

К.Ф. ИБРАГИМ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ЭЛЕМЕНТЫ • СХЕМЫ • СИСТЕМЫ

КРАТКАЯ
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ
ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ELECTRONIC SYSTEMS & TECHNIQUES

Second
edition

K.F. IBRAHIM

К.Ф. ИБРАГИМ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

ЭЛЕМЕНТЫ
СХЕМЫ
СИСТЕМЫ

Издание второе

Перевод с английского
В. М. Матвеева, Г. Ф. Хохлова, Ф. Г. Хохлова

Под редакцией
Н. И. Аникушина



МОСКВА «МИР» 2001

УДК 621.38
681.14
621.396
ББК 32.852
И15

Ибрагим К. Ф.

И15 Основы электронной техники: элементы, схемы, системы.
Пер. с англ. — Изд. второе. М.: Мир, 2001. — 398 с., ил.

ISBN 5-03-003394-7

Этот учебник по электронике английского автора является одновременно маленькой энциклопедией: здесь сказано обо всем понемногу, но так, что суть становится ясна даже человеку, совершенно не осведомленному в электронике.

Книга охватывает самый широкий диапазон: от элементарных понятий до функционирования сложных электронных схем и систем, включая радио и телевидение, цифровые и микропроцессорные системы, усилители, генераторы и счетчики. Многочисленные упражнения и задачи способствуют надежному усвоению материала.

Для студентов техникумов и вузов с техническим уклоном, а также их преподавателей в качестве основы курса лекций по электронике. Кроме того, эта книга послужит хорошим подспорьем тому, кто хочет познакомиться с электроникой без больших затрат времени.

ББК 32.852

Редакция литературы по информатике и новой технике

This edition of «Electronic Systems & Techniques» by K. F. Ibrahim is published by arrangement with Addison Wesley Longman, London

Русское издание книги К. Ф. Ибрагима
«Основы электронной техники: элементы, схемы, системы»
выпущено в свет издательством «Мир» по лицензионному договору
с издательством Addison Wesley Longman, Лондон

ISBN 5-03-003394-7 (русск.)
ISBN 0-582-21427-0 (англ.)

© Longman Group UK
Limited 1987, 1994
© перевод на русский язык,
«Мир», 1997, 2001

Предисловие редактора перевода

Дорогой читатель! Вы держите в руках удивительную книгу. Это одновременно и учебник, и краткая энциклопедия по самому широкому спектру электронных устройств, и книга для специалистов, занимающихся обслуживанием и ремонтом электронной техники, и, наконец, отличная шпаргалка для студента, не рассчитавшего свое время перед экзаменами. Даже если Вы приступаете к ее чтению, имея за плечами познания физики и математики на уровне старших классов средней школы, и ничего не смыслите в электронике, то после прочтения сможете уверенно вступать в дискуссии о преимуществах той или иной системы ТВ или о том, как найти неисправность в схеме. И это потому, что автор сумел в лаконичной форме ясно и доходчиво изложить основные положения электроники и на достаточно глубоком уровне описать работу схем и систем, не пользуясь при этом сложным математическим аппаратом. Например, расчет электронных усилителей, работу импульсных устройств, построение радиотехнических устройств и систем микропроцессорной техники и многое другое. Несомненный интерес представляет глава «Поиск неисправностей в электронных схемах».

В целях хорошего усвоения и закрепления излагаемого материала в книге помещено множество примеров и упражнений, а также обширный задачник (около двухсот задач с ответами) по всем темам.

В переводе сохранены условные обозначения электронных приборов и схем, а также стандарты, применяемые за рубежом. При чтении книги следует помнить, что они иногда отличаются от отечественных. Например, стандартное сетевое напряжение в Великобритании 240 В, а у нас — 220 В. Однако это несколько не отражается на усвоении материала.

Еще одно маленькое замечание. В некоторых схемах из-за недостатка места при обозначении номиналов резисторов слово «Ом» опущено, например 10 Ом → 10, 10 кОм → 10 к, 10 МОм → 10 М.

К недостаткам книги можно отнести, пожалуй, только краткость изложения, хотя именно этот фактор привлекает современных читателей.

Н. И. Анжушин

Предисловие

Эту книгу можно условно разбить на четыре части. Главы 1–4 посвящены элементарному изложению основных принципов теории электрических явлений. В главах 5–18 рассматриваются самые разнообразные электронные устройства, начиная с однокаскадного усилителя и кончая компьютерными системами. Эти устройства анализируются на уровне блок-схем (или элементарных «строительных блоков»). Приводятся также необходимые сведения о взаимосвязи различных блоков или модулей.

В главах 20–36 исследуются внутреннее устройство и работа «строительных блоков», формирующих рассматриваемую систему. Объясняются характеристики отдельных компонентов и разнообразные схемотехнические решения, используемые в электронике, причем особое внимание уделяется современным цифровым методам.

В главах 37 и 38 обсуждаются измерительные приборы, тестирование и способы обнаружения неисправностей. Рассматриваются как аналоговые, так и цифровые тестирующие устройства. В диагностике неисправности я использовал функциональный подход, когда проверяется состояние (отсечки или насыщения; ВКЛЮЧЕНО или ВЫКЛЮЧЕНО) измеряемого модуля, как первый шаг для опознавания неисправного элемента.

В это второе издание я включил дополнительно две главы, содержащие по восемьдесят полезных упражнений. Глава 19 охватывает темы глав с 1-й по 18-ю, глава 39 — темы глав с 20-й по 38-ю. Я включил также новые темы, которые необходимо знать при обслуживании наиболее распространенной электронной аппаратуры, такой, как аналоговые и цифровые преобразователи, цифровые телевизионные приемники, таймеры и тестирующие измерительные приборы на микропроцессорах.

Хотя я выбрал стиль изложения, не насыщенный математическими терминами, темы освещаются на достаточно глубоком уровне, чтобы читатель смог хорошо разобраться в электронике. Там, где это возможно, я указал типичные номиналы электронных компонентов, которые можно встретить на практике.

Книга является одновременно учебником и краткой энциклопедией по самому широкому спектру электронных устройств. Она может служить

основой для построения курса лекций по электронике для студентов старших курсов колледжей по специальности «Обслуживание и ремонт электронной техники», а также учебным пособием для студентов младших курсов технических университетов, изучающих электронику как основной предмет. Кроме того, она будет незаменимым подспорьем в работе для специалистов, занимающихся обслуживанием и ремонтом электронной техники и желающих повысить свою квалификацию теоретическими знаниями.

Считаю приятным долгом выразить благодарность фирме Thorn Consumer Electronics Ltd. за разрешение поместить в книге материалы, охраняемые авторским правом.

К. Ф. Ибрагим

1

Постоянный ток

Электрический ток

Вся материя состоит из очень маленьких частиц, называемых *атомами*. Эти атомы в свою очередь состоят из еще более мелких частиц, называемых *электронами*. Электроны вращаются вокруг центрального ядра, состоящего из одного или более *протонов* и *нейтронов*. Электроны являются отрицательно заряженными частицами, протоны — положительными, а нейтроны — нейтральными.

Если в точке А (рис. 1.1) — избыток электронов в сравнении с точкой В, то говорят, что между точками А и В существует *разность потенциалов*, или *напряжение*. Если соединить точки А и В каким-либо проводником, например простой проволокой, то избыточные электроны из точки А начнут перетекать в точку В. Этот поток электронов называется *электрическим током*.

Точка А по причине избытка электронов имеет отрицательный потенциал, а точка В — положительный.

Поток электронов подобен потоку воды, текущему из бака А в бак В, как показано на рис. 1.2. Труба между баками является эквивалентом электрического проводника, а разность уровней воды — эквивалентом разности потенциалов между точками А и В.

Хотя электроны перетекают от отрицательного полюса к положительному, принято говорить, что электрический ток течет от положительного полюса к отрицательному. Эта договоренность восходит к тому времени, когда о природе электрического тока было ничего не известно. В этой

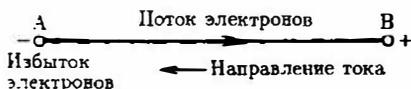


Рис. 1.1. Постоянный ток.

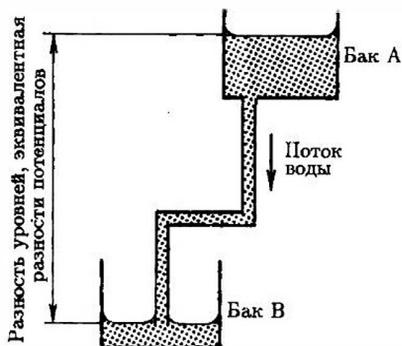


Рис. 1.2.

книге мы также будем придерживаться этого общепринятого направления электрического тока (от плюса к минусу).

Разность потенциалов, или напряжение, измеряется в вольтах. Величина электрического тока измеряется в амперах.

Сопротивление

Подобно тому как труба тормозит и ограничивает протекающий через нее поток воды, так электрическое сопротивление ограничивает протекающий через него электрический ток. Сопротивление R измеряется в омах (условное обозначение Ом).

Единицы

Основными единицами для измерения тока, напряжения и сопротивления являются ампер, вольт и ом. Существуют также производные от этих единиц, большие или меньшие основных во много десятков раз. Соотношения этих единиц приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Величина	Обозначение	Единицы
Ток	I	ампер, А
Напряжение	V	вольт, В
Сопротивление	R	ом, Ом
миллиампер	мА	$= \frac{1}{1000} \text{ А} = 10^{-3} \text{ А}$
микроампер	мкА	$= \frac{1}{1000} \text{ мА} = 10^{-3} \text{ мА}$, или $\frac{1}{1\,000\,000} \text{ А} = 10^{-6} \text{ А}$
милливольт	мВ	$= \frac{1}{1000} \text{ В} = 10^{-3} \text{ В}$
микровольт	мкВ	$= \frac{1}{1000} \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ мВ}$, или $\frac{1}{1\,000\,000} \text{ В} = 10^{-6} \text{ В}$
киловольт	кВ	$= 1000 \text{ В} = 10^3 \text{ В}$
килоом	кОм	$= 1000 \text{ Ом} = 10^3 \text{ Ом}$
мегаом	МОм	$= 1\,000 \text{ кОм} = 10^3 \text{ кОм}$, или $1\,000\,000 \text{ Ом} = 10^6 \text{ Ом}$

Закон Ома

Итак, по определению сопротивление ограничивает электрический ток. Значение тока, протекающего через резистор, зависит как от его сопротивления, так и от разности потенциалов, или напряжения, приложенного к резистору (рис. 1.3). Чем больше сопротивление, тем меньше протекающий ток. С другой стороны, чем выше напряжение, тем больше ток. Эта зависимость известна как закон Ома:

$$\text{Ток (амперы)} = \frac{\text{Напряжение (вольты)}}{\text{Сопротивление (омы)}}, \quad \text{или} \quad I = \frac{V}{R}.$$

Отсюда

$$R = \frac{V}{I} \quad \text{и} \quad V = I \cdot R.$$

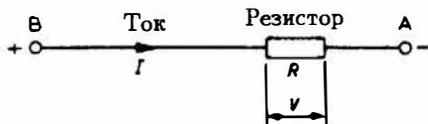
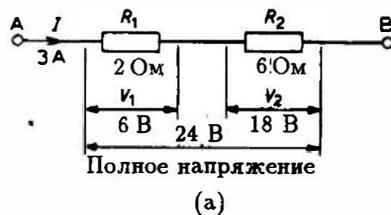


Рис. 1.3. Резистор в схеме.



(а)



(б)

Рис. 1.4. Два последовательно соединенных резистора (а) и их эквивалентное сопротивление (б).

Последовательное соединение резисторов

R_1 и R_2 — два резистора, соединенных последовательно (рис. 1.4(а)). Весь ток, который протекает через R_1 , протекает и через R_2 , т. е. последовательно включенные резисторы имеют общий ток. А вот напряжения на них различны.

Пример 1

Если $R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 6 \text{ Ом}$ и $I = 3 \text{ А}$, то

$$\text{Напряжение на } R_1: V_1 = IR = 3 \cdot 2 = 6 \text{ В} \quad \text{и}$$

$$\text{Напряжение на } R_2: V_2 = IR = 3 \cdot 6 = 18 \text{ В}.$$

Полное напряжение между точками А и В равно сумме напряжений на резисторах R_1 и R_2

$$V = V_1 + V_2 = 6 \text{ В} + 18 \text{ В} = 24 \text{ В}.$$

Общее сопротивление

R_1 и R_2 можно заменить одним сопротивлением, при котором между точками А и В будет протекать тот же ток при условии, что напряжение между точками А и В будет прежним (рис. 1.4(б)). Такое эквивалентное сопротивление называется общим сопротивлением R_T .

$$\text{Полное сопротивление } R_T = R_1 + R_2.$$

Определим общее сопротивление для схемы в примере 1:

$$R_T = R_1 + R_2 = 2 + 6 = 8 \text{ Ом}.$$

При токе $I = 3 \text{ А}$ определим напряжение

$$V = I \cdot R = 3 \cdot 8 = 24.$$

Как видим, это то же значение напряжения, которое мы получили сложением V_1 и V_2 .

