Два других вентиля закрыты, и проводящий вентиль обеспечивает потенциал точки  $k$ , равный наиболее высокому из потенциалов точек  $a, b$  или  $c$  (см. рис. 1.5, б). В группе вентилях  $VD2, VD4, VD6$  ток протекает через один из них, подключенный к точке  $a, b$  или  $c$ , имеющей наиболее низкий потенциал. Тогда потенциал точки  $m$  равен наиболее низкому потенциалу точек  $a, b$  или  $c$  (оггибающая  $\varphi_m$ , см. рис. 1.5, б).



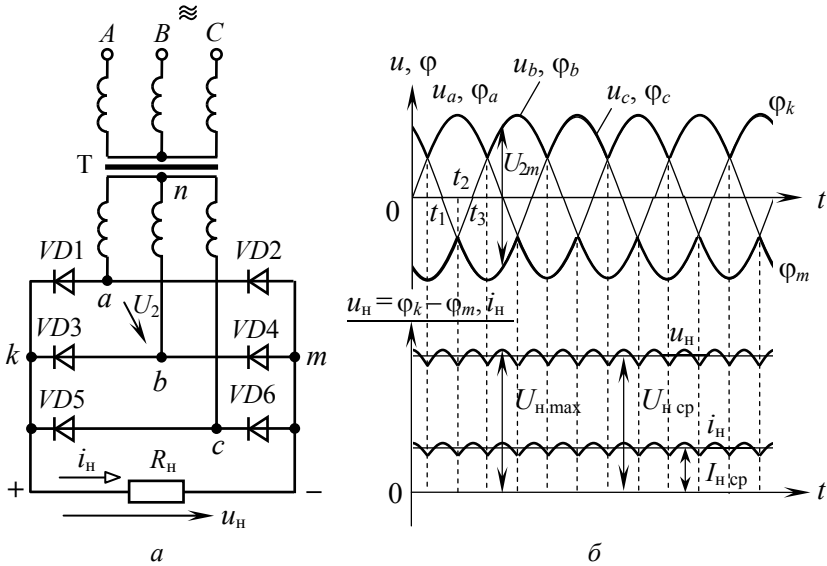


Рис. 1.5. Трехфазный мостовой выпрямитель:  
 а – схема; б – временные диаграммы

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

$$U_{н.ср} = \frac{6}{T} \int_{T/6}^{T/3} U_{н.макс} \sin \omega t dt = \frac{3}{\pi} U_{н.макс}.$$

Амплитуда линейного напряжения трансформатора  $U_{2m} = \sqrt{2} U_2 = U_{н.макс}$  (см. рис. 1.5, б) и соотношение между  $U_{н.ср}$  и действующим значением линейного напряжения трансформатора:

$$U_{н.ср} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 1,35 U_2.$$

Так как ток в каждом вентиле протекает  $1/3$  периода, то выбор вентиля осуществляется по  $1/3$  тока нагрузки:

$$I_{пр\max} \geq I_{н.ср} / 3.$$

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

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

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  $I_{\text{н. ср}}$  возникают падения напряжения на сопротивлении вторичных обмоток трансформатора и прямом сопротивлении вентилей, в результате чего напряжение на нагрузке уменьшается:

$$U_{\text{н. ср}} = U_{\text{н. ср}}^x - (R_{\text{пр}} + R_{\text{T}}) I_{\text{н. ср}}.$$

Зависимость  $U_{\text{н. ср}} = f(I_{\text{н. ср}})$  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 характеризуется коэффициентом сглаживания, равным отношению коэффициентов пульсаций  $p_1$  до установки фильтра и  $p_2$  – после установки фильтра:

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

*Емкостным фильтром* служит конденсатор  $C_{\text{ф}}$ , подключаемый параллельно нагрузке, при этом напряжение конденсатора  $u_{\text{C}} = u_{\text{н}}$  определяется процессами его заряда и разряда. В однополупериодном выпрямителе (см. рис. 1.3, а) конденсатор  $C_{\text{ф}}$  заряжается через вентиль, когда  $u_2 > u_{\text{C}}$  (интервал времени  $t_1 - t_2$ , рис. 1.6, а). Когда

$u_2 < u_C$  (интервал времени  $t_2-t_3$ ), клапан закрыт и конденсатор разряжается через резистор  $R_H$  с постоянной времени  $\tau_p = C_\phi R_H$ :

$$\left( u_C = U_{C(t=0)} e^{-t/\tau_p} \right).$$

Использование емкостного фильтра целесообразно в условиях  $R_H \gg R$  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 рис. 1.6, б.

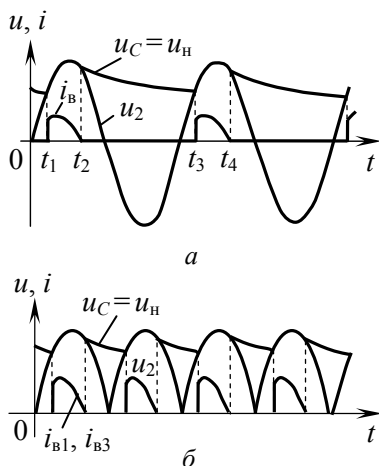


Рис. 1.6. Временные диаграммы напряжений и токов клапанов:  
 а – однофазного однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром;  
 б – однофазного двухполупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

Емкость конденсатора  $C_\phi$  выбирают из условия:

$$X_C = \frac{1}{m\omega C_\phi} \ll R_H;$$

$$C_\phi \gg \frac{1}{m\omega R_H},$$

где  $m$  – число пульсаций выпрямленного напряжения за период.

*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 возрастает с ростом номера гармоники  $k$ :

$$z_k = \sqrt{(R_n + R_\phi)^2 + (k\omega L_\phi)^2}.$$

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, при этом пульсации тока нагрузки, а значит, и напряжения  $u_n$ , уменьшаются.

Более эффективное сглаживание выпрямленного напряжения получают с помощью *Г-образных LC-фильтров* (рис. 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 сильнее 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, пульсации уменьшаются в 3–5 раз.

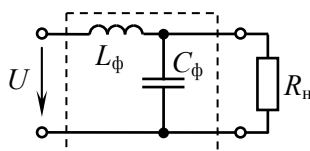


Рис. 1.7. Схема Г-образного LC-фильтра

### Предварительное задание к эксперименту

Для указанного в табл. 1.1 типа выпрямителя по заданному току  $I_{н.ср}$  и сопротивлению  $R_n$  нагрузки рассчитать напряжение  $U_{н.ср}$ , напряжение нагрузки при холостом ходе:

$$U_{н.ср}^x = U_{н.ср} + (R_{пр} + R_T) I_{н.ср},$$

напряжение вторичной обмотки трансформатора  $U_2^x$ , коэффициент трансформации  $n$ , амплитуду обратного напряжения  $U_{обр. max}$  и прямой ток  $I_{пр. ср}$  вентилях. Напряжение питающей сети  $U_1 = 220$  В, частота  $f = 50$  Гц. Принять сопротивление диодов и трансформатора  $R_{пр} + R_T = 5$  Ом.

Результаты расчетов записать в табл. 1.2.

Таблица 1.1

### Исходные данные

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
$R_{н}, \text{Ом}$	25	25	25	32	32	32	41	39
$I_{н. ср}, \text{А}$	0,5	1,0	1,5	0,4	0,8	1,2	0,6	1,0

Таблица 1.2

### Результаты расчетов и измерений

	$R_{пр} + R_T$	$I_{н. ср}$	$U_{н. ср}$	$U_2^x$	$n$	$U_{обр. max}$	$I_{пр. ср}$	$U_{н. ср}^x$	$U_{н. ср}^x / U_2^x$
Вычислено	5	Из табл. 1.1							
Измерено									

### Порядок выполнения эксперимента

1. Собрать электрическую цепь по схеме однофазного однополупериодного выпрямителя (рис. 1.8, выключатели В1, В2 – отключены).

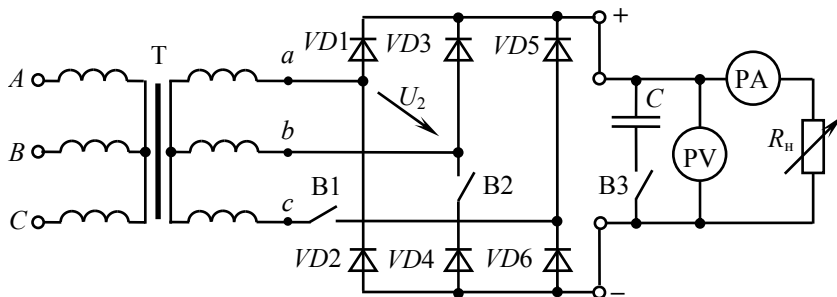


Рис. 1.8. Схема лабораторной установки

2. Включить напряжение сети и снять внешние характеристики выпрямителя  $U_{н.ср}$  ( $I_{н.ср}$ ) без фильтра и с емкостным фильтром (В3 – включен), изменяя ток нагрузки от нуля до максимального значения. Результаты измерений записать в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений

Тип выпрямителя	Однофазный однополупериодный				Однофазный мостовой				Трехфазный мостовой	
	без фильтра		с фильтром		без фильтра		с фильтром			
$U_2^x$	$U_{н.ср}$	$I_{н.ср}$	$U_{н.ср}$	$I_{н.ср}$	$U_{н.ср}$	$I_{н.ср}$	$U_{н.ср}$	$I_{н.ср}$	$U_{н.ср}$	$I_{н.ср}$
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$U_{н.ср}^x/U_2^x$										

3. Подключить осциллограф к зажимам резистора  $R_n$  и зарисовать с экрана кривые  $u_n(t)$  без фильтра и с емкостным фильтром в режимах холостого хода и максимального тока. На осциллограммах указать оси времени и амплитуды напряжения, а также измеренные в п. 2 величины  $U_{н.ср}$ . Снятие осциллограмм производить при одинаковых коэффициентах усиления осциллографа.

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

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

6. Измерить цифровым вольтметром напряжение  $U_2^x$  и вычислить для каждого выпрямителя отношение  $U_{н.ср}^x/U_2^x$  в режиме холостого хода.

7. По внешней характеристике указанного выпрямителя в табл. 1.1 рассчитать сопротивление  $R_{пр} + R_r$ , сравнить результат с заданным в табл. 1.2.

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

## Содержание отчета

Цель работы; схемы исследованных выпрямителей (см. рис. 1.3–1.5); расчет предварительного задания (табл. 1.2; табл. 1.3); внешние характеристики выпрямителей в общей системе координат; соотношения для выбора вентиля к выпрямителям (см. рис. 1.3–1.5) и соотношения между  $U_{н. ср}$  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  $U_{н. ср} / U_2$ ,  $U_{н. ср} / U_{н. max}$  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 № 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 регулируемыми 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 вольтамперная характеристика тиристора приведены на рис. 2.1.

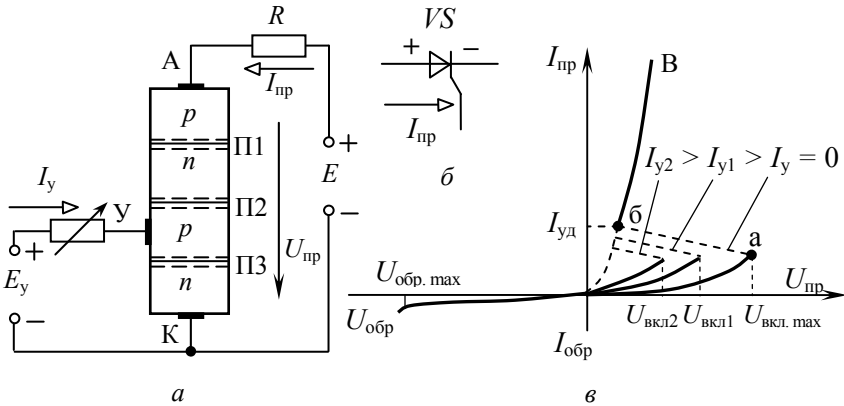


Рис. 2.1. Тиристор:

*a* – структура; *б* – условное обозначение; *в* – вольтамперная характеристика



Основу тиристора 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  $I_{пр}$  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 ветви 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 при прямом и обратном включении не превышало допустимых значений  $U_{вкл. \max}$  и  $U_{обр. \max}$ .

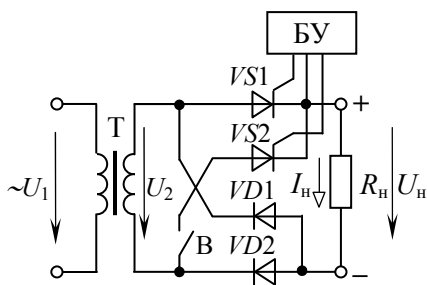


Рис. 2.2. Управляемый выпрямитель

На рис. 2.2 показана схема стэнда 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  $VS1$ .

Без управляющего тока  $i_y$  тиристор не откроется даже в положительные полупериоды  $u_2$ . Напряжение на нагрузке  $u_n$  и ток  $i_n$  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°.

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 (рис. 2.3). Среднее напряжение на нагрузке будет такое же, как и при работе неуправляемого выпрямителя:

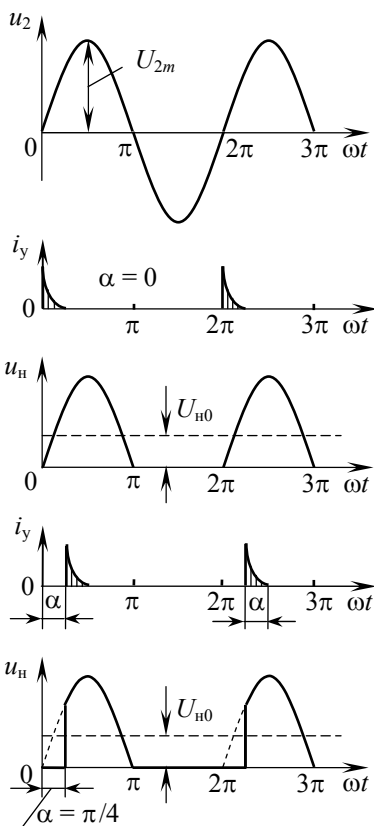


Рис. 2.3. Временные диаграммы

$$U_{н0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,45 U_2.$$

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:

$$U_{н. ср} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{н0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Таким образом, изменяя  $\alpha$  от 0 до  $180^\circ$ , можно плавно регулировать  $U_{н. ср}$  от  $U_{н0}$  до 0. Ток нагрузки повторяет  $u_n$ :

$$I_{н. ср} = \frac{U_{н. ср}}{R_n} = I_{н0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

При включенном выключателе **В** 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

$$U_{н. ср} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = U_{н0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где  $U_{н0} = 0,9 U_2$ .

Возможности управляемых выпрямителей определяют две основные характеристики:

1. Характеристика управления, представляющая зависимость  $U_{н. ср}(\alpha)$  при  $R_n = \text{const}$ .
2. Внешняя характеристика, отражающая зависимость  $U_{н. ср}(I_{н. ср})$  при  $\alpha = \text{const}$ .

### Предварительное задание к эксперименту

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора (см. рис. 2.2)  $U_2 = 30$  В, частота  $f = 50$  Гц. Для заданного в табл. 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  $U_{н. ср}(\alpha)$ , полагая трансформатор и вентили идеальными;

4) определить, на какие напряжения  $U_{обр. max}$  и  $U_{вкл. max}$  должны быть выбраны вентили для заданного выпрямителя, работающего на активную нагрузку.

Результаты расчетов записать в табл. 2.2.

Таблица 2.1

### Исходные данные

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

### Результаты расчетов

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

### Порядок выполнения работы

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

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

Таблица 2.3

## Результаты измерений

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

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 табл. 2.4.

Таблица 2.4

## Результаты измерений

$\alpha, ^\circ$	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 для заданных значений  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) для обоих выпрямителей.

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

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

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

### Содержание отчета

Цель работы и схема исследуемого выпрямителя; расчет (см. табл. 2.2) и графики предварительного задания; осциллограммы  $u_n(t)$  для обоих выпрямителей; таблицы измерений; характеристики выпрямителей  $U_{н. ср}(\alpha)$ ,  $U_{н. ср}(I_{н. ср})$ ; 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 принцип действия тиристора, его 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

### 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 относительного изменения напряжения на входе к изменению относительного 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 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 приведена на рис. 3.1. Она состоит из регулирующего элемента **Р**, управляющего элемента **У** и источника опорного напряжения **ИОН**.

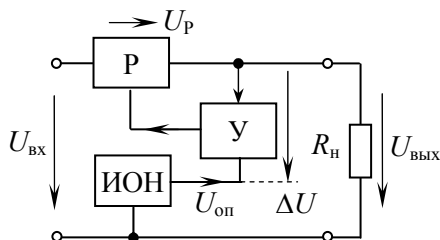


Рис. 3.1. Блок-схема компенсационного стабилизатора

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 рис. 3.2. В качестве источника опорного напряжения используется парамет-

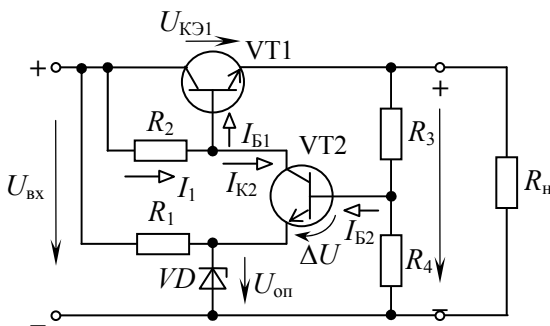


Рис. 3.2. Компенсационный стабилизатор



рический 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  $VT1$ .

Пусть  $U_{\text{ВЫХ}}$  уменьшилось, тогда уменьшится  $\Delta U = U_{BЭ2}$  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  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{KЭ1}$ .

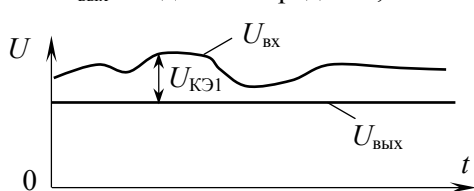


Рис. 3.3. Временные диаграммы напряжений

На рис. 3.3 изображена диаграмма входного ( $U_{\text{ВХ}}$ ) и выходного напряжения ( $U_{\text{ВЫХ}}$ ) и падения напряжения на транзисторе  $VT1$  ( $U_{KЭ1}$ ) от времени.

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

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

Таблица 3.1

#### Исходные данные

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

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

### Порядок выполнения эксперимента

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

2. 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 табл. 3.2.

Таблица 3.2

#### Результаты измерений

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$							
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							

3. Установить входное напряжение  $U_{\text{ВХ}} = 25\text{--}30 \text{ В}$ . Изменяя сопротивление нагрузки во всем диапазоне с помощью потенциометра  $R_{\text{н}}$ , снять внешнюю характеристику стабилизатора  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ . Результаты измерений записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

#### Результаты измерений

$I_{\text{ВЫХ}}, \text{ мА}$							
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							

4. По результатам измерений построить диаграммы  $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ . На первой из них указать рабочий диапазон стабилизатора и определить для него 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 (см. рис. 3.2) с обозначением всех элементов и указанием токов и напряжений; результаты расчета предварительного задания; результаты эксперимента в виде таблиц и диаграмм; 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 № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ

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

#### Общие сведения

Усилителем называют устройство, позволяющее увеличить напряжение, ток, мощность слабых электрических сигналов. В усилителях используют биполярные и полевые транзисторы, а в 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 рис. 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  $i_{\text{ВЫХ}}$

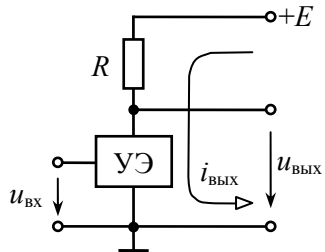


Рис. 4.1. Структурная схема усилительного каскада

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 (в соотношениях используются амплитуды тока и напряжения):

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

В 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 показаны на рис. 4.2.