Последовательное соединение трех резисторов

Пример 2

На рисунке 1.5 $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 4 \text{ кОм}$, $R_3 = 10 \text{ кОм}$ и напряжение батареи $V = 15 \text{ В}$.

$$\text{Общее сопротивление } R_T = R_1 + R_2 + R_3 = 15 \text{ кОм};$$

$$\text{Ток } I = \frac{\text{Приложенное напряжение}}{\text{Общее сопротивление}} = \frac{V}{R_T} = \frac{15 \text{ В}}{15 \text{ кОм}}$$

$$= \frac{15 \text{ В}}{15 \cdot 1000 \text{ Ом}} = \frac{1}{1000} \text{ А} = 1 \text{ мА};$$

$$\text{Напряжение на } R_1: V_1 = IR_1 = 1 \text{ мА} \cdot 1 \text{ кОм}$$

$$= \frac{1}{1000} \text{ А} \cdot 1000 \text{ Ом} = 1 \text{ В};$$

$$\text{Напряжение на } R_2: V_2 = IR_2 = 1 \text{ мА} \cdot 4 \text{ кОм} = 4 \text{ В};$$

$$\text{Напряжение на } R_3: V_3 = IR_3 = 1 \text{ мА} \cdot 10 \text{ кОм} = 10 \text{ В}.$$

Делитель напряжения

Как видно из вышеприведенного примера, если два или более резистора соединены последовательно и на них подано напряжение постоянного тока, то на всех резисторах появляются разные напряжения. Такая схема

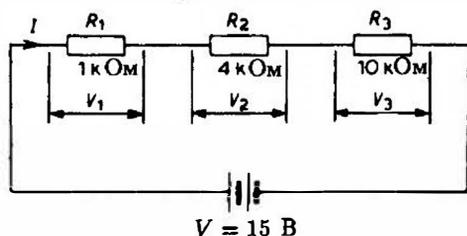


Рис. 1.5. Последовательное соединение трех резисторов.

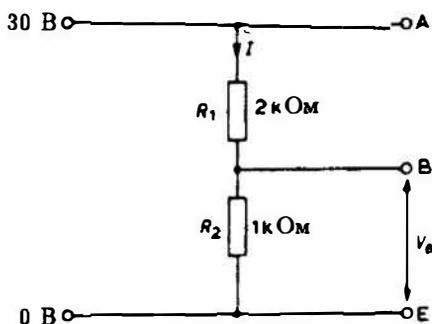


Рис. 1.6. Делитель напряжения.

называется делителем напряжения и применяется для получения разных напряжений от одного источника питания. В простейшем делителе напряжения, изображенном на рис. 1.6, $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$ и напряжение источника питания $V = 30 \text{ В}$. Напряжение в точке А равно полному напряжению источника, т. е. 30 В . Напряжение V_B в точке В равно напряжению на R_2 .

$$\begin{aligned} \text{Ток в цепи } I &= \frac{\text{Приложенное напряжение}}{\text{Общее сопротивление}} \\ &= \frac{30 \text{ В}}{1 \text{ кОм} + 2 \text{ кОм}} = \frac{30 \text{ В}}{3 \text{ кОм}} = \frac{30 \text{ В}}{3000 \text{ Ом}} \\ &= \frac{1}{100} \text{ А} = \frac{1}{100} \cdot 1000 = 10 \text{ мА}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Напряжение на } R_2 &= I \cdot R_2 = 10 \text{ мА} \cdot 1 \text{ кОм} \\ &= (10 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 \cdot 10^3) = 10 \text{ В}. \end{aligned}$$

Напряжение в точке В можно вычислить другим способом:

$$\begin{aligned} \text{Напряжение на } R_2 &= \frac{\text{Приложенное напряжение}}{\text{Общее сопротивление}} \cdot R_2 \\ &= \frac{V}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{30 \text{ В}}{2 \text{ кОм} + 1 \text{ кОм}} \cdot 1 \text{ кОм} \\ &= \frac{30}{3} \cdot 1 = 10 \text{ В}. \end{aligned}$$

Второй способ применим для любого делителя напряжения, состоящего из двух и более резисторов, включенных последовательно. Напряжение в любой точке схемы можно вычислить с помощью калькулятора за один прием, минуя вычисление тока.

Последовательное включение двух резисторов с равными сопротивлениями

Если делитель напряжения состоит из двух одинаковых резисторов, то приложенное напряжение делится на них пополам.

Последовательное включение трех резисторов с равными сопротивлениями

Пример 3

На рис. 1.7 изображен делитель напряжения, состоящий из трех одинаковых резисторов сопротивлением в 1 кОм каждый. Вычислить напряжение в точках А и В относительно точки Е.

$$\begin{aligned} \text{Общее сопротивление } R_T &= R_1 + R_2 + R_3 \\ &= 1 \text{ кОм} + 1 \text{ кОм} + 1 \text{ кОм} = 3 \text{ кОм}; \end{aligned}$$

$$V_{AE} = \text{Напряжение на } R_1 = \frac{\text{Приложенное напряжение}}{\text{Общее сопротивление}} \cdot R_1$$

$$= \frac{30 \text{ В}}{3 \text{ кОм}} \cdot 1 \text{ кОм} = 10 \text{ В};$$

$$V_{BE} = \text{Напряжение между точками В и Е}$$

$$= \text{напряжение на } (R_1 + R_2) = \frac{30 \text{ В}}{3 \text{ кОм}} \cdot (R_1 + R_2)$$

$$= \frac{30 \text{ В}}{3 \text{ кОм}} \cdot 2 \text{ кОм} = 20 \text{ В}.$$

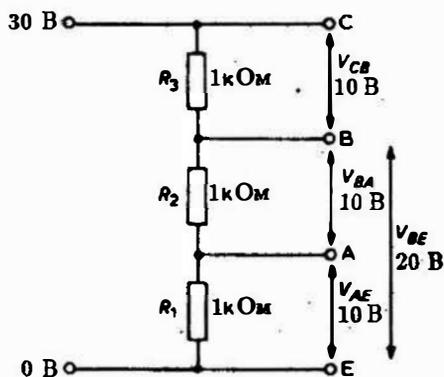


Рис. 1.7. Делитель напряжения из трех одинаковых резисторов.

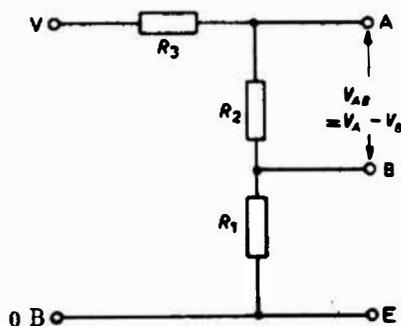


Рис. 1.8.

Разность потенциалов

Разность потенциалов между двумя точками в схеме представляет собой разность их напряжений (относительно общей точки, обычно земли). Например, разность потенциалов между точками А и В на рис. 1.8 $V_{AB} = (V_A - V_B)$, где V_A — напряжение в точке А и V_B — напряжение в точке В. Напряжения V_A и V_B измеряются относительно провода Е, имеющего нулевой потенциал. Напряжение в любой точке электрической схемы измеряется относительно нулевого провода, корпуса или земли. Например, если $V_A = 5$ В и $V_B = 3$ В, то $V_{AB} = V_A - V_B = 5 - 3 = 2$ В (рис. 1.9(а)).

Напряжения могут отличаться по знаку — быть отрицательными и положительными. Разность потенциалов между двумя точками, имеющими напряжения с противоположными знаками, равна сумме этих напряжений. Например, если $V_C = 3$ В, а $V_D = -2$ В, то $V = V_C + V_D = 3 + 2 = 5$ В (рис. 1.9(б)).

Итак, если два напряжения имеют одинаковую полярность, или одинаковые знаки, то разность потенциалов между ними равна их разности. Если же напряжения имеют разные знаки, то разность потенциалов между ними равна их сумме.

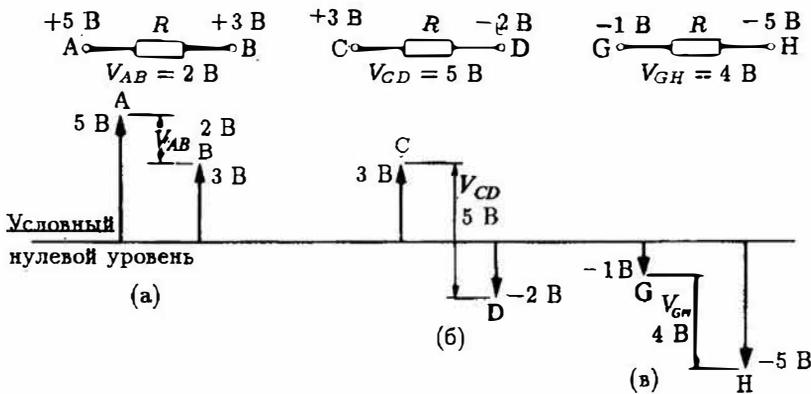


Рис. 1.9. Наглядное представление напряжений с разными знаками относительно линии нулевого потенциала.

Параллельное соединение резисторов

На рис. 1.10 изображены два резистора, R_1 и R_2 , соединенные параллельно. Ток I от батареи разветвляется в точке А на ток I_1 , протекающий через сопротивление R_1 , и ток I_2 , протекающий через сопротивление R_2 . В точке В эти токи складываются и образуют полный ток $I = I_1 + I_2$.

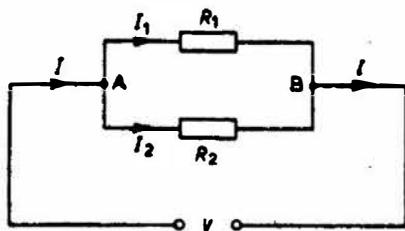


Рис. 1.10. Два резистора, соединенные параллельно.

С другой стороны, к каждому резистору приложено полное напряжение V , т. е.

$$\begin{aligned} \text{Полное напряжение } V &= \text{напряжению на } R_1 \\ &= \text{напряжению на } R_2. \end{aligned}$$

Общее сопротивление

Общее сопротивление R_T двух резисторов, соединенных параллельно, определяется формулой

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Заметим, что общее сопротивление двух параллельных резисторов всегда меньше, чем сопротивление меньшего из них. Общее сопротивление двух параллельно соединенных резисторов, имеющих одинаковое сопротивление, равно половине сопротивления одного из них.

Параллельное соединение трех и более резисторов

В общем случае общее сопротивление произвольного числа резисторов, соединенных параллельно, можно определить по формуле:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \text{ и т. д.}$$

Пример 4

Определить общее сопротивление схемы, изображенной на рис. 1.11(а).

Решение

R_1 и R_2 соединены последовательно и их общее сопротивление $R_{T1} = R_1 + R_2 = 5 + 8 = 14$ Ом.

Теперь, после замены резисторов R_1 и R_2 их общим сопротивлением R_{T1} схема на рис. 1.11(б), резистор R_3 оказался включенным параллельно с R_{T1} ,

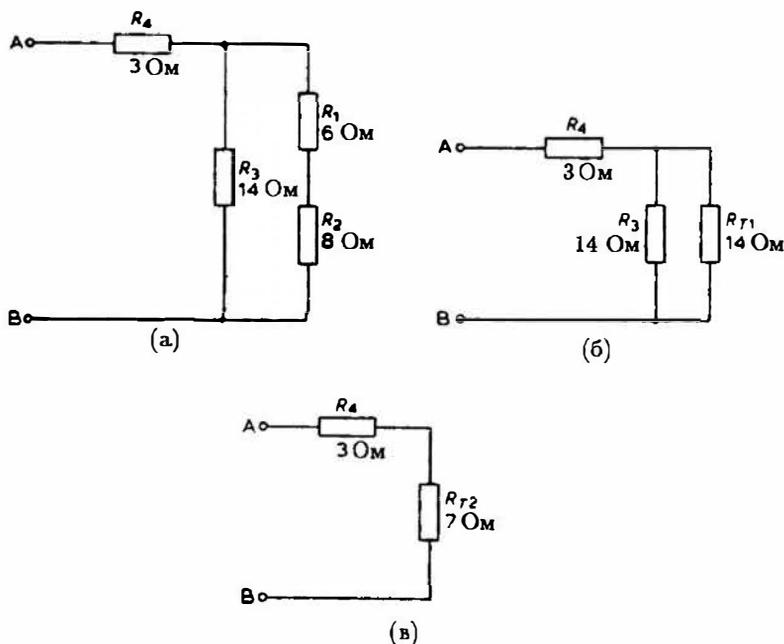


Рис. 1.11.

равным ему по величине. Следовательно, их общее сопротивление R_{T_2} в половину меньше каждого из них. Теперь схема примет вид, как показано на рис. 1.11(в), где $R_{T_2} = 7$ Ом и соединено последовательно с R_4 . Отсюда общее сопротивление схемы между точками А и В равно $R_{T_2} + R_4 = 7 + 3 = 10$ Ом.

Законы Кирхгофа

В сложных схемах типа моста и Т-образных схем токи и напряжения можно определить с помощью законов Кирхгофа.