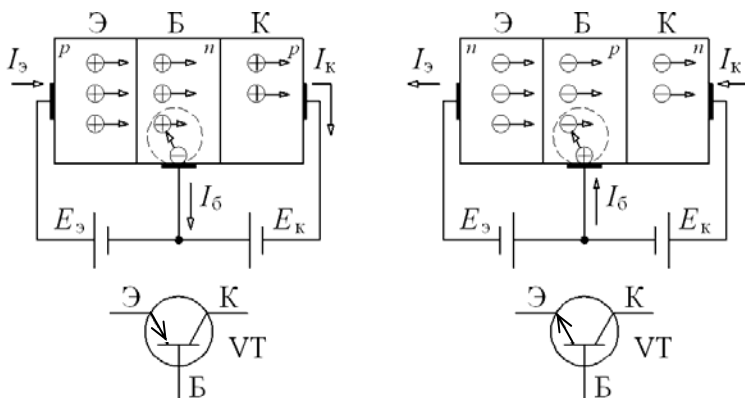


Рис. 4.2. Принцип работы типов  $p$ - $n$ - $p$  и  $n$ - $p$ - $n$  транзисторов

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  $p-n-p$  (см. рис. 4.2) (транзистор типа  $n-p-n$  работает аналогично). При отсутствии источника  $E_э$  эмиттерный ток  $I_э = 0$ , и в транзисторе через коллекторный переход в обратном направлении протекает малый ток (у кремниевых транзисторов  $I_{к0} = 0,1-10$  мкА).

При подключении источника  $E_э$  возникает эмиттерный ток  $I_э$ : дырки преодолевают переход эмиттер–база и попадают в область базы, где частично рекомбинируют со свободными электронами базы. Убыль электронов в базе пополняется электронами, поступающими из внешней цепи, образуя ток базы  $I_б$ . Благодаря диффузии часть дырок в базе, продолжая движение, доходит до коллектора и под действием электрического поля источника  $E_к$  проходит коллекторный  $p-n$ -переход. В цепи база–коллектор протекает ток:  $I_к = I_э - I_б$ .

Соотношение между приращениями эмиттерного и коллекторного токов характеризуют коэффициентом передачи тока:

$$\alpha = \left. \frac{dI_к}{dI_э} \right|_{U_{кб}=\text{const}} \approx \left. \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \right|_{U_{кб}=\text{const}} .$$

Так как  $\Delta I_к < \Delta I_э$ , то для биполярных транзисторов  $\alpha = 0,9-0,995$  ток коллектора  $I_к = I_{к0} + \alpha I_э \approx I_э$ .

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 (рис. 4.3, а), в которой входной ток равен току базы:

$$I_6 = I_3 - I_K = I_3 - (I_{K0} + \alpha I_3) = (1 - \alpha) I_3 - I_{K0} \ll I_3 \approx I_K.$$

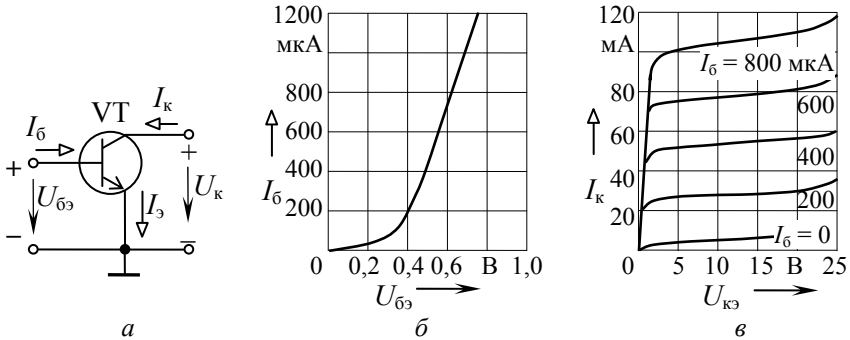


Рис. 4.3. Схема включения биполярного  $n-p-n$  транзистора с общим эмиттером: а – электрическая схема; б – входная характеристика; в – выходные характеристики

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

Входные характеристики транзистора с ОЭ (рис. 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  $I_6(U_{бэ})$ .

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

Рассмотрим один из наиболее распространенных усилительных каскадов на транзисторах – каскад с общим эмиттером (рис. 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.

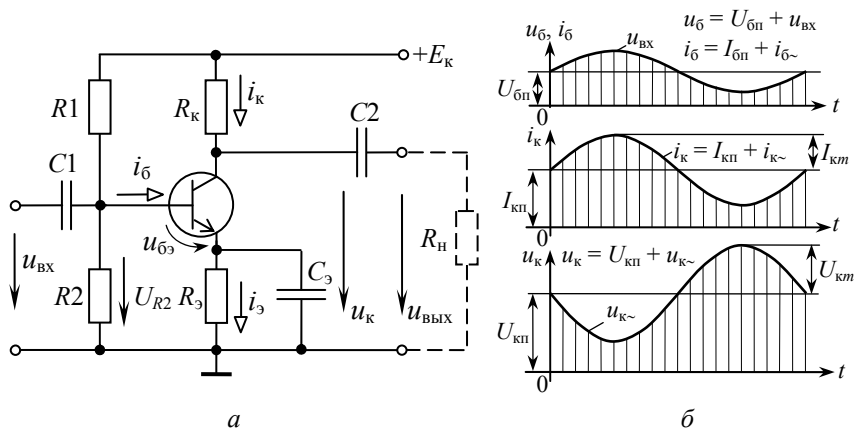


Рис. 4.4. Схема каскада с общим эмиттером:

*a* – электрическая схема; *б* – временные диаграммы напряжений и токов

Напряжение покоя между базой и эмиттером  $U_{бп}$  определяется делителем напряжения  $R1$ – $R2$  и резистором  $R_3$ , в результате возникают токи базы  $I_{бп}$  и коллектора  $I_{кп}$ . Режим работы усилителя при  $u_{вх} = 0$  называют режимом покоя.

При подаче входного сигнала  $u_{вх}$  на постоянную составляющую тока  $I_{бп}$  накладывается переменная составляющая  $i_{б~}$ , и ток базы становится пульсирующим  $i_{б}$  (рис. 4.4, *б*). Он вызывает пульсацию тока коллектора  $i_{к} = \beta i_{б}$  и коллекторного напряжения  $u_{к}$ . Переменная составляющая напряжения  $u_{к~}$  через конденсатор  $C2$  передается в нагрузку:  $u_{н} = u_{ввых}$ .

По второму закону Кирхгофа для выходной цепи:

$$E_{к} = u_{к} + R_{к} i_{к} = (U_{кп} + u_{к~}) + R_{к} (I_{кп} + i_{к~}).$$

Так как  $E_{к} = \text{const}$  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  $180^\circ$  (см. рис. 4.4, *б*).

Недостатком полупроводниковых усилителей является зависимость их параметров 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 увели-



чением 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  $i$ , незначительно, и усиливаемое напряжение практически не меняется:  $u_{бэ} \approx u_{вх}$ .

Основные характеристики усилителя: амплитудная  $U_{ввых}(U_{вх})$  и амплитудно-частотная  $K_U(f)$ , определяющая зависимость модуля коэффициента усиления напряжения от частоты усиливаемого сигнала.

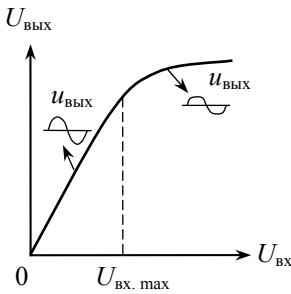


Рис. 4.5. Амплитудная характеристика

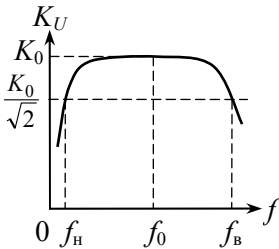


Рис. 4.6. Амплитудно-частотная характеристика

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

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 4.6) важна при усилении несинусоидальных сигналов, так как гармонические составляющие  $u_{вх}$  усиливаются в различной степени, и форма  $u_{ввых}$  искажается. По амплитудно-частотной характеристике определяют полосу пропускания усилителя – диапазон от низших  $f_H$  до высших  $f_B$  частот, в котором коэффициент усиления, где  $K_0$  – максимальный коэффициент усиления:

$$K_U \geq K_0 / \sqrt{2},$$

Уменьшение  $K_U$  при низших частотах обусловлено влиянием конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ . С понижением частоты  $X_C = 1/\omega C$  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, так как изменяется сопротивление межэлектродной емкости коллекторного перехода и уменьшается коэффициент усиления тока транзистора  $\beta$ .

### Предварительное задание к эксперименту

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

Таблица 4.1

#### Вопросы предварительного задания

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 $R_n$ 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 $R_n$ 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 (см. рис. 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  $u_{вх}$  от 0 до 100 мВ (6–7 значений), снять амплитудные характеристики усилителя  $U_{ввых}(U_{вх})$  при частоте входного сигнала  $f = 1000$  Гц для двух значений нагрузки  $R_H = 1$  кОм и  $R_H = 10$  кОм. Амплитуду выходного напряжения  $u_{ввых}$  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  $Y$ . Результаты измерений записать в табл. 4.2, построить диаграмму  $U_{ввых}(U_{вх})$ .