Закон Кирхгофа для тока гласит: сумма токов, притекающих к узлу, равна сумме токов, вытекающих из узла. Рассмотрим схему на рис. 1.12. Здесь ток I_1 — полный ток, притекающий к узлу А, а токи I_2 и I_3 — токи, вытекающие из узла А. Следовательно, можно записать

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Аналогично для узла В

$$I_3 = I_4 + I_5.$$

Предположив, что $I_4 = 2$ мА и $I_5 = 3$ мА, получим

$$I_3 = 2 + 3 = 5 \text{ мА.}$$

Приняв $I_2 = 1$ мА, получим

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1 + 5 = 6 \text{ мА.}$$

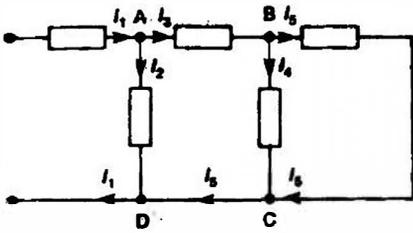


Рис. 1.12.

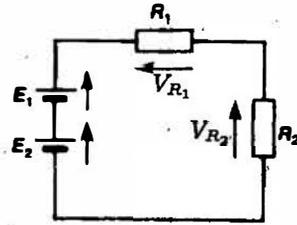


Рис. 1.13.

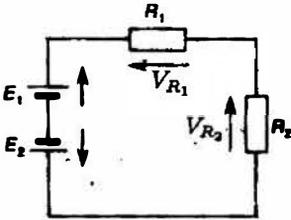


Рис. 1.14.

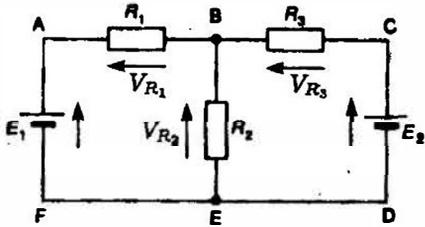


Рис. 1.15.

Далее можно записать для узла C

$$I_6 = I_4 + I_5 = 2 + 3 = 5 \text{ мА}$$

и для узла D

$$I_1 = I_2 + I_6 = 1 + 5 = 6 \text{ мА}.$$

Закон Кирхгофа для напряжений гласит, что полная ЭДС, действующая в замкнутом контуре, равна сумме падений напряжения на всех резисторах в этом контуре.

Рассмотрим схему на рис. 1.13, состоящую из одного контура. Здесь полная ЭДС $E_1 + E_2$, действующая внутри контура, равна сумме падений напряжения на резисторах R_1 и R_2 :

$$E_1 + E_2 = V_{R_1} + V_{R_2}.$$

Если изменить полярность E_2 на противоположную (рис. 1.14), то она будет иметь то же направление (против часовой стрелки), что и V_{R_1} и V_{R_2} :

$$E_1 - E_2 = V_{R_1} + V_{R_2} \quad \text{или}$$

$$E_1 = E_2 + V_{R_1} + V_{R_2}.$$

Рассмотрим схему, имеющую несколько контуров (рис. 1.15). Для контура ABEF можно записать

$$E_1 = V_{R_1} + V_{R_2},$$

а для контура ACDF

$$E_1 - E_2 = V_{R_1} + V_{R_3}.$$

Обходя контур BCDE, видим, что ЭДС E_2 имеет то же направление (против часовой стрелки), что и V_{R_3} :

$$E_2 + V_{R_3} = V_{R_2}.$$

Мощность

Когда ток протекает через сопротивление, то энергия выделяется в резисторе в виде тепла, т. е. резистор работает как электрический нагреватель, преобразуя электрическую энергию в тепловую.

Электрическая мощность измеряется в ваттах (Вт) и определяется по формуле

$$P = V \cdot I,$$

где V — напряжение в вольтах, I — ток в амперах.

Используя закон Ома $I = \frac{V}{R}$, можно записать формулу для мощности в другом виде:

$$P = I \cdot R \cdot I = I^2 \cdot R, \quad \text{или} \quad P = V \cdot \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}.$$

Рабочие примеры

Пример 5

Определите падение напряжения на R_3 (рис. 1.16).

Решение

Общее сопротивление между точками А и В равно $\frac{1}{2} \cdot 12 = 6$ Ом. Следовательно падение напряжения на R_3 , равное напряжению между точками А и В, составит $V_{AB} = 4,5$ В.

Пример 6

Определите напряжение между точками X и Y (рис. 1.17).

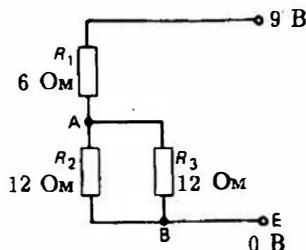


Рис. 1.16.

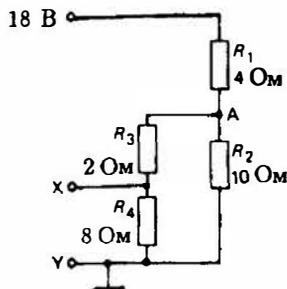


Рис. 1.17.

Решение

$$R_3 + R_4 = 2 + 8 = 10 \text{ Ом.}$$

Общее сопротивление между точками А и У равно $10/2 = 5 \text{ Ом}$.

$$\text{Отсюда напряжение в точке А } V_{AY} = \frac{18}{4+5} \cdot 5 = \frac{18}{9} \cdot 5 = 10 \text{ В.}$$

$$\text{Напряжение между точками X и Y } V_{XY} = \frac{10}{2+8} \cdot 8 = \frac{10}{10} \cdot 8 = 8 \text{ В.}$$

Пример 7

На резистор с сопротивлением 2,5 Ом подано напряжение 50 В. Определите мощность, рассеиваемую резистором.

Решение

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{50 \cdot 50}{2,5} = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт.}$$

Пример 8

Рассмотрим цепь на рис. 1.18. Напряжение в точке А при разомкнутом ключе S равно 15 В. Как изменится это напряжение, если ключ замкнуть?

Решение

Когда ключ S замкнут, общее сопротивление цепи равно $0,1 + 4,9 = 5 \text{ Ом}$ и по цепи течет ток $15/5 = 3 \text{ А}$. Падение напряжения на нагрузочном резисторе с сопротивлением 4,9 Ом, составляющее $3 \cdot 4,9 = 14,7 \text{ В}$, и будет искомым напряжением в точке А.

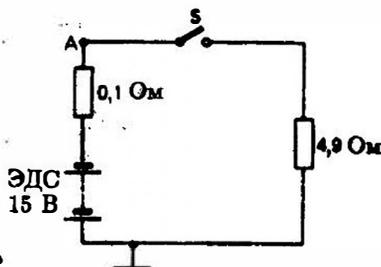


Рис. 1.18.

2

Переменный ток

Переменный ток все время изменяет свое направление в отличие от постоянного, который протекает только в одном направлении. Постоянный ток вырабатывают батареи и источники постоянного тока, а переменный — генераторы сигналов и государственные энергетические системы.

Синусоидальные колебания

Форма переменного тока или напряжения может принимать самые различные виды. Наиболее распространенной является синусоидальная форма переменного напряжения или тока (рис. 2.1). Синусоидальное колебание имеет два максимальных значения, или пика: положительный пик и отрицательный. Пиковое значение называется также амплитудой синусоиды. Значение синусоидального напряжения, измеренное от пика до пика (размах), является разностью потенциалов между положительным пиком и отрицательным.

$$\begin{aligned} \text{Размах} &= \text{Положительная амплитуда} + \text{Отрицательная амплитуда} \\ &= \text{Удвоенная амплитуда.} \end{aligned}$$

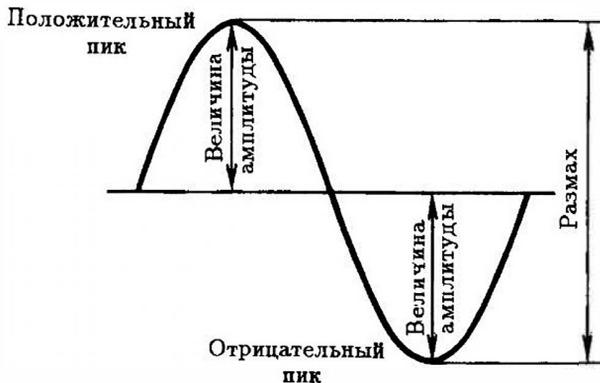


Рис. 2.1. Синусоидальные колебания переменного тока.

Среднеквадратическое значение

Постоянный ток имеет постоянное значение, и это значение можно использовать во всех вычислениях. Значение же переменного тока изме-

яется во времени. Чтобы преодолеть эту трудность, за «постоянное» значение переменного тока приняли и используют его среднеквадратическое значение.

Среднеквадратическое значение переменного тока является эквивалентом значения постоянного тока, при котором вырабатывается такая же мощность, что и при исходном значении переменного тока. Если известно среднеквадратическое значение переменного тока, то его можно использовать для вычисления мощности так же, как если бы это было постоянное напряжение или ток. Например:

Мощность пост. тока = Постоянный ток × Постоянное напряжение;

Мощность перем. тока = Среднеквадр. значение тока × Среднеквадр. значение напряжения.

Значения переменного тока и напряжения всегда задают в виде среднеквадратической величины, за исключением специально оговоренных случаев.

Пример 1

Какое сопротивление имеет домашний электрический обогреватель мощностью 1 кВт?

Решение

Домашние обогреватели работают от сетевого напряжения, имеющего среднеквадратическое значение 240 В (в России 220 В. — Прим. перев.). Мощность, потребляемая обогревателем, составляет 1 кВт = 1000 Вт. Из формулы $P = \frac{V^2}{R}$ определяем

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{240 \cdot 240}{1000} = 57,6 \text{ Ом.}$$

Соотношение между пиковыми и среднеквадратическими значениями

Среднеквадратическое значение сигнала переменного тока зависит от его формы. Так, среднеквадратическое значение синусоидального сигнала составляет 0,707 его пикового значения (амплитуды). Заметим, что это справедливо только для синусоидального сигнала. Например, если амплитуда синусоидального сигнала $V_p = 10 \text{ В}$, то его среднеквадратическое значение составит $V_{\text{ср.кв.}} = 0,707 \cdot V_p = 0,707 \cdot 10 = 7,07 \text{ В}$ (см. рис. 2.2). Из соотношения $V_{\text{ср.кв.}} = 0,707 \cdot V_p$ следует, что

$$V_p = \frac{1}{0,707} \cdot V_{\text{ср.кв.}} = 1,414 V_{\text{ср.кв.}}$$

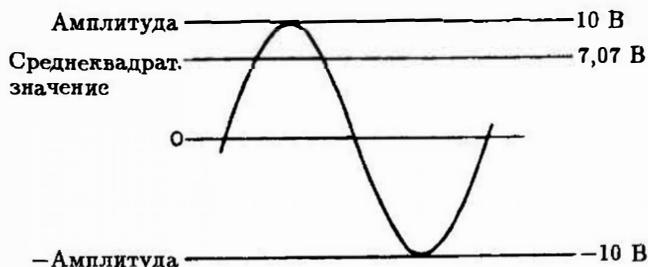


Рис. 2.2. Среднеквадратическое значение синусоидального сигнала.

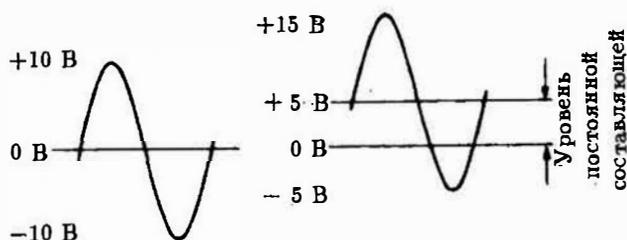


Рис. 2.3. Постоянная составляющая сигнала переменного тока.

Постоянная составляющая в сигнале переменного тока

До сих пор мы имели дело с сигналами переменного тока, которые не содержали постоянной составляющей. Рассмотрим два синусоидальных сигнала, изображенных на рис. 2.3. Левый сигнал не имеет постоянной составляющей, и его положительный пик равен отрицательному. Правый же сигнал содержит составляющую постоянного тока величиной 5 В.

Постоянная составляющая переменного тока называется также *средним*, или *усредненным*, значением сигнала переменного тока.

Определим постоянную составляющую сигнала, имеющего прямоугольную форму (рис. 2.4).

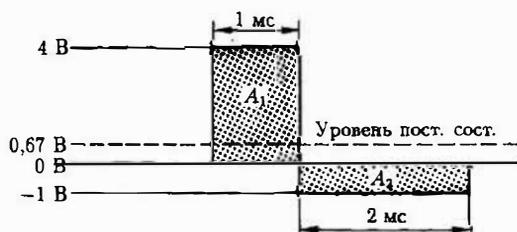


Рис. 2.4.

1. Сначала определим положение нулевого уровня.
2. Вычислим площадь A_1 , лежащую выше нулевого уровня:
 $A_1 = 4 \cdot 1 = 4$.
3. Вычислим площадь A_2 , лежащую ниже нулевого уровня:
 $A_2 = 1 \cdot 2 = 2$.
4. Вычислим суммарную площадь:
 $A_1 - A_2 = 4 - 2 = 2$.
5. Отсюда среднее значение напряжения за период равно

$$\text{Суммарная площадь/Время периода} = 2/3 = 0,67 \text{ В.}$$

Среднеквадратическое значение сложных сигналов

Как уже говорилось, соотношение

$$\text{Среднеквадратическое значение} = 0,707 \text{ амплитуды}$$

справедливо только для синусоидальных сигналов. Среднеквадратическое значение сигналов, имеющих другую форму, может быть определено следующим образом.

1. Определить площадь сигнала за один период. Заметим, что при определении площади отрицательное значение превращается в положительное.
2. Определить среднее значение площади сигнала за период.
3. Вычислить квадратный корень из средней площади сигнала за период.

Определим среднеквадратическое значение сигнала, имеющего форму меандра (рис. 2.5(a)). Площадь положительного полупериода этого сигнала равна $3 \cdot 3 = 9$. Площадь отрицательного полупериода составляет $(-3) \cdot (-3) = 9$. Среднее значение площади за период, следовательно, равно 9. Отсюда среднеквадратическое значение напряжения будет $\sqrt{9} = 3 \text{ В}$.

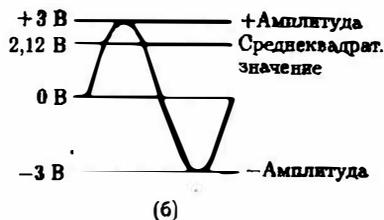
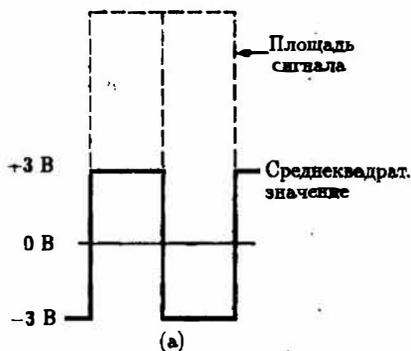


Рис. 2.5. Сравнение среднеквадратических значений прямоугольного и синусоидального сигналов.

Для сравнения определим среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, имеющего значение положительной и отрицательной амплитуды $+3$ В и -3 В соответственно (рис. 2.5(б)): $0,707 \cdot 3$ В = $2,12$ В.

Как видим, прямоугольный сигнал имеет большее среднеквадратическое значение. Это объясняется тем, что площадь под прямоугольной огибающей больше, чем площадь под синусоидой, хотя оба сигнала имеют одинаковые значения положительного и отрицательного пиков. В данном случае среднеквадратическое значение прямоугольного сигнала равно его пиковому значению.

На рис. 2.6 изображен прямоугольный сигнал, имеющий только положительные значения. Среднеквадратическое значение этого сигнала меньше его пикового значения.

При однополупериодном выпрямлении среднеквадратическое значение напряжения равно половине его амплитуды.

При двухполупериодном выпрямлении среднеквадратическое значение такое же, как у полной синусоиды, т. е. $0,707$ амплитуды (рис. 2.7), поскольку при вычислении среднеквадратического значения положительная полуволна сигнала идентична отрицательной, положительный полупериод идентичен отрицательному.

Заметим, что постоянная составляющая, или среднее значение сигнала, это просто усредненное значение напряжения за один период, не имеющее никакого отношения к среднеквадратическому значению.

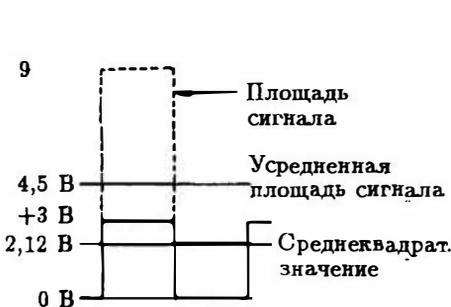


Рис. 2.6. Среднеквадратическое значение прямоугольного сигнала, имеющего только положительную полярность.

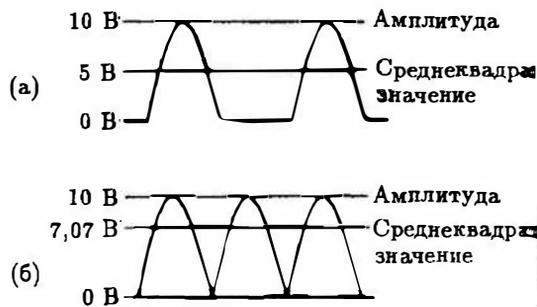


Рис. 2.7. (а) При однополупериодном выпрямлении синусоидального напряжения его среднеквадратическое значение равно $0,5$ амплитуды. (б) При двухполупериодном выпрямлении синусоидального напряжения его среднеквадратическое значение равно $0,707$ амплитуды.

3

Форма сигнала

Изменения тока или напряжения во времени можно представить в виде различных линий, или графиков. Постоянный ток, как неизменяющийся во времени, изображается прямой линией (рис. 3.1(а)), а переменный ток — самыми различными кривыми. Форма кривой переменного тока отражает периодические изменения значения тока от максимального к минимальному, затем опять к максимальному и т. д. (рис. 3.1(б)). Несколько таких кривых показано на рис. 3.2.

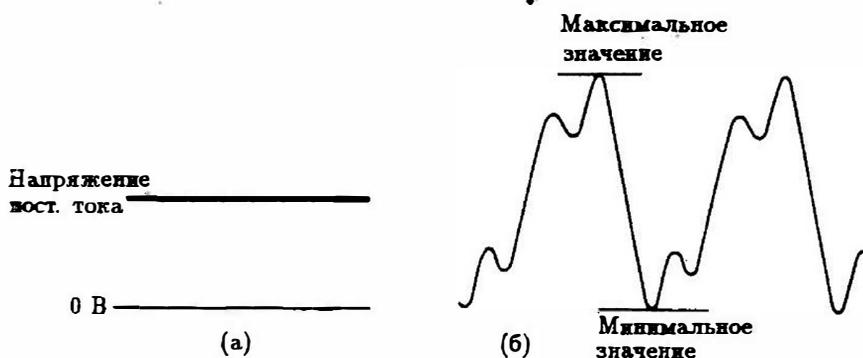


Рис. 3.1. График постоянного (а) и переменного (б) токов.

Цикл

Повторяющаяся часть сигнала переменного тока называется циклом сигнала. Так, на кривых, изображенных на рис. 3.2, точка А является началом цикла, а точка В — его концом и началом следующего цикла.

Частота

Количество циклов сигнала в единицу времени называется частотой сигнала. Единица измерения частоты — герц (Гц). Например, если цикл изменения сигнала повторяется один раз в секунду, то частота сигнала равна 1 Гц, если 10 раз — 10 Гц (рис. 3.3).

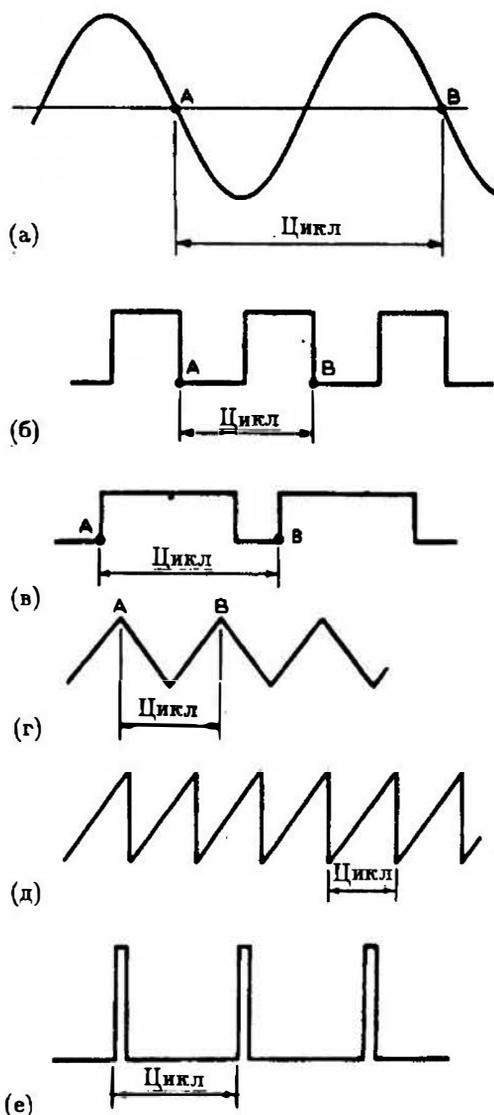


Рис. 3.2. Типы кривых переменного тока: синусоида (а), меандр (б), прямоугольный (в), треугольный (г), пилообразный (д), импульсы (е).

Длительность периода

Время, за которое завершается полный цикл изменения сигнала, называется длительностью его периода T или просто периодом. Например, если сигнал проходит все изменения за одну секунду, то его период равен 1 с, если за половину секунды, то период равен 0,5 с.

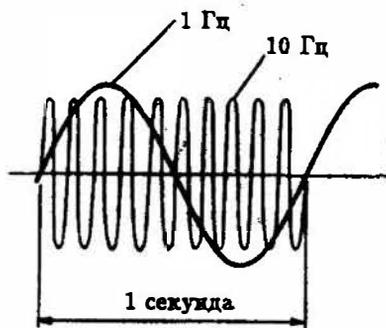


Рис. 3.3. Сигналы различных частот.

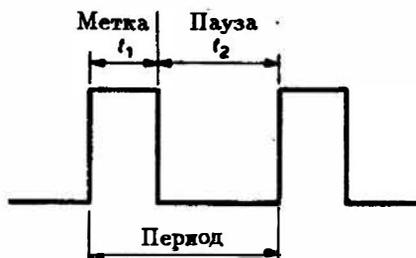


Рис. 3.4. Коэффициент заполнения меньше 1.

Метка и пауза

Один период прямоугольного сигнала можно разделить на метку (Mark) и паузу (Space)¹⁾ (рис. 3.4). Отношение длительности метки к длительности паузы называется коэффициентом заполнения. Если длительность метки t_1 , а длительность паузы t_2 , то

$$\text{Коэффициент заполнения} = \frac{\text{Длительность метки}}{\text{Длительность паузы}} = \frac{t_1}{t_2}.$$

Поскольку сигнал совершает полный цикл изменения за один период, то

$$\text{Период} = t_1 + t_2.$$

Если коэффициент заполнения равен 1, то

$$\text{Длительность метки } t_1 = \text{Длительность паузы } t_2.$$

Это можно записать иначе:

$$\text{Период} = 2 \cdot \text{Длительность паузы} = 2 \cdot \text{Длительность метки}.$$

Единицы измерения частоты f :

герц, Гц; килогерц, кГц; мегагерц, МГц.

Единицы измерения периода T :

секунда, с;

миллисекунда, мс = $\frac{1}{1000}$ с = 10^{-3} с;

микросекунда, мкс = $\frac{1}{1000}$ мс = 10^{-3} мс = 10^{-6} с.

¹⁾ Термины метка, пауза и коэффициент заполнения «пришли» из телеграфии. —
Форм. ред.

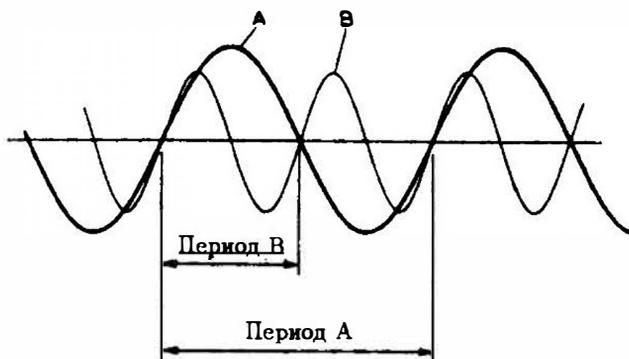


Рис. 3.5.

Соотношение между частотой и периодом

Рассмотрим графики сигналов на рис. 3.5. Сигнал В имеет частоту вдвое выше, чем сигнал А, но период сигнала В составляет половину периода сигнала А. При увеличении частоты сигнала его период уменьшается, и наоборот.

$$\text{Частота} = \frac{1}{\text{Период}} \text{ (в герцах)}, \text{ или } f = \frac{1}{T} \text{ (в герцах)},$$

$$\text{Период} = \frac{1}{\text{Частота}} \text{ (в секундах)}, \text{ или } T = \frac{1}{f} \text{ (в секундах)}.$$

Следующая таблица содержит соотношения единиц измерения частоты и периода. Будет полезно, если вы ее запомните.

Частота f	1 Гц	1 кГц	1 МГц
Период T	1 с	1 мс	1 мкс

Звуковые волны

Звуковые волны возникают в воздухе, например, когда кто-нибудь говорит или при работе громкоговорителя или пневматической дрели, при настройке по камертону и т. д. Звуковые волны изменяют давление воздуха, и воздух необходим им для распространения.

Интенсивность звуковых волн характеризуется громкостью, тон характеризует их частоту. При изменении частоты изменяется тон звука.

Звуковые частоты

Диапазон звуковых частот, которые воспринимаются ухом человека, называется диапазоном аудиочастот. Он простирается от 20 Гц до 20 кГц.

Звуки частотой ниже 20 Гц и выше 20 кГц человек не слышит. На основе этого создан специальный свисток для подзыва собаки. Частота звукового сигнала этого свистка превышает 20 кГц, поэтому собаки, имеющие более широкий частотный диапазон чувствительности уха, слышат его, а человек — нет.