Таблица 4.2

Амплитудные характеристики усилителя  $U_{ввых}(U_{вх})$

$U_{вх}, \text{ мВ}$						
$R_H = 1 \text{ кОм}$	$U_{ввых}, \text{ В}$					
$R_H = 10 \text{ кОм}$						

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

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

6. Изменяя частоту входного напряжения от 20 до 200 000 Гц, снять амплитудно-частотные характеристики  $K_U(f)$  при  $U_{вх} = 5$  мВ,  $R_H = 1$  кОм для двух значений емкости  $C_2$ : 1 и 10 мкФ.

Результаты измерений записать в табл. 4.3 и построить диаграмму  $K_U(f)$ . Определить и указать на диаграмме полосу пропускания усилителя.

Таблица 4.3

Амплитудно-частотные характеристики усилителя  $K_U(f)$

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

7. Экспериментально проверить правильность ответа на вопрос предварительного задания.

### Содержание отчета

1. Цель работы; схема однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (см. рис. 4.4, а); обоснованный ответ на вопрос предварительного задания; таблицы измерений, диаграммы 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  $R_n$  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 № 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  $R_{\text{ВХ}} = 20 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$ . 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 рис. 5.1. ОУ имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на *неинвертирующий вход*  $U_{\text{ВХ. И}}$  приращение выходного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}$  совпадает по знаку (фазе) с приращением  $U_{\text{ВХ. И}}$ . Если сигнал подан на *инвертирующий вход*  $U_{\text{ВХ. И}}$ , то приращение  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеет обратный знак (в противофазе) по сравнению с приращением  $U_{\text{ВХ. И}}$ .

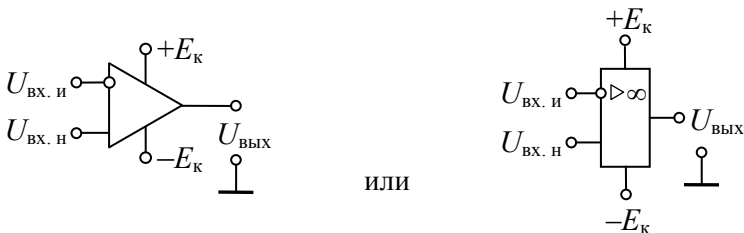


Рис. 5.1. Условное обозначение операционного усилителя

Инвертирующий вход используют в усилителях для введения отрицательной обратной связи (ООС), благодаря чему повышается стабильность  $K_U$ , снижаются нелинейные искажения, увеличивается  $R_{вх}$ .

На рис. 5.2 приведена принципиальная схема простейшего трехкаскадного ОУ.

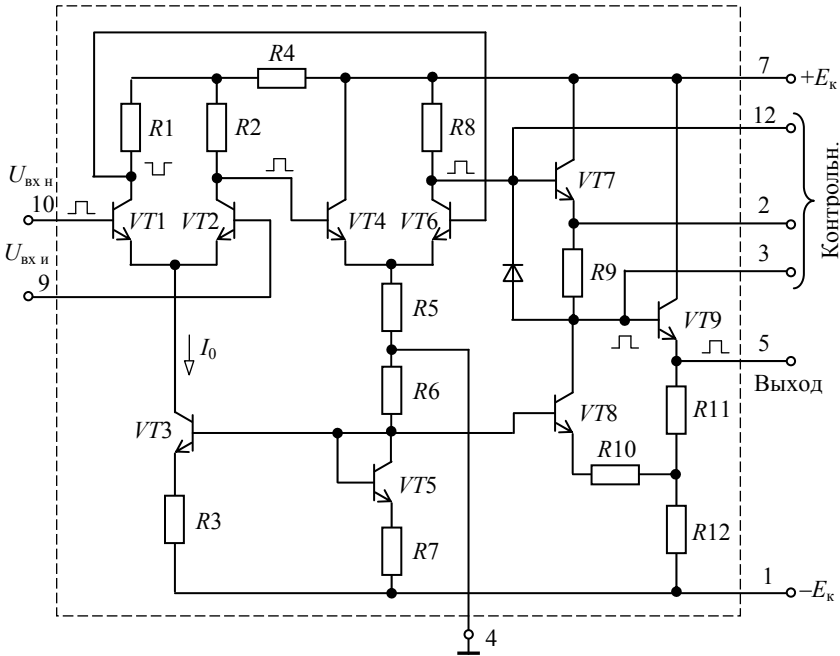


Рис. 5.2. Принципиальная схема трехкаскадного операционного усилителя

Входной дифференциальный каскад выполнен на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ .

Второй каскад на транзисторах  $VT4$  и  $VT6$  представляет собой дифференциальный усилитель с симметричным входом и несимметричным выходом. Выходным каскадом служит эмиттерный повторитель на транзисторах  $VT7$  и  $VT9$ . На схеме показано прохождение усиленного положительного сигнала, поданного на неинвертирующий вход 10.

Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные) характеристики  $U_{вых}(U_{вх})$  (рис. 5.3). На линейных

(наклонных) участках кривых коэффициент усиления остается неизменным:

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}.$$

В нелинейном режиме уровни входного сигнала ОУ превышают значения  $U_{\text{ВХ}}$  для линейного участка ( $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ. л}}$  или  $U_{\text{ВХ}} < -U_{\text{ВХ. л}}$ ).

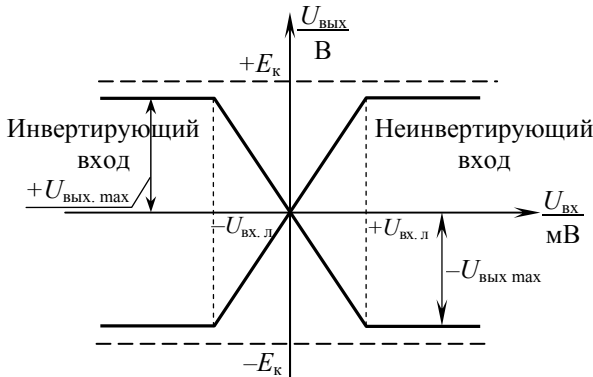


Рис. 5.3. Амплитудные (передаточные) характеристики

При этом режиме  $U_{\text{ВЫХ}}$  принимает одно из двух значений  $+U_{\text{ВЫХ. max}}$  или  $-U_{\text{ВЫХ. max}}$ . Нелинейный режим работы ОУ используют при создании импульсных устройств на базе ОУ: мультивибраторов, компараторов и др.

Рассмотрим некоторые примеры построения аналоговых схем на ОУ, работающих на линейных участках амплитудных характеристик.

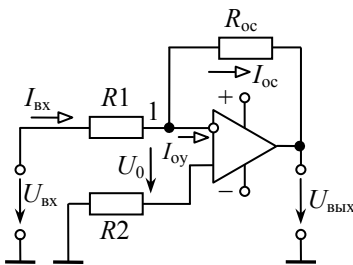


Рис. 5.4. Инвертирующий усилитель

*Инвертирующий усилитель* (рис. 5.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор  $R1$  подается  $U_{\text{ВХ}}$  и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора  $R_{\text{ОС}}$ .

Принимаем  $I_{\text{ОУ}} = 0$ , тогда для узла  $I$  справедливо равенство  $I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ОС}}$  или

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U_0}{R_1} = \frac{U_0 - U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС}}}.$$

Так как собственный коэффициент усиления ОУ  $K_{U_{\text{ОУ}}} \rightarrow \infty$ , то напряжение на входе ОУ  $U_0 = U_{\text{ВЫХ}}/K_{U_{\text{ОУ}}} \rightarrow 0$ , тогда

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

Коэффициент усиления:

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

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

*Неинвертирующий усилитель* (рис. 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

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1};$$

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

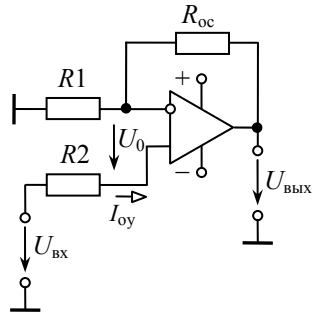


Рис. 5.5. Неинвертирующий усилитель

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

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ.2}} - U_{\text{ВХ.1}})R_{\text{ОС}}/R_1.$$



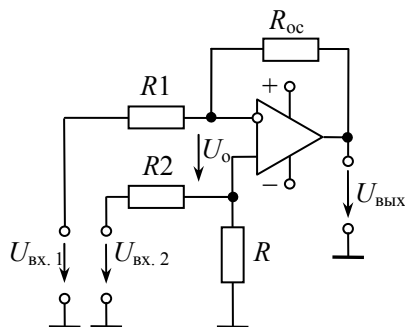


Рис. 5.6. Вычитатель-усилитель

*Сумматоры.* Для инвертирующего сумматора (рис. 5.7, а) формула выполняемой операции:

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \left( \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_{\text{ВХ.1}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} U_{\text{ВХ.2}} + \dots + \frac{R_{\text{oc}}}{R_n} U_{\text{ВХ.n}} \right).$$

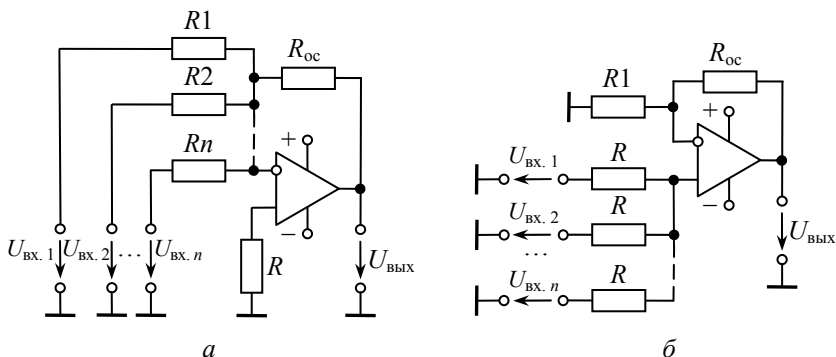


Рис. 5.7. Сумматоры:  
а – инвертирующий; б – неинвертирующий

Для неинвертирующего сумматора (рис. 5.7, б)

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_{\text{oc}}}{nR_1} (U_{\text{ВХ.1}} + U_{\text{ВХ.2}} + \dots + U_{\text{ВХ.n}}),$$

где  $n$  – число входов.