Чистые и инструментальные тоны

Чистым тоном называется простое синусоидальное колебание, содержащее одну частоту (рис. 3.2(а)). Инструментальный тон представляет собой сложное колебание, состоящее из ряда синусоидальных колебаний разной частоты (рис. 3.1(б)). Такие звуковые колебания возникают, когда звучит речь или музыка.

Гармоники

При сложении нескольких различных по частоте синусоидальных колебаний возникает сложное колебание. И наоборот, сложный сигнал можно разложить на ряд входящих в него чистых синусоидальных колебаний. Среди этих простых синусоидальных колебаний различают основную, или первую, гармонику и набор гармоник. Таким образом, любой сложный сигнал может быть разложен на следующие компоненты:

1. *Первая, или основная, гармоника.* Простое синусоидальное колебание, имеющее тот же период, что и исходное сложное колебание.
2. *Набор гармоник.* Простые синусоидальные колебания, частоты которых кратны частоте основной гармоник. Например, если частота первой гармоник равна 100 Гц, то

$$\text{частота 2-й гармоник} = 2 \cdot 100 = 200 \text{ Гц};$$

$$\text{частота 3-й гармоник} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ Гц};$$

$$\text{частота 4-й гармоник} = 4 \cdot 100 = 400 \text{ Гц и т. д.}$$

Чем больше номер гармоник, т. е. чем выше ее частота, тем меньше ее амплитуда. Поэтому высшими гармониками обычно пренебрегают.

Высота тона

Высота тона звуковой волны указывает, в какой части диапазона звуковых частот находится ее частота.

Звуки высокой тональности занимают верхнюю половину диапазона частот, а звуки низкой тональности — нижнюю половину. Женские

голоса обычно имеют более высокую тональность, чем мужские. Барабан издает низкие звуки, а флейта — очень высокие. В сложном колебании частота основной гармоники определяет тональность сигнала.

Качество звука

Качество звука определяется числом гармоник инструментального сигнала, которые воспроизводятся аппаратурой без искажения.

Примеры некоторых сложных сигналов

1. Основная гармоника + 3-я гармоника (рис. 3.6).
2. Основная гармоника + 2-я гармоника (рис. 3.7).

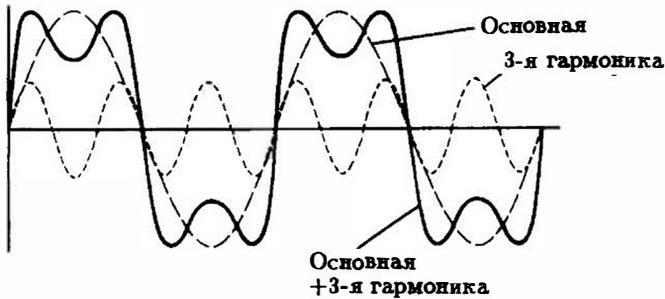


Рис. 3.6. Основная гармоника + 3-я гармоника (аппроксимация прямоугольного сигнала).



Рис. 3.7. Основная гармоника + 2-я гармоника (аппроксимация пилообразного сигнала).

Гармонические составляющие прямоугольного сигнала

Прямоугольный сигнал содержит основную гармонику плюс бесконечное множество нечетных гармоник. Например, прямоугольный сигнал частотой 1 кГц состоит из

- основной гармоники 1 кГц;
- 3-й гармоники $3 \cdot 1 = 3$ кГц;
- 5-й гармоники $5 \cdot 1 = 5$ кГц;
- 7-й гармоники $7 \cdot 1 = 7$ кГц и т. д.

Заметим, что сложные колебания, содержащие только нечетные гармоники, имеют круто нарастающие фронты и резко спадающие срезы. Чем больше нечетных гармоник содержит сигнал, тем ближе его форма к форме прямоугольного сигнала.

Гармонические составляющие пилообразного сигнала

Пилообразный сигнал содержит основную гармонику плюс бесконечное множество четных гармоник. Например, пилообразный сигнал частотой 1 кГц состоит из

- основной гармоники 1 кГц;
- 2-й гармоники $2 \cdot 1 = 2$ кГц;
- 4-й гармоники $4 \cdot 1 = 4$ кГц;
- 6-й гармоники $6 \cdot 1 = 6$ кГц и т. д.

4

Емкость и индуктивность в электрических цепях

Конденсатор

Конденсатор состоит из двух пластин (или обкладок), находящихся одна перед другой и сделанных из проводящего материала. Между пластинами находится изолирующий материал, называемый диэлектриком (рис. 4.1). Простейшими диэлектриками являются воздух, бумага, слюда и т. д.

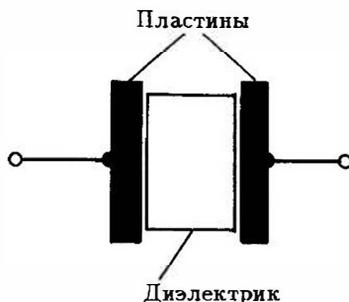


Рис. 4.1. Конденсатор.

Зарядка конденсатора

Основным свойством конденсатора является его способность запасать электрическую энергию в виде электрического заряда.

На рис. 4.2(а) изображена схема, в которой конденсатор соединяется через ключ с источником питания. Когда ключ замкнут (рис. 4.2(б)), положительный полюс источника «откачивает» электроны с обкладки А, и она приобретает положительный заряд. Отрицательный полюс источника питания тем временем «поставляет» электроны на обкладку В, в результате чего она приобретает отрицательный заряд, по абсолютной величине равный положительному заряду обкладки А. Такой поток электронов называется током заряда. Он продолжает течь до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не сравняется с ЭДС источника питания. В этом случае говорят, что конденсатор полностью заряжен. Электрический заряд обозначается буквой Q , а его величина измеряется в кулонах (Кл).

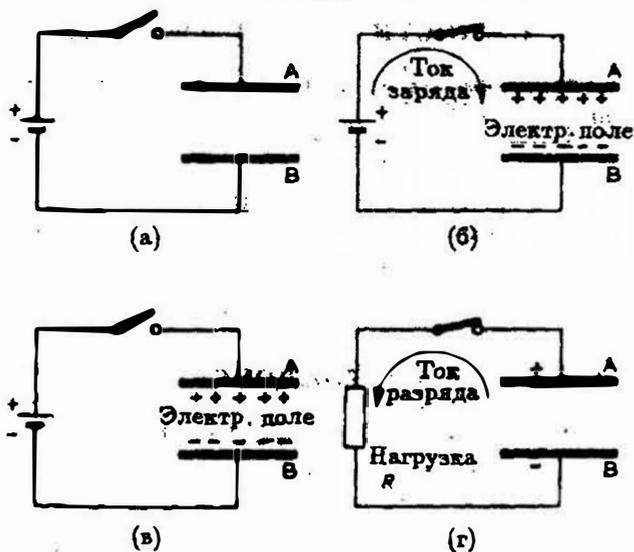


Рис. 4.2. Заряд и разряд конденсатора.

Когда конденсатор заряжен, между его обкладками возникает разность потенциалов, а следовательно, и электрическое поле.

Если в момент, когда конденсатор уже зарядился, разомкнуть ключ (рис. 4.2(в)), конденсатор будет хранить заряд. В этом случае внутри диэлектрика между обкладками возникает электрическое поле. При разрядке конденсатора через сопротивление нагрузки (рис. 4.2(г)) электрическое поле исчезает.

Емкость конденсатора

Способность конденсатора накапливать электрический заряд называется емкостью, а величина этой емкости обозначается буквой C и измеряется в фарадах (Φ). Фарада — очень большая единица емкости, и поэтому она практически не используется. Чаще используются дробные единицы:

$$1 \text{ микрофарада (мк}\Phi) = \frac{1}{1000000} \Phi = 10^{-6} \Phi,$$

$$1 \text{ пикофарада (п}\Phi) = \frac{1}{1000000} \text{ мк}\Phi = 10^{-6} \text{ мк}\Phi = 10^{-12} \Phi.$$

Емкость конденсатора возрастает с увеличением площади обкладок и убывает с увеличением расстояния между ними.

Например, при возрастании площади обкладок вдвое емкость также увеличивается в два раза. Если же увеличить вдвое расстояние между обкладками, емкость станет вдвое меньше.

Связь заряда, емкости и напряжения

Если конденсатор заряжен до разности потенциалов V , его заряд определяется формулой

$$Q = C \cdot V,$$

где C выражается в фарадах, V — в вольтах, а Q — в кулонах.

Преобразовав эту формулу, получим:

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{и} \quad V = \frac{Q}{C}.$$

Энергия заряженного конденсатора

Энергия W , запасенная конденсатором, определяется формулой

$$W = \frac{1}{2} CV^2,$$

где W выражается в джоулях, C — в фарадах, а V — в вольтах.

Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

Если два конденсатора, C_1 и C_2 , соединены параллельно (рис. 4.3(а)), результирующая емкость C_T такого соединения равна сумме емкостей этих конденсаторов:

$$C_T = C_1 + C_2.$$

Если конденсаторы соединены последовательно (рис. 4.3(б)), результирующая емкость C_T оказывается меньше емкости любого из конденсаторов и выражается формулой

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Например, если $C_1 = C_2$, то результирующая емкость C_T последовательного соединения равна половине емкости любого из конденсаторов:

$$C_T = \frac{1}{2} C_1 = \frac{1}{2} C_2.$$

Напряжение на последовательно соединенных конденсаторах

На схеме, показанной на рис. 4.4, конденсаторы C_1 и C_2 соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения V_T . Полное напряжение V_T будет поделено между C_1 и C_2 таким образом, что на конденсаторе меньшей емкости установится большее напряжение.

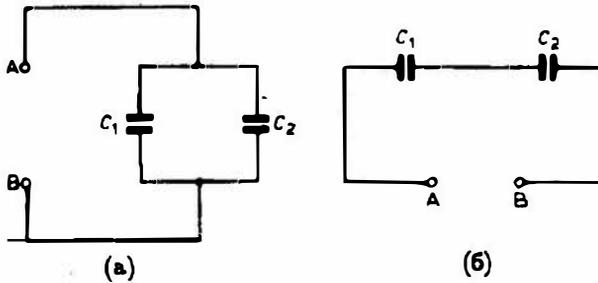


Рис. 4.3. Параллельное (а) и последовательное (б) соединения конденсаторов.

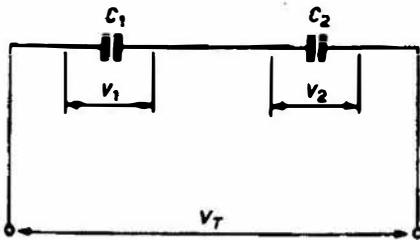


Рис. 4.4. Напряжение на конденсаторах при их последовательном соединении.

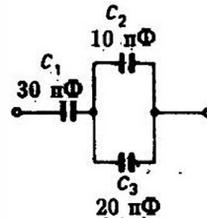


Рис. 4.5.

и наоборот. Сумма V_1 (напряжения на C_1) и V_2 (напряжения на C_2) всегда равна полному напряжению V_T .

В общем случае, когда несколько конденсаторов, соединенных последовательно, подключено к источнику постоянного тока, напряжение на каждом из конденсаторов обратно пропорционально его емкости. При последовательном соединении двух конденсаторов напряжения на C_1 и C_2 соответственно равны

$$V_1 = \frac{V_T}{C_1 + C_2} \cdot C_2; \quad V_2 = \frac{V_T}{C_1 + C_2} \cdot C_1.$$

Пример 1

Определим результирующую емкость цепи, изображенной на рис. 4.5. Результирующая емкость параллельного соединения равна

$$C_2 + C_3 = 10 + 20 = 30 \text{ пФ}.$$

Поскольку емкость C_1 также равна 30 пФ, то результирующая емкость всей цепи равна $\frac{1}{2} \cdot 30 = 15 \text{ пФ}$.

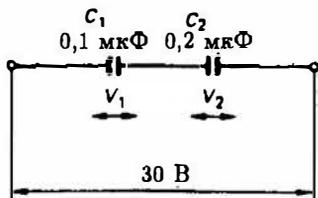


Рис. 4.6.

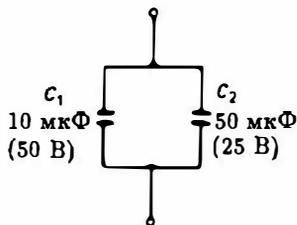


Рис. 4.7.

Пример 2

На рис. 4.6 напряжение на конденсаторе C_1 равно

$$\frac{V_T}{C_1 + C_2} \cdot C_2 = \frac{30}{0,1 + 0,2} \cdot 0,2 = 20 \text{ В},$$

откуда напряжение на C_2 равно $30 - 20 = 10 \text{ В}$.

Рабочее напряжение

Любой конденсатор характеризуется некоторым максимальным напряжением, при превышении которого наступает пробой диэлектрика. Это напряжение называется рабочим, или номинальным, напряжением конденсатора, и подаваемое на конденсатор напряжение ни в коем случае не должно его превышать. При использовании конденсатора в цепях переменного тока амплитудное значение напряжения в цепи также не должно превышать рабочего напряжения конденсатора. Рабочим напряжением для батареи конденсаторов, соединенных параллельно, является наименьшее из рабочих напряжений конденсаторов, входящих в схему. Например, рабочее напряжение для цепи, изображенной на рис. 4.7, равно 25 В.

Для конденсаторов, соединенных последовательно, рабочее напряжение подбирать труднее. Рассмотрим схему на рис. 4.8. Конденсатор C_1 (1 мкФ, рабочее напряжение $V_{\text{раб}} = 25 \text{ В}$) соединен последовательно с конденсатором C_2 (10 мкФ, $V_{\text{раб}} = 10 \text{ В}$). Поскольку на конденсаторе C_1 , обладающем меньшей емкостью, установится большее напряжение, чем на C_2 , то при расчетах следует прежде всего иметь в виду рабочее напряжение конденсатора C_1 , равное 25 В. Таким образом, $V_1 = 25 \text{ В}$. Из соотношения $V_2/V_1 = C_1/C_2$ следует, что

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{C_1}{C_2} = 25 \text{ В} \cdot \frac{1 \text{ мкФ}}{10 \text{ мкФ}} = 2,5 \text{ В}.$$

Поскольку рабочее напряжение конденсатора C_2 выше, чем V_2 , то рабочее напряжение данной батареи конденсаторов равно $25 + 2,5 = 27,5 \text{ В}$.

Следует заметить, что если бы рабочее напряжение конденсатора C_2 было равно, например, 2 В, как показано на рис. 4.9, то он зарядился бы

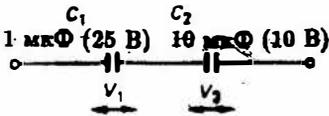


Рис. 4.8.

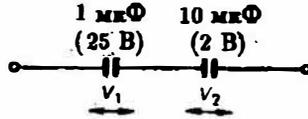


Рис. 4.9.

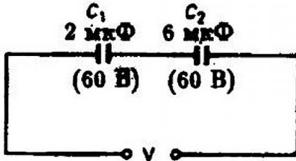


Рис. 4.10.

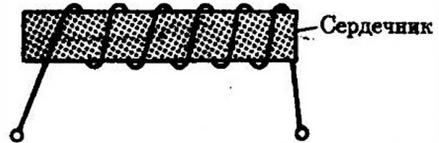


Рис. 4.11. Катушка индуктивности.

до уровня рабочего напряжения прежде, чем напряжение на конденсаторе C_1 достигло бы 25 В. Вот расчет для этого случая:

$$V_2 = 2 \text{ В, тогда } V_1 = V_2 \cdot \frac{C_2}{C_1} = 2 \cdot \frac{10}{1} = 20 \text{ В.}$$

Следовательно, рабочее напряжение такой батареи будет составлять $20 + 2 = 22 \text{ В}$.

Пример 3

Конденсаторы C_1 и C_2 , изображенные на рис. 4.10, имеют каждый рабочее напряжение 60 В. Какое максимальное напряжение может быть приложено к этой схеме?

Решение

Поскольку на конденсаторе C_1 установится более высокое напряжение, чем на конденсаторе C_2 , то напряжение на нем раньше достигнет уровня рабочего напряжения. При $V_1 = 60 \text{ В}$

$$V_2 = \frac{C_1}{C_2} \cdot V_1 = \frac{2}{6} \cdot 60 = 20 \text{ В.}$$

Максимальное напряжение, которое может быть подано на данную схему, составляет $60 + 20 = 80 \text{ В}$.

Катушка индуктивности

Катушка индуктивности, как показано на рис. 4.11, представляет собой просто моток провода. Условное обозначение катушки индуктивности показано на рис. 4.12. В отличие от конденсатора, который препятствует изменению приложенного к нему напряжения, катушка индуктивности препятствует изменению протекающего через нее тока. Иными словами,



Рис. 4.12. Условное обозначение катушки индуктивности.

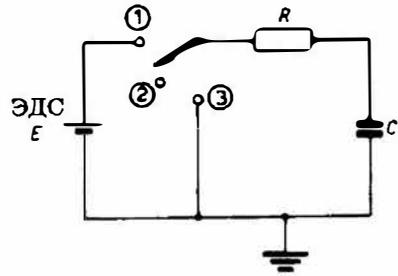


Рис. 4.13.

если ток, подаваемый в схему, которая содержит катушку, резко увеличить, то ток в схеме будет нарастать плавно до достижения своего максимального значения.

Способность катушки индуктивности препятствовать изменению силы тока, протекающего через нее, носит название индуктивности этой катушки. Индуктивность обозначается буквой L , единицей ее измерения является генри (Гн). Дробные единицы:

$$1 \text{ миллигенри (мГн)} = \frac{1}{1000} \text{ Гн} = 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$1 \text{ микрогенри (мкГн)} = \frac{1}{1000} \text{ мГн} = 10^{-3} \text{ мГн}$$

$$= \frac{1}{1\,000\,000} \text{ Гн} = 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Постоянная времени RC -цепи

На рис. 4.13 последовательная цепочка из конденсатора и резистора соединяется через ключ с источником питания. Когда ключ находится в положении 1, конденсатор постепенно заряжается через сопротивление, пока напряжение на нем не достигнет уровня E , т. е. ЭДС или напряжения источника питания.

Процесс заряда конденсатора показан на рис. 4.14(а) экспоненциальной кривой. Время, за которое напряжение на конденсаторе достигает значения 0,63 от максимума, т. е. в данном случае $0,63E$, называется постоянной времени контура или цепи.

Вернемся к рис. 4.13. Если ключ установить в положение 2, конденсатор будет сохранять запасенную энергию. При переведении ключа в положение 3 конденсатор начинает разряжаться на землю через резистор R , и напряжение на нем постепенно падает до нуля. Процесс разряда конденсатора показан на рис. 4.14(б). В этом случае постоянной времени цепи называется время, за которое напряжение на конденсаторе уменьшается на 0,63 от своего максимального значения.

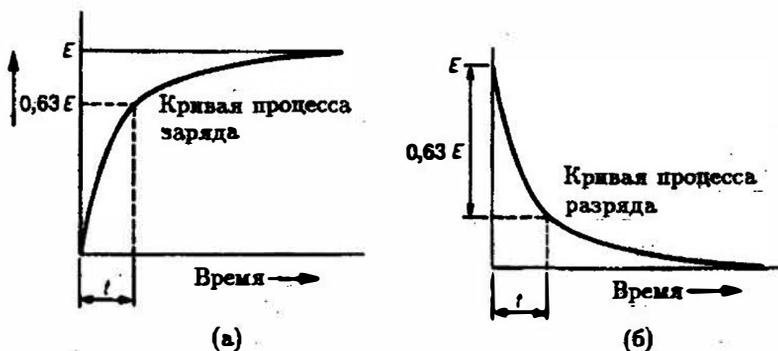


Рис. 4.14. Кривые заряда (а) и разряда (б) конденсатора, где t — постоянная времени.

Как для случая заряда, так и для случая разряда конденсатора через резистор R постоянная времени цепи выражается формулой

$$t = C \cdot R,$$

где t — постоянная времени в секундах, C — емкость в фарадах, R — сопротивление, выраженное в омах.

Например, для случая $C = 10$ мкФ и $R = 10$ кОм постоянная времени цепи равна

$$\begin{aligned} t &= CR = 10 \text{ мкФ} \cdot 10 \text{ кОм} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3 \\ &= 10^2 \cdot 10^{-3} = 10^{-1} = 0,1 \text{ с.} \end{aligned}$$

На рис. 4.15 изображены графики процессов заряда для цепей с малой и с большой постоянной времени.

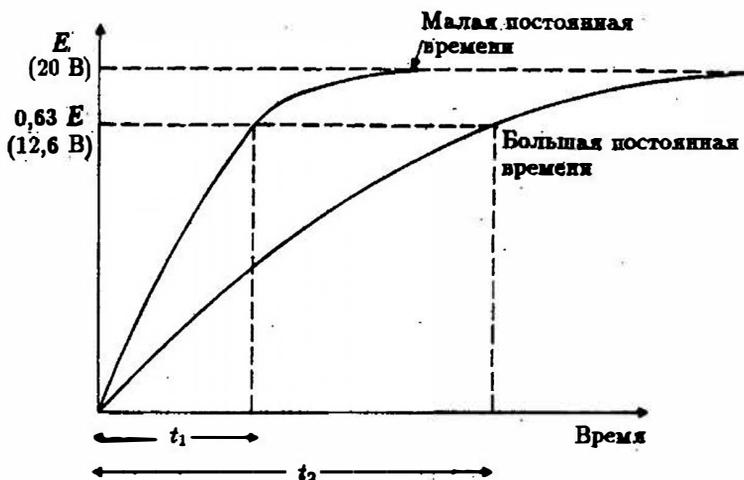


Рис. 4.15. Процессы заряда для цепей с малой и с большой постоянной времени.

Постоянная времени RL -цепи

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 4.16. Катушка индуктивности L соединена последовательно с резистором R , имеющим сопротивление 1 кОм . В момент замыкания ключа S ток в цепи равен нулю, хотя под действием ЭДС источника он, казалось бы, должен резко увеличиться. Однако катушка индуктивности, как известно, препятствует всякому изменению силы тока, протекающего через нее, поэтому ток в цепи будет возрастать по экспоненциальному закону, как показано на рис. 4.17. Ток будет возрастать до тех пор, пока не достигнет своего максимального значения. После этого увеличение тока прекратится, а падение напряжения на резисторе R станет равным приложенному напряжению E . Установившееся значение тока равно

$$E/R = 20 \text{ В}/1 \text{ кОм} = 20 \text{ мА}.$$

Скорость изменения тока в цепи зависит от конкретных значений R и L . Время, необходимое для того, чтобы сила тока достигла значения, равного $0,63$ от его максимальной величины, носит название постоянной времени цепи. Постоянная времени вычисляется по формуле L/R , где L выражается в генри, а R — в омах. В этом случае постоянная времени получается в секундах. Используя значения L и R , указанные на рисунке, получаем

$$\begin{aligned} \text{Постоянная времени} &= \frac{L}{R} = \frac{100 \text{ мГн}}{1 \text{ кОм}} = \frac{0,1 \text{ Гн}}{1000 \text{ Ом}} \\ &\approx 10^{-4} \text{ с} = 0,1 \text{ мс}. \end{aligned}$$

Следует заметить, что, чем больше R , тем меньше L/R и тем быстрее изменяется ток в цепи.

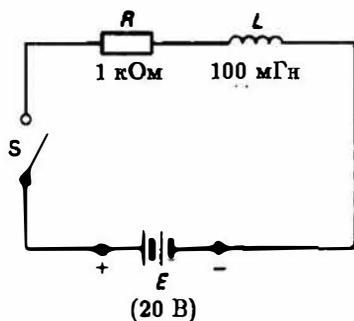


Рис. 4.16.

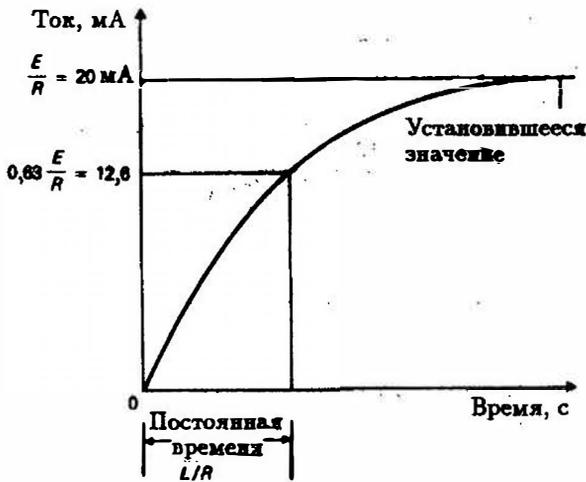


Рис. 4.17. Экспоненциальное увеличение тока, протекающего через катушку индуктивности.

Сопротивление по постоянному току

Катушка индуктивности, включенная в цепь, не препятствует протеканию постоянного тока, если, конечно, не принимать во внимание очень малое сопротивление провода, из которого она сделана. Следовательно, катушка индуктивности имеет нулевое или очень малое сопротивление и может рассматриваться в цепи постоянного тока как цепь короткого замыкания. Конденсатор же в связи с наличием в нем изолирующего диэлектрика имеет бесконечное или очень большое сопротивление и может рассматриваться в цепи постоянного тока как разрыв.

Векторное представление

Сигнал синусоидальной формы может быть представлен в виде вектора OA , вращающегося против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 2\pi f$, где f — частота сигнала (рис. 4.18). По мере того как поворачивается вектор, ордината его конца характеризует показанный на рисунке синусоидальный сигнал. Один полный оборот вектора (360° , или 2π) соответствует одному полному периоду. Половина оборота (180° , или π) соответствует половине периода, и так далее. Таким образом, ось времени, как показано на рисунке, может использоваться для нанесения значений угла, на который повернулся вектор. Максимум сигнала достигается при 90° ($1/4$ периода), а минимум — при 270° ($3/4$ периода).