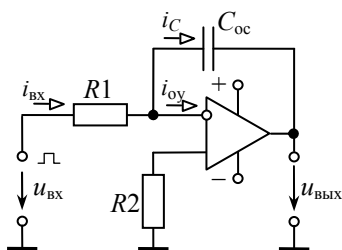


Рис. 5.8. Интегратор

Интеграторы создают заменой резистора  $R_{oc}$  конденсатором  $C_{oc}$  (рис. 5.8). Они широко распространены в аналоговых решающих и моделирующих устройствах.

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала.

$$\text{Так как } i_{ВХ} = i_C \text{ или } \frac{u_{ВХ}}{R_1} = -C_{oc} \frac{du_{ВЫХ}}{dt},$$

то

$$u_{ВЫХ} = -\frac{1}{R_1 C_{oc}} \int_0^t u_{ВХ} dt + U_{ВЫХ.0}.$$

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 (рис. 5.9). Входной сигнал подается на инвертирующий вход, выходное напряжение:

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

Генератор гармонических колебаний с мостом Вина является самовозбуждающимся генератором (рис. 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.

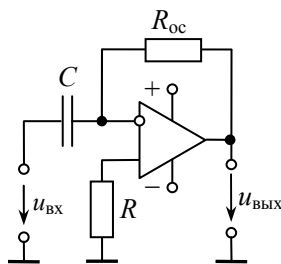


Рис. 5.9. Дифференциатор

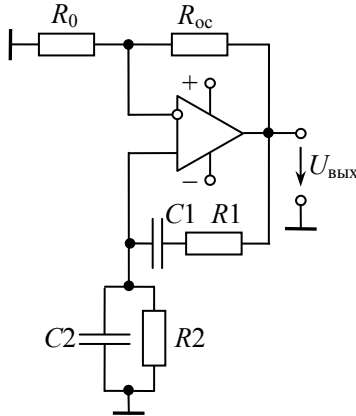


Рис. 5.10. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина

При  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$  частота генерации:

$$f_0 = 1 / (2\pi RC).$$

Элементы  $R_0, R_{oc}$  предназначены для получения требуемого коэффициента усиления.

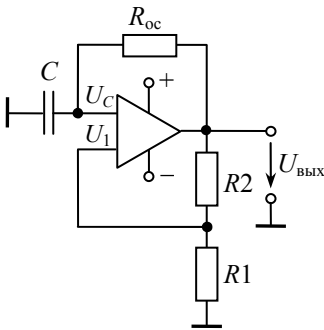


Рис. 5.11. Мультивибратор

*Мультивибратор* служит для получения прямоугольных импульсов. Мультивибратор на ОУ (рис. 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 изменяется скачком от  $U_{\text{вых. max}}$  до  $U_{\text{вых. min}} = -U_{\text{вых. max}}$ . При  $R_1 = R_2$  длительность и период импульса  $t_{\text{и}} \approx 1,1RC$ ;  $T = 2t_{\text{и}} \approx 2,2 RC$ . Изме-

няя  $\tau = RC$  или величины  $R_1, R_2$ , можно регулировать длительность и частоту импульсов.

### Предварительное задание к эксперименту

1. По заданным в табл. 5.1 значениям  $R_{oc}$  и  $R_1 = 10$  кОм рассчитать коэффициент  $K_U$  и построить амплитудную характеристику при изменении  $U_{вх}$  от 0 до 1 В.

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

Таблица 5.1

#### Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип усилителя	Рис. 5.4				Рис. 5.5			
$R_{oc}$ , кОм	20	50	100	510	20	50	100	510
Тип генератора	Рис. 5.10				Рис. 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 табл. 5.1 ( $R_1 = R_2 = 10$  кОм,  $R_{oc}$  из табл. 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 табл. 5.1. Результаты измерений записать в табл. 5.2. Точки нанести на амплитудную характеристику, рассчитанную в предварительном задании.

Таблица 5.2

## Результаты измерений

$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$	0						1000
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							
$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$	0						-1000
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							

4. Собрать электрическую цепь вычитателя-усилителя по схеме рис. 5.6 (для нечетных вариантов) или сумматора по схеме рис. 5.7, б (для четных вариантов). Установить  $R_{\text{ос}} = 10 \text{ кОм}$ , на входы подать  $U_{\text{ВХ.1}}$  и  $U_{\text{ВХ.2}}$  по указанию преподавателя. Измерить  $U_{\text{ВЫХ}}$  и рассчитать коэффициент усиления. Результаты записать в табл. 5.3.

Таблица 5.3

## Результаты измерений

$U_{\text{ВХ.1}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{ВХ.2}}, \text{ мВ}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ мВ}$	$K$

5. Собрать электрическую цепь интегратора по схеме рис. 5.8 (для нечетных вариантов) или дифференциатора по схеме рис. 5.9 (для четных вариантов).  $C = 2 \text{ нФ}$ ;  $R = 5 \text{ кОм}$ . 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 рис. 5.10 или 5.11 согласно варианту табл. 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 табл. 5.1 усилителя, расчетные коэффициент усиления  $K_U$  и амплитудные характеристики усилителя, экспериментальные точки на этих характеристиках, табл. 5.2, схема генератора гармонических колебаний (см. рис. 5.10) или схема мультивибратора (см. рис. 5.11) соответственно варианту табл. 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); табл. 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 № 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 рис. 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 рис. 6.1, б.

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

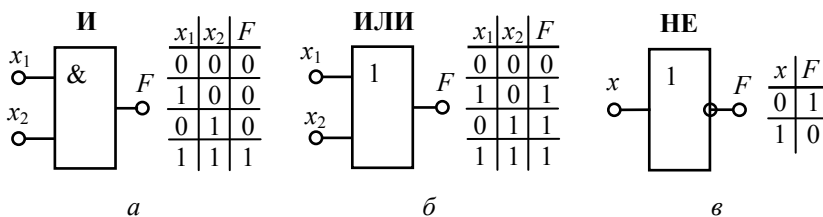


Рис. 6.1. Обозначения и таблицы истинности логических элементов:  
 а – И; б – ИЛИ; в – НЕ

В зависимости от вида используемых сигналов ЛЭ подразделяют на *потенциальные*, 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).

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 рис. 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 (см. рис. 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  $VT2$  откроется 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**.



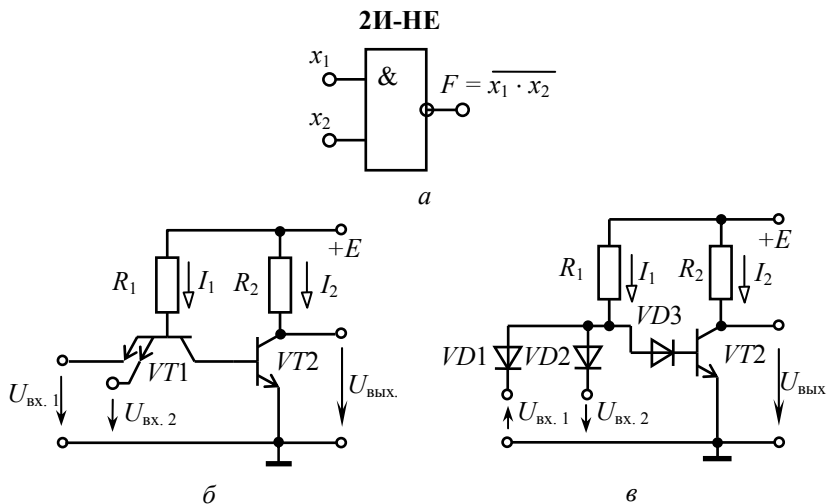


Рис. 6.2. Элемент 2И-НЕ:  
*a* – условное обозначение; *б* – схема реализации элемента ТТЛ;  
*в* – схема реализации элемента ДТЛ

Условное обозначение и схема элемента **2ИЛИ-НЕ** приведены на рис. 6.3.

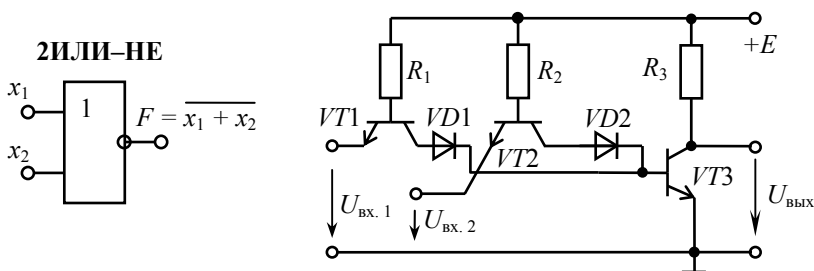


Рис. 6.3. Условное обозначение и схема реализации элемент 2ИЛИ-НЕ

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 на-

сыщения (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 ( $U_{\text{вых}} \approx E$ ).

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 рис. 6.4.

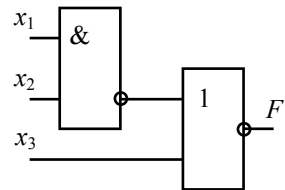


Рис. 6.4. Комбинационная схема

При большом числе входов метод подбора трудоемок. Более рационально составлять 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  $x = \overline{\bar{x}}$  и формулы де Моргана

$$\overline{x_1 \cdot x_2} = \overline{x_1} + \overline{x_2} \quad \text{и} \quad \overline{\overline{x_1} + \overline{x_2}} = \overline{\overline{\overline{x_1} + \overline{x_2}}},$$

эту функцию можно представить в виде суммы или произведения функций  $F_1 = \overline{\overline{x_1} \cdot x_2}$  и  $F_2 = \overline{\overline{x_1} + \overline{x_2}}$ , соответствующих элементам **2И-НЕ** и **2ИЛИ-НЕ**:

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

Полученному уравнению логической функции отвечает схема на рис. 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 рис. 6.5. Он состоит из четырех одноразрядных двоичных сумматоров  $SM$ .

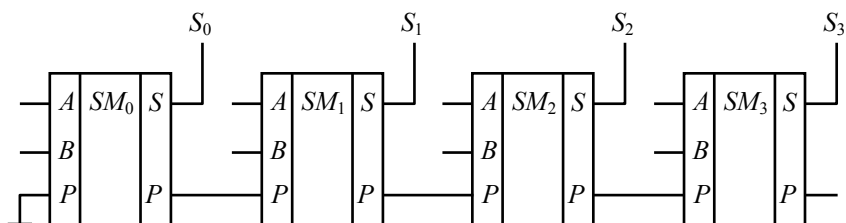


Рис. 6.5. Четырехразрядный сумматор

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, 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.

### Предварительное задание к эксперименту

1. 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 табл. 6.1. Проверить работоспособность схемы, отметить уровни напряжения (0 или 1) на входах и выходах логических элементов.

Таблица 6.1

### Исходные данные

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

2. Перевести в двоичный код и сложить два числа  $A$  и  $B$ , приведенных в табл. 6.1. Результаты записать в табл. 6.4.

### Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать логический элемент **ИЛИ-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 (табл. 6.2).

2. Исследовать логический элемент **ИИ-НЕ**. Составить и заполнить таблицу истинности (см. табл. 6.2).

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

Таблица 6.2

Результаты измерений для 2ИЛИ-НЕ и 2И-НЕ

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

Таблица 6.3

Результаты измерений для комбинационной схемы

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$F$

Таблица 6.4

Результаты измерений для сумматора

	Десятичный код	Двоичный код
$A$		
$B$		
$A+B$		

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

### Содержание отчета

Цель работы; схемы логических элементов **2И-НЕ**, **2ИЛИ-НЕ** (см. рис. 6.2, 6.3); заданная в предварительном задании логическая функция и реализующая ее комбинационная схема; структурная схема сумматора (см. рис. 6.5); заданные числа  $A$  и  $B$  в двоичном коде и результат суммирования (см. табл. 6.4); результаты экспери-

мента 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 (см. рис. 6.2, рис. 6.3)?
5. Что такое сумматор?
6. Как происходит сложение в четырехразрядном сумматоре?

### Лабораторная работа № 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, 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 ЛЭ **2ИЛИ-НЕ**.

Схема и условное обозначение  $RS$ -триггера показаны на рис. 7.1, *а, б*; таблица истинности – табл. 7.1.

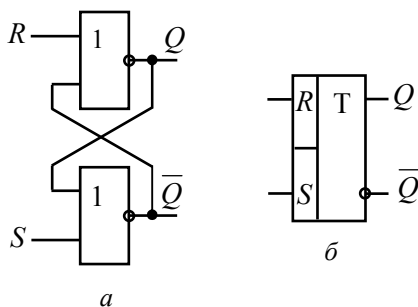


Рис. 7.1.  $RS$ -триггер:  
*а* – схема; *б* – условное обозначение

Таблица 7.1

Таблица истинности  $RS$ -триггера

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

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 **ИЛИ-НЕ** уже имеет на нижнем входе высокий уровень ( $\bar{Q} = 1$ ).

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

*Тактируемый D-триггер* имеет информационный вход  $D$  и синхровход  $C$ . Его можно построить на основе  $RS$ -триггера, добавив схему управления из двух ЛЭ **И-НЕ** (рис. 7.2, а). Условное обозначение приведено на рис. 7.2, б; таблица истинности – табл. 7.2.



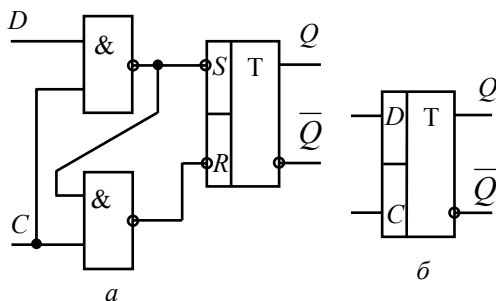


Рис. 7.2.  $D$ -триггер:  
*a* – схема; *б* – условное обозначение

Таблица 7.2

Таблица истинности  $D$ -триггера

$D$	$C$	$Q^t$	$Q^{t+1}$
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 ЛЭ **2И-НЕ** и готовят срабатывание схемы управления. Если синхроимпульсы отсутствуют, схема пассивна при любом сигнале на входе  $D$ , так как на выходах ЛЭ **2И-НЕ** удерживаются высокие уровни напряжения (1) и триггер сохранит предыдущее состояние.

Пусть в момент прихода синхроимпульса  $D = 0$ , тогда на вход  $\bar{S}$  попадает сигнал 1, а на вход  $\bar{R} = 0$ . 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  $\bar{S} = 0$ ,  $\bar{R} = 1$  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 рис. 7.3, а; временные диаграммы состояний на рис. 7.3, б.

Смена состояний триггера происходит всякий раз, когда меняется управляющий сигнал.  $T$ -триггеры одного типа реагируют на фронт импульса, т. е. на перепад 0–1, другие – на спад (перепад 1–0). В любом случае частота выходных импульсов в 2 раза ниже частоты входных.

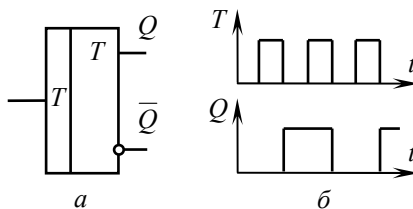


Рис. 7.3.  $T$ -триггер:  
а – условное обозначение;  
б – временные диаграммы

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 рис. 7.4, а.

Асинхронная установка триггера в исходное состояние  $Q = 1$  или  $Q = 0$  осуществляется подачей сигналов  $\bar{S} = 0$  или  $\bar{R} = 0$ . 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 (рис. 7.4, б).

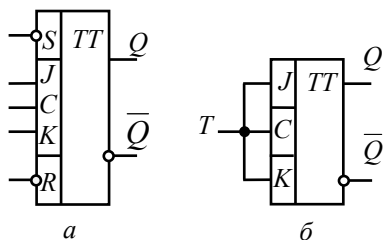


Рис. 7.4.  $JK$ -триггер:  
а – условное обозначение;  
б – работа в счетном режиме

## Предварительное задание к эксперименту

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

Таблица 7.3

### Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Тип триггера	$RS$	$D$	$RS$	$D$	$RS$	$D$	$RS$	$D$
Тип ЛЭ или ИМС	2И-НЕ	2И-НЕ	2ИЛИ-НЕ	K155ТВ1	2И-НЕ	2И-НЕ	2ИЛИ-НЕ	K155ТВ1
Выход	$Q$	$Q$	$Q$	$Q$	$\bar{Q}$	$\bar{Q}$	$\bar{Q}$	$\bar{Q}$

### Порядок выполнения эксперимента

1. Используя наборное поле, на элементах ИМС K155ЛА3 и K155ЛЕ1 собрать составленную в предварительном задании схему триггера. В качестве индикатора уровня  $Q$  использовать светодиод  $F$ .

2. 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  $\bar{Q}$  при разных наборах входных сигналов.

4. Исследовать работу  $JK$ -триггера на ИМС K155ТВ1 в режиме  $T$ -триггера. Собрать цепь по схеме рис. 7.4, б. Подавая на  $T$ -вход сигнал с клемм «0»–«1» (с переключателем), проследить изменение уровней  $Q$ . Начертить временную диаграмму.

5. Проверить работу  $T$ -триггера в качестве делителя частоты импульсов. Для этого на вход  $T$  подать сигнал от генератора импульсов.

сов. Включить осциллограф и просмотреть форму входных импульсов, зарисовать осциллограммы и определить частоту следования  $f_1$ . Включить осциллограф на выход  $Q$  триггера и зарисовать осциллограмму выходного напряжения, определить частоту  $f_2$ .

6. 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 отличаются 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 № 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 рис. 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  $T1$  поступает первый импульс, триггер переходит в состояние  $Q_1 = 1$ . При этом записывается единица в первый разряд счетчика. Положение остальных триггеров не меняется. Второй импульс перебрасывает  $T1$  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 срезу 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  $2^2 + 2^0 = 5$ .