Теперь рассмотрим два синусоидальных сигнала, представленных на рис. 4.19(а) векторами OA и OB соответственно. Если оба сигнала имеют одинаковые частоты, то векторы OA и OB будут вращаться с одинаковой угловой скоростью $\omega = 2\pi f$. Это означает, что угол между этими векто-

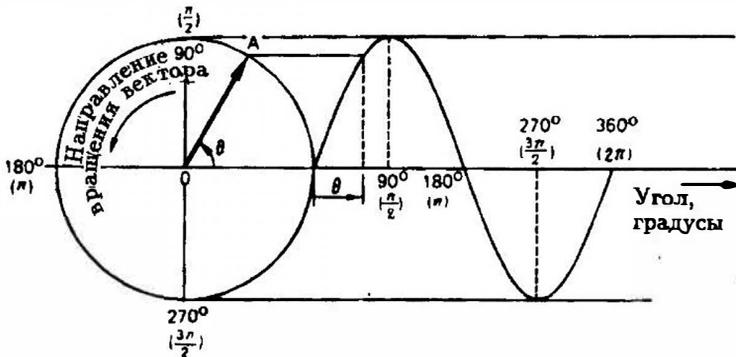


Рис. 4.18. Векторное представление синусоидального сигнала.

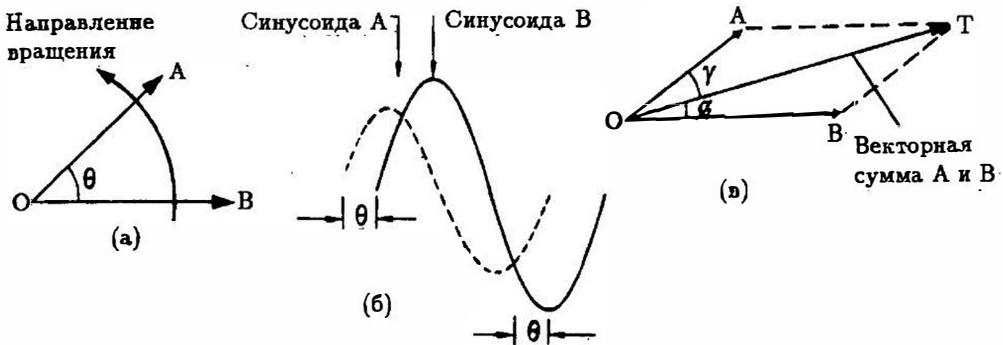


Рис. 4.19. Разность фаз. Вектор OA опережает вектор OB (или вектор OB отстает от вектора OA) на угол θ .

рами изменяться не будет. Говорят, что вектор OA опережает вектор OB на угол θ , а вектор OB отстает от вектора OA на угол θ . На рис. 4.19(б) эти сигналы развернуты во времени.

Если оба этих синусоидальных сигнала сложить, то в результате получим другой синусоидальный сигнал, имеющий ту же частоту f , но другую амплитуду. Результирующий сигнал может быть представлен вектором OT , который, как показано на рис. 4.19(в), является векторной суммой векторов OA и OB . Вектор OT опережает вектор OB на угол α и отстает от вектора OA на угол γ . Далее вы увидите, что векторное представление является весьма удобным приемом при анализе и расчете цепей переменного тока.

Разность фаз

Когда к резистору R приложено напряжение V , через него протекает ток I . Напряжение и ток являются определенными электрическими величинами со своими единицами измерения и законами изменения.

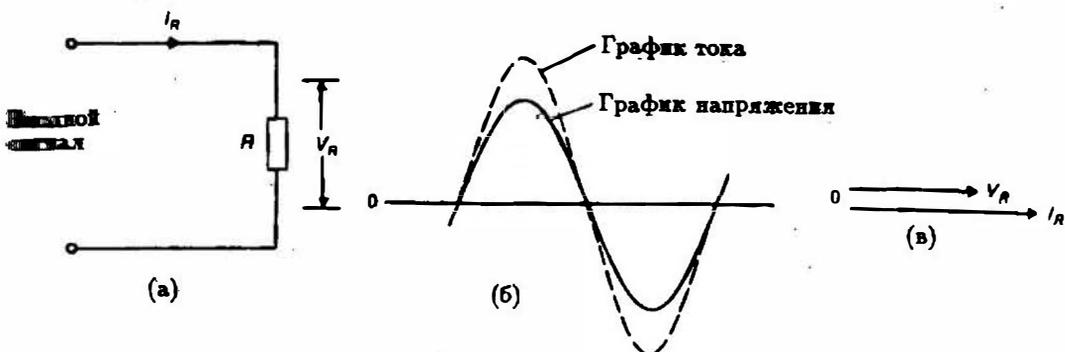


Рис. 4.20.

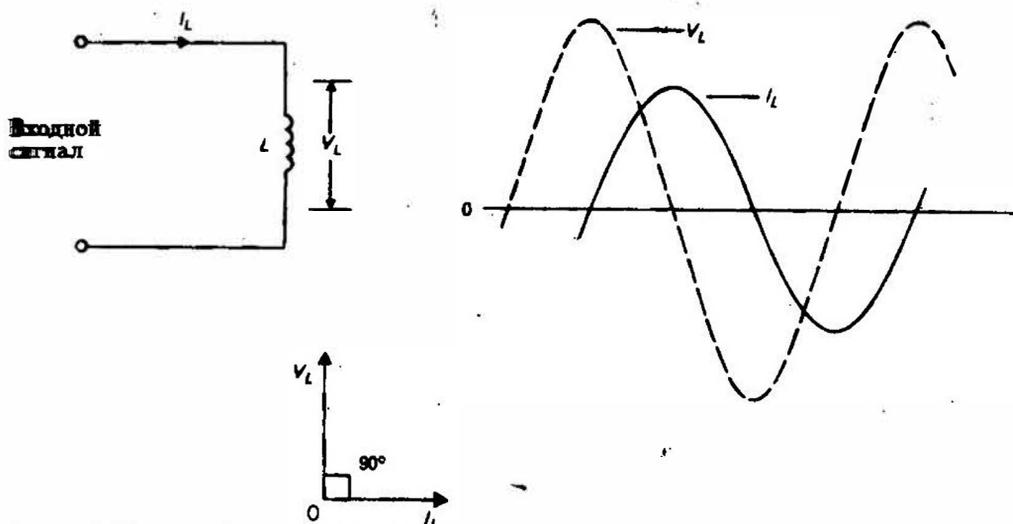


Рис. 4.21.

В случае цепей постоянного тока (см. гл. 1) вопрос о форме сигналов вообще не встает, а вот для цепей переменного тока соотношения между изменениями тока и напряжения — весьма важный момент.

Когда переменное напряжение приложено к резистору R , то ток, протекающий через R , находится в одной фазе с напряжением, т. е. разность фаз равна нулю (рис. 4.20 (б, в)).

Когда переменное напряжение приложено к катушке индуктивности (рис. 4.21), между напряжением и током возникает разность фаз, равная 90° , причем напряжение опережает по фазе ток.

Когда переменное напряжение приложено к конденсатору, между напряжением и током также возникает разность фаз, равная 90° , но на этот раз, как показано на рис. 4.22, напряжение отстает по фазе от тока.

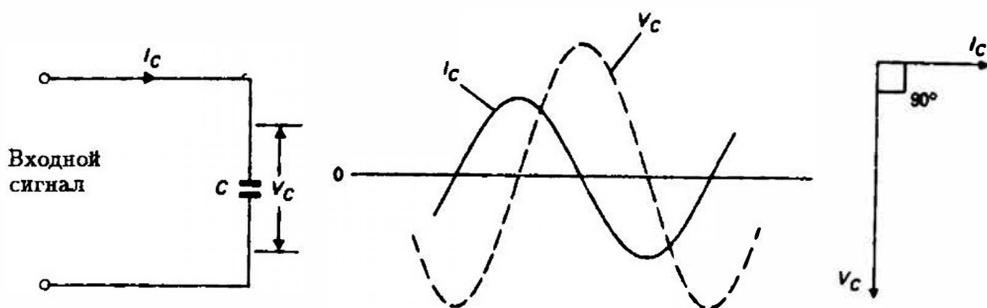
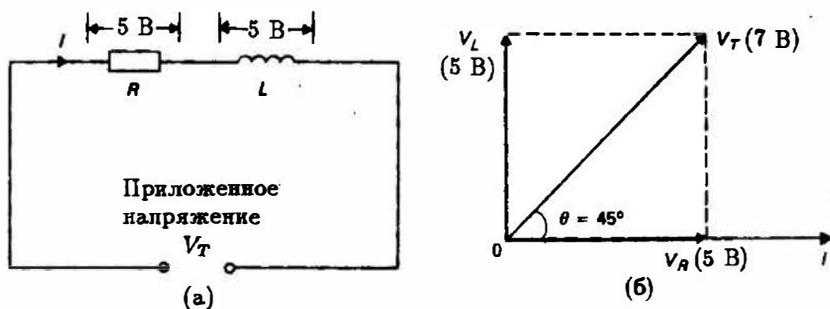


Рис. 4.22.

Рис. 4.23. (а) RL -цепь, рассмотренная в примере 1. (б) Векторная диаграмма.

Пример 1

Нарисовать векторную диаграмму для RL -цепи, изображенной на рис. 4.23(а), и найти напряжение V_T , приложенное к цепи.

Решение

Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 4.23(б). Сначала построим вектор тока I . Напряжение V_R находится в фазе с током I , а напряжение V_L опережает ток I (а следовательно, и V_R) на 90° . Суммарное напряжение V_T , приложенное к цепи, равно векторной сумме V_R и V_L . Если построить векторную диаграмму с соблюдением масштаба, то можно найти, что $V_T = 7$ В. Заметим, что результирующее напряжение V_T больше, чем каждая из составляющих (V_R и V_L), но меньше их арифметической суммы. Кроме того, вектор V_T опережает вектор тока на угол $\theta = 45^\circ$.

Пример 2

Для RC -цепи, изображенной на рис. 4.24(а), начертить векторную диаграмму и найти приложенное напряжение.

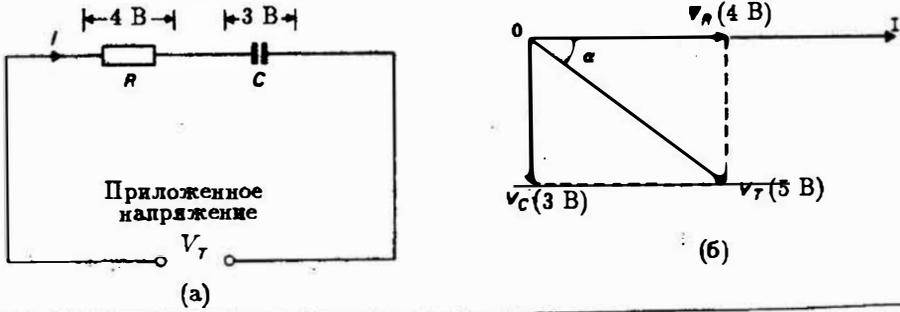


Рис. 4.24.

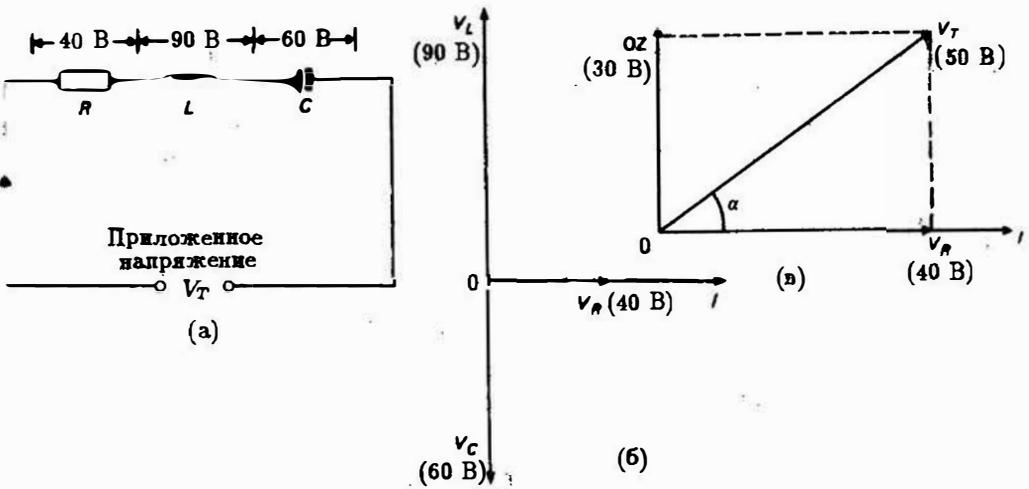


Рис. 4.25. (а) RLC -цепь, рассмотренная в примере 3. (б) Векторная диаграмма. в) Результирующий вектор.

Решение

На векторной диаграмме, показанной на рис. 4.24(б), видно, что V_C отстает от тока (и от V_R) на 90° . V_T является векторной суммой V_R и V_C . Также видно, что V_T больше, чем каждая из составляющих напряжения, т. е. больше, чем 4 В, но меньше, чем их арифметическая сумма ($3 + 4 = 7$ В). Если векторную диаграмму построить с соблюдением масштаба, то можно найти, что $V_T = 5$ В и отстает от тока на угол $\alpha = 36^\circ$.

Пример 3

Для RLC -цепи, показанной на рис. 4.25(а), начертить полную векторную диаграмму и найти приложенное напряжение.