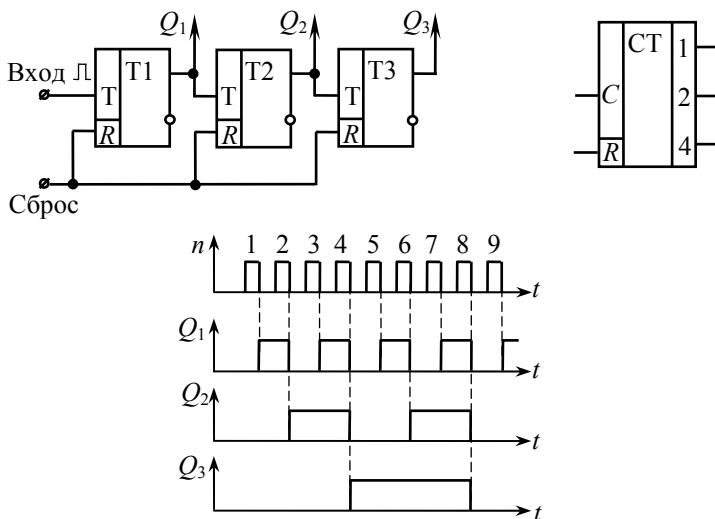


Рис. 8.1. Последовательный суммирующий счетчик

На рис. 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 еди-

62

ницу – 110. Второй импульс возвращает Т1 в состояние  $Q_1 = 1$ ,  $\bar{Q}_1 = 0$ . По спаду уровня на выходе  $\bar{Q}_1$  срабатывает Т2 –  $Q_2 = 0$ ,  $\bar{Q}_2 = 1$ . Третий импульс устанавливает  $Q_1 = 0$  и  $\bar{Q}_1 = 1$ . На этот перепад сигнала Т2 не реагирует и сохраняет предыдущее состояние. После четвертого импульса  $Q_1 = 1$ ,  $\bar{Q}_1 = 0$ ,  $Q_2 = 1$  и  $\bar{Q}_2 = 0$ . По срезу сигнала на  $\bar{Q}_2$  Т3 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 числе разрядов.

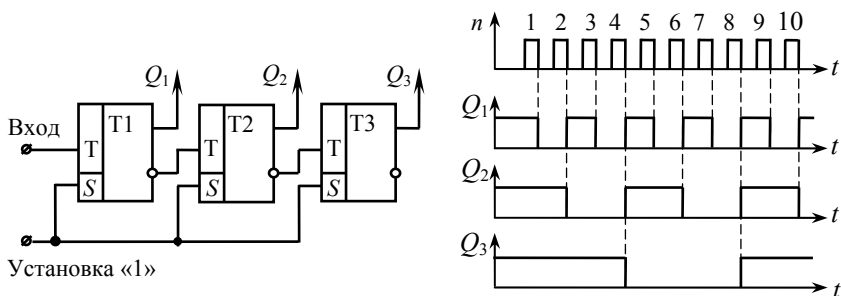


Рис. 8.2. Последовательный вычитающий счетчик

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 (табл. 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  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$ .

Таблица 8.1

Таблица состояний последовательного суммирующего счетчика с модулем счета  $K = 8$

$n$	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

Такая схема показана на рис. 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 (рис. 8.4).

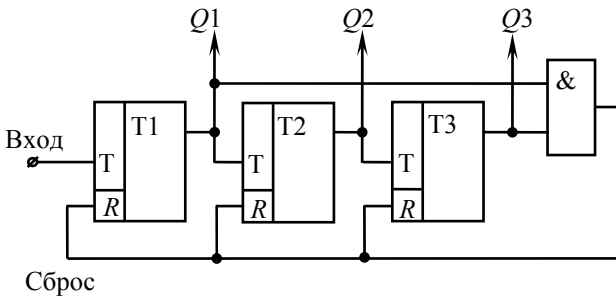


Рис. 8.3. Последовательный суммирующий счетчик с модулем счета  $K = 5$

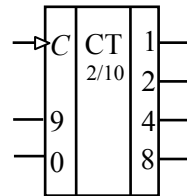


Рис. 8.4. Условное обозначение двоично-десятичного счетчика (микросхема К155ИЕ2)



Микросхема K155ИЕ4 имеет модуль счета 12, а K155ИЕ6 – реверсивный счетчик с предустановкой. Он имеет один вход для операции сложения, второй – для операции вычитания, четыре входа для предварительно заданного числа от 0 до 9, которое может быть записано в счетчик, и четыре выхода.

На шкалы измерительных приборов и на табло устройств автоматики информация подается в виде десятичных цифр. Преобразование

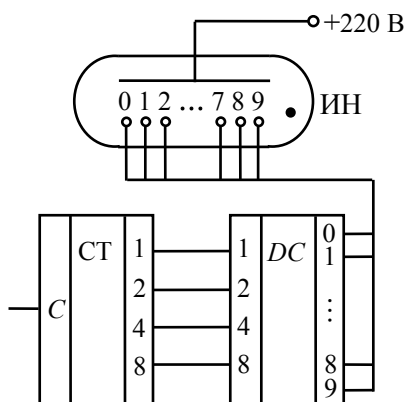


Рис. 8.5. Схема включения счетчика, дешифратора и газоразрядного индикатора ИН

вание двоично-десятичного кода, в котором работают декадные счетчики, в десятичный осуществляют *дешифраторы*. На рис. 8.5 приведена схема включения счетчика и газоразрядного индикатора ИН. Дешифратор K155ИД1 имеет четыре входа для подачи сигналов с выходов счетчика и десять выходов, соответствующих числам от 0 до 9. В зависимости от 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.

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 газораз-

рядными в настоящее время широко применяются индикаторы на светодиодах и жидких кристаллах.

### Предварительное задание к эксперименту

1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе *JK*-триггеров К155ТВ1 с модулем счета, заданным в табл. 8.2. Для сокращения числа свободных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах **2И-НЕ**, **2ИЛИ-НЕ**.
2. Заполнить таблицу состояний полученного счетчика.

Таблица 8.2

#### Исходные данные

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.
5. Собрать схему счетчика, составленную по предварительному заданию. Проверить его работу и начертить временную диаграмму. Сравнить с таблицей состояний предварительного задания.
6. 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 модулем счета (см. табл. 8.2) 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 № 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 рис. 9.1, функцию ввода информации выполняет кнопочная *клавиатура*, с помощью которой осуществляется ввод численной или символьной информации (цифр, букв и других символов).

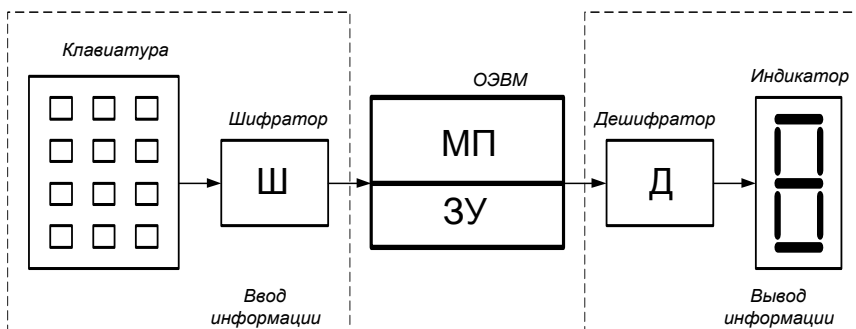


Рис. 9.1. Структурная схема простейшей цифровой системы

Для формирования двоичного кода, вводимого в *однокристалльную микроЭВМ* (ОЭВМ) при нажатии соответствующей клавиши на клавиатуре, применяется цифровое устройство, называемое *шифратором* (Ш). Обработка и управление процессом обработки инфор-

мации 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 рис. 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-разрядный шифратор позволяет получить шестнадцать ( $2^4 = 16$ ) вариантов выходного двоичного кода, достаточных для преобразования шестнадцатеричных цифр от 0 до F.

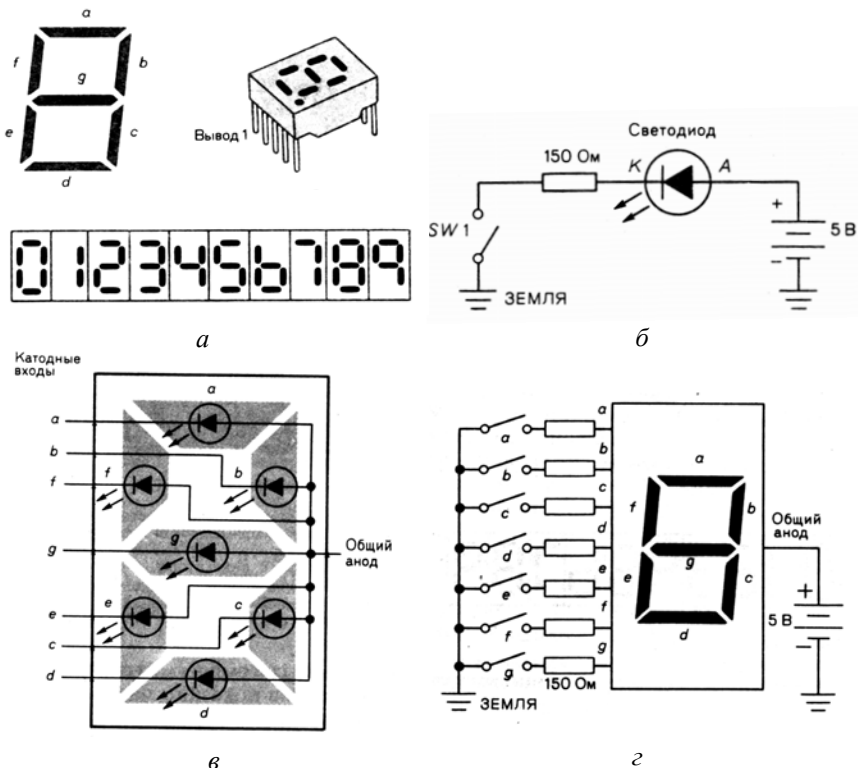


Рис. 9.2. Светодиодный индикатор:

а – внешний вид; б – схема включения светодиода; в – семисегментная светодиодная матрица; г – схема подключения светодиодного индикатора

*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 табл. 9.1.

Таблица 9.1

#### Результаты

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

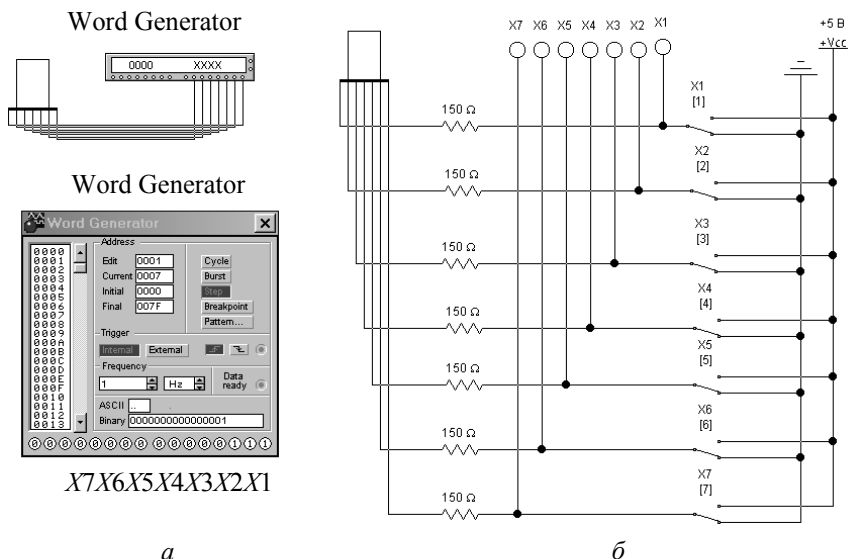


Рис. 9.3. Схема включения семисегментного индикатора  
 а – генератор двоичного кода; б – схема подключения индикатора

В схеме на рис. 9.3, а генератор двоичного кода вырабатывает на выходах  $X7$ , ...,  $X1$  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 рис. 9.3, б под действием подаваемого напряжения от шины +5 В на отдельные входы индикатора через управляемые ключи  $X1$ – $X7$  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 табл. 9.2 коды, соответствующие цифрам от 0 до 9.

Таблица 9.2

Результаты работы индикатора в пошаговом режиме

Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Код X7–X1										

2) С помощью ключей X1–X7 подайте на индикатор двоичные коды из табл. 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 (рис. 9.4).

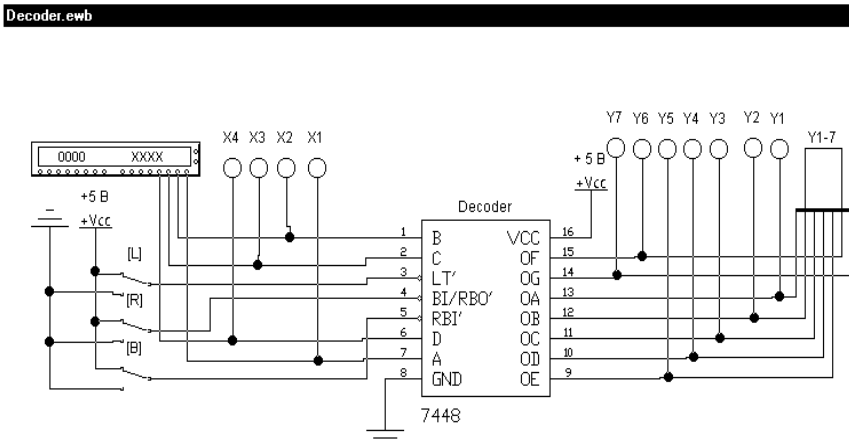


Рис. 9.4. Схема подключения индикатора к дешифратору-формирователю

На рис. 9.4 приведена схема для исследования совместной работы генератора двоичного кода, микросхемы дешифратора 7448 и семисегментного индикатора. Микросхема K155ИД1 является ана-

логом микросхемы 7447A, условное обозначение которой показано на рис. 9.5, а. Микросхемы K155ИД1 и 7447A 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.

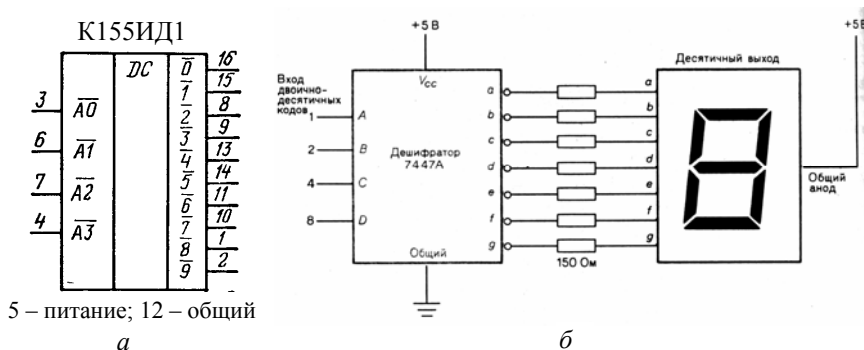


Рис. 9.5. Условное обозначение и схема подключения дешифратора: а – микросхема K155ИД1; б – схема подключения дешифратора 7447A

### Задание к эксперименту:

1) В пошаговом режиме, подавая двоичные коды на входы дешифратора, заполните таблицу состояний (табл. 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

### Результаты работы дешифратора в пошаговом режиме

$N_{10}$	Входы (двоичный код)				Выходы (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 программы *EWB* появится схема включения цифровой клавиатуры (ключи 1–9), шифратора (микросхема 74147), дешифратора-формирователя (микросхема 7447) и семисегментного индикатора (рис. 9.6).

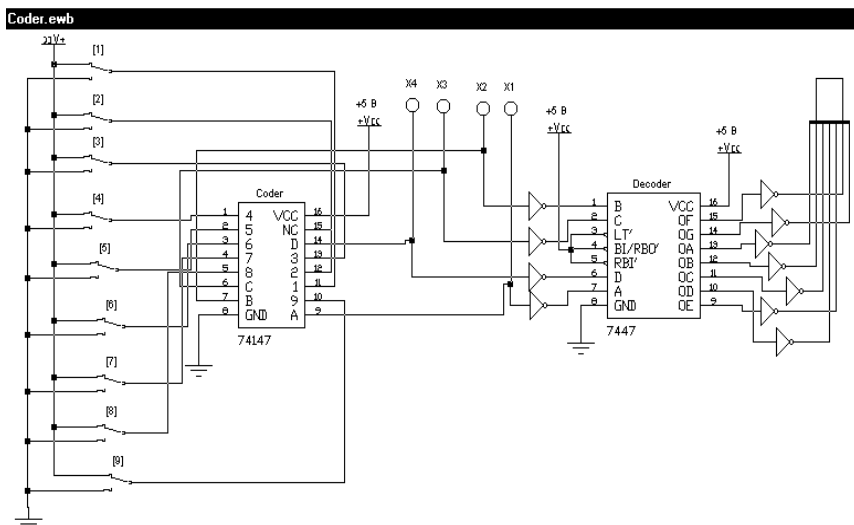


Рис. 9.6. Схема включения цифровой клавиатуры (ключи 1...9), шифратора (микросхема 74147), дешифратора-формирователя (микросхема 7447) и семисегментного индикатора

Микросхема 74147 – *приоритетный шифратор* имеет девять входов  $\bar{1}$ – $\bar{9}$  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  $\bar{9}$ .

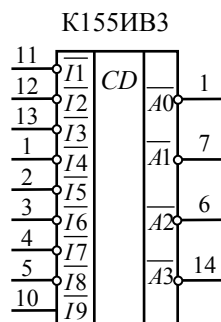
Приоритет входов проявляется в том, что при подаче активного сигнала на несколько входов активизируется (откликается) вход с большим приоритетом. Нуль кодируется на выходе, когда на все девять входов подано напряжение ВЫСОКОГО уровня, поэтому нулевого входа нет. Аналогом микросхемы 74147 является микросхема К155ИВ3, условное обозначение которой показано на рис. 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 «ноль».

2) Поочередно нажимайте клавиши цифровой клавиатуры в последовательности 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, заполняя после каждого нажатия таблицу состояния шифратора (табл. 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.



16 – питание: 8 – общий

Рис. 9.7. Микросхема К155ИВ3 – приоритетный шифратор

Таблица 9.4

## Результаты работы шифратора в пошаговом режиме

Номер ключа	Входы									Выходы				Символ индикатора
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	D	C	B	A	
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 (см. рис. 9.1), условные обозначения шифратора и дешифратора (см. рис. 9.5, а; 9.7), схемы включения светодиодного индикатора (см. рис. 9.2, з; 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?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев, Г. Н. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
2. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : ООО ИД «Альянс», 2008. – 496 с.
3. Расчет электронных схем. Примеры и задачи / Г. И. Изъюрова [и др.]. – М. : Высшая школа, 1987. – 335 с.
4. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высшая школа, 2005. – 790 с.
5. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс) : учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2005. – 768 с.
6. Прянишников, В. А. Электроника : Полный курс лекций / В. А. Прянишников. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 415 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ .....	3
<i>Лабораторная работа № 1</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ .....	4
<i>Лабораторная работа № 2</i> УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ .....	16
<i>Лабораторная работа № 3</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	23
<i>Лабораторная работа № 4</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ .....	28
<i>Лабораторная работа № 5</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ .....	37
<i>Лабораторная работа № 6</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ .....	47
<i>Лабораторная работа № 7</i> ТРИГГЕРЫ НА ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ .....	54
<i>Лабораторная работа № 8</i> ЦИФРОВЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ .....	61
<i>Лабораторная работа № 9</i> ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ .....	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	78

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
1-43 01 04 «Тепловые электрические станции»,  
1-43 00 05 «Промышленная теплоэнергетика»,  
1-43 01 08 «Паротурбинные установки  
атомных электростанций»

В 3 частях

Часть 3

### ЭЛЕКТРОНИКА

Составители:

**БЛАДЫКО** Юрий Витальевич  
**МИХАЛЬЦЕВИЧ** Георгий Александрович  
**ДОМНИКОВ** Сергей Васильевич и др.

Редактор *А. С. Кириллова*  
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 22.01.2020. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 4,65. Уч.-изд. л. 3,64. Тираж 300. Заказ 524.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.