Решение

Векторная диаграмма построена на рис. 4.25(б). V_R находится в фазе с током I , опережает V_C на 90° и отстает от V_L на 90° . Поскольку V_L и V_C лежат на одной вертикальной прямой, то их сумма, как показано на рис. 4.25(в), может быть представлена вектором

$$OZ = V_L - V_C = 90 - 60 = 30 \text{ В.}$$

Результирующее напряжение V_T , таким образом, равно векторной сумме V_R и OZ . $V_T = 50 \text{ В}$ и, как видно из рисунка, опережает вектор тока на угол $\alpha = 36^\circ$.

Реактивное сопротивление

Итак, катушки индуктивности и конденсаторы препятствуют протеканию переменного тока. Такое сопротивление по переменному току носит название реактивного сопротивления X и измеряется в омах. Реактивное сопротивление зависит как от величины индуктивности и емкости, так и от частоты сигнала.

Катушка индуктивности имеет индуктивное реактивное сопротивление X_L , равное

$$X_L = 2\pi fL,$$

где f — частота в герцах, а L — индуктивность в генри.

Так как $\omega = 2\pi f$, то можно записать $X_L = \omega L$. Например, реактивное сопротивление катушки с индуктивностью 10 мГн , на которую подается сигнал частотой 1 кГц , равно

$$X_L = 2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 2\pi \cdot 10 = 62,8 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление катушки индуктивности возрастает с увеличением частоты сигнала (рис. 4.26).

Конденсатор имеет емкостное сопротивление X_C , равное

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C},$$

где C — емкость в фарадах. Например, реактивное сопротивление конденсатора емкостью 1 мкФ , на который подается сигнал частотой 10 кГц , равно

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-2}} \\ &= \frac{10^2}{2\pi} = 15,9 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

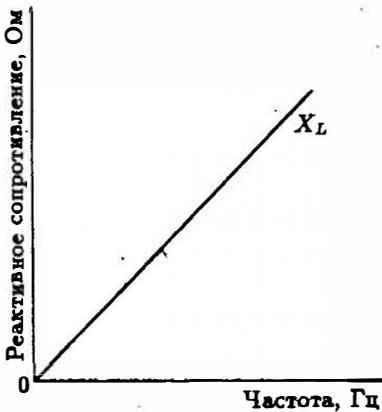


Рис. 4.26. Зависимость индуктивного сопротивления от частоты.

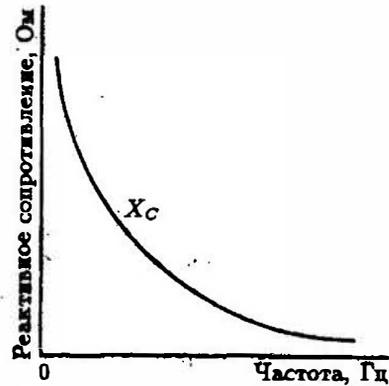


Рис. 4.27.

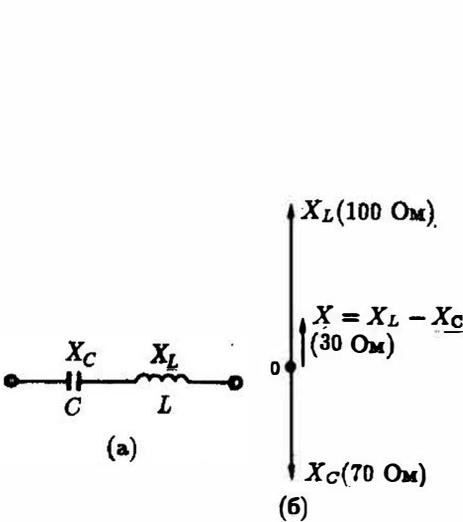


Рис. 4.28. Векторная сумма емкостного (X_C) и индуктивного (X_L) сопротивлений.

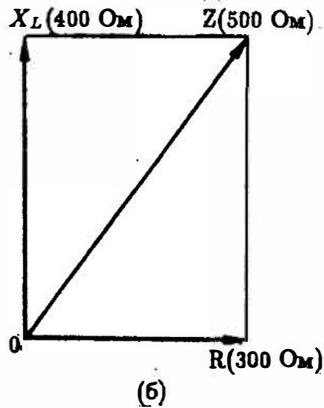
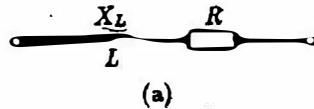


Рис. 4.29. (а) Катушка индуктивности, соединенная последовательно с резистором R . (б) Векторное представление R , X_L и их векторной суммы Z .

Реактивное сопротивление конденсатора уменьшается с увеличением частоты сигнала (рис. 4.27).

Результирующее сопротивление цепи, включающей в себя емкостное сопротивление X_C и индуктивное сопротивление X_L , равно векторной сумме X_C и X_L . Векторы X_C и X_L , как видно из рис. 4.28(б), находят-

ся в противофазе, т. е. разность фаз между ними равна 180° . Поэтому результирующее сопротивление просто равно разности между X_C и X_L . Например, пусть $X_L = 100$ Ом, а $X_C = 70$ Ом. Тогда результирующее реактивное сопротивление $X = 100 - 70 = 30$ Ом и является индуктивным, так как X_L больше, чем X_C .

Импеданс

Результирующее сопротивление цепи, содержащей как активное, так и реактивное (индуктивное либо емкостное) сопротивление, носит название импеданса или полного сопротивления цепи.

Импеданс Z является векторной суммой реактивного сопротивления X и активного сопротивления R .

Рассмотрим, например, схему, изображенную на рис. 4.29. Она включает в себя индуктивное сопротивление X_L , соединенное последовательно с резистором R . Как видно из рис. 4.29(б), вектор X_L опережает вектор R на 90° . Импеданс равен

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}.$$

Если $X_L = 400$ Ом $= 4 \cdot 10^2$ Ом и $R = 300$ Ом $= 3 \cdot 10^2$ Ом, то

$$Z = \sqrt{16 \cdot 10^4 + 9 \cdot 10^4} = \sqrt{25 \cdot 10^4} = 5 \cdot 10^2 = 500 \text{ Ом}.$$

Усилители и генераторы

Усилители — это устройства, которые очень широко используются во всех типах электронных систем. Они реализуют функцию усиления, т. е. вырабатывают на своем выходе сигнал, величина которого превышает величину исходного входного сигнала.

Коэффициент усиления

Эта характеристика усилителя показывает, во сколько раз величина сигнала на выходе усилителя превышает величину сигнала на его входе.

$$\text{Коэффициент усиления} = \frac{\text{Выходной сигнал}}{\text{Входной сигнал}}$$

Коэффициент усиления — безразмерная величина, это просто отношение двух величин, измеряемых в одних и тех же единицах. Различают три типа коэффициентов усиления (КУ):

по напряжению $G_v = \frac{\text{Выходное напряжение}}{\text{Входное напряжение}} = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{вх}}}$,

по току $G_i = \frac{\text{Выходной ток}}{\text{Входной ток}} = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}$,

по мощности $G_p = \frac{\text{Выходная мощность}}{\text{Входная мощность}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$.

Коэффициент усиления двух и более каскадов

Двухкаскадный усилитель показан на рис. 5.1.

Выходное напряжение V_1 первого каскада подается на вход второго каскада. Таким образом, напряжение V_1 становится входным сигналом для второго каскада. На вход двухкаскадного усилителя подается напряжение $V_{\text{вх}}$; на выходе получаем результирующее напряжение $V_{\text{вых}}$. Общий

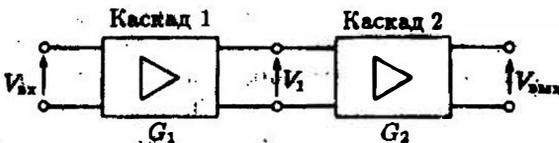


Рис. 5.1. Коэффициент усиления двух каскадов = $G_1 \cdot G_2$.

коэффициент усиления G рассматриваемого усилителя определяется как

$$G = \frac{\text{Результирующее выходное напряжение}}{\text{Входное напряжение}} = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{вх}}}$$

Предположим, что коэффициент усиления первого каскада $G_1 = 20$, а коэффициент усиления второго каскада $G_2 = 50$. Тогда для входного напряжения $V_{\text{вх}} = 1$ мВ получаем:

$$V_1 = G_1 \cdot V_{\text{вх}} = 20 \cdot 1 \text{ мВ} = 20 \text{ мВ},$$

$$V_{\text{вых}} = G_2 \cdot V_1 = 50 \cdot 20 \text{ мВ} = 1000 \text{ мВ} = 1 \text{ В}.$$

$$\text{Общий коэффициент усиления } G = \frac{V_{\text{вых}}}{V_{\text{вх}}} = \frac{1000 \text{ мВ}}{1 \text{ мВ}} = 1000.$$

Общий коэффициент усиления этого двухкаскадного усилителя проще рассчитать по формуле

$$G = G_1 \cdot G_2 = 20 \cdot 50 = 1000.$$

Аналогично коэффициент усиления трехкаскадного усилителя определяется выражением

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3$$

и по аналогии — для большего числа каскадов.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

АЧХ усилителя определяет характер изменения коэффициента усиления или выходного сигнала усилителя при изменении частоты сигнала.

АЧХ представляет собой график зависимости выходного напряжения (или коэффициента усиления), величина которого откладывается по оси ординат, от частоты, откладываемой по оси абсцисс (рис. 5.2). Для частоты используется логарифмический (нелинейный) масштаб. Это приводит к эффективному расширению низкочастотного и сжатию высокочастотного участков на оси частот.

Коэффициент усиления и выходной сигнал усилителя постоянны в диапазоне средних частот, но спадают при высоких и низких частотах. Область частот, заключенная между частотами f_1 и f_2 , называется полосой пропускания усилителя. Частоты f_1 и f_2 соответствуют точкам a_1 и a_2 , известным как точки по уровню 3 дБ (децибел). Децибел — нелинейная (логарифмическая) единица измерения коэффициента усиления (см. приложение 2). Точка a_1 называется нижней точкой по уровню 3 дБ, а точка a_2 — верхней точкой по уровню 3 дБ. В этих двух точках выходное напряжение усилителя составляет 70% от своего максимального значения. Точки по уровню 3 дБ называют также точками по уровню половинной мощности, поскольку выходная мощность усилителя на этих частотах уменьшается ровно в два раза.



Рис. 5.2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя.

Выходное напряжение (или коэффициент усиления) удобно откладывать по оси ординат в децибелах, принимая максимальный уровень за 0 дБ. Тогда точки по уровню 3 дБ будут находиться на уровне -3 дБ.

АЧХ усилителя звуковой частоты (УЗЧ)

Чтобы обеспечить усиление сигналов всех звуковых частот, УЗЧ должен иметь полосу пропускания, перекрывающую диапазон звуковых частот, т. е. от 20 Гц до 20 кГц. Внутри этого диапазона частот коэффициент усиления УЗЧ должен сохранять постоянное значение. Ниже 20 Гц и выше 20 кГц допустим спад усиления. Типичная АЧХ усилителя звуковой частоты показана на рис. 5.2.

Поскольку музыка и речь представляют собой сложную смесь гармонических сигналов с различными частотами звукового диапазона, то качество усилителя зависит от того, какую полосу этих частот и их гармоник данный усилитель может воспроизвести без искажений. Узкая полоса пропускания будет обязательно приводить к ограничению числа усиливаемых и воспроизводимых на выходе усилителя гармоник. Этим объясняется низкое качество звука у дешевых усилителей.

Существуют два основных типа искажений: амплитудные и частотные.

Амплитудные искажения

Для каждого усилителя существует некоторый максимальный уровень выходного сигнала, который не может быть превышен. Попытка превышения этого уровня приводит к амплитудным искажениям. Амплитудные искажения проявляются в сглаживании или обрезании только одного (положительного или отрицательного) или обоих пиков сигнала.

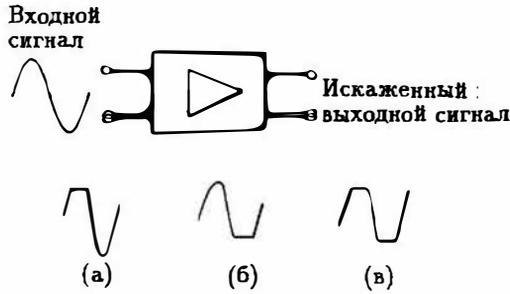


Рис. 5.3. Амплитудные искажения.

На рис. 5.3 представлены три варианта проявления амплитудных искажений синусоидального сигнала на выходе перегруженного усилителя.

Частотные искажения

Усилители должны воспроизводить на своем выходе входной сигнал без каких-либо изменений его формы, не считая увеличения амплитуды. Обычно входной сигнал имеет сложную форму и состоит из большого числа синусоидальных сигналов различных частот и их гармоник. Для верного воспроизведения все эти составляющие должны усиливаться в одинаковой степени, то есть коэффициент усиления должен быть одинаковым для всех частот. Другими словами, АЧХ усилителя должна быть достаточно плоской во всей полосе пропускания, в противном случае выходной сигнал будет подвержен частотным искажениям.

Например, усилитель с АЧХ, показанной на рис. 5.4, будет в гораздо большей степени усиливать высокие частоты по сравнению с низкими. В результате в выходном сигнале будут чрезмерно представлены высокоча-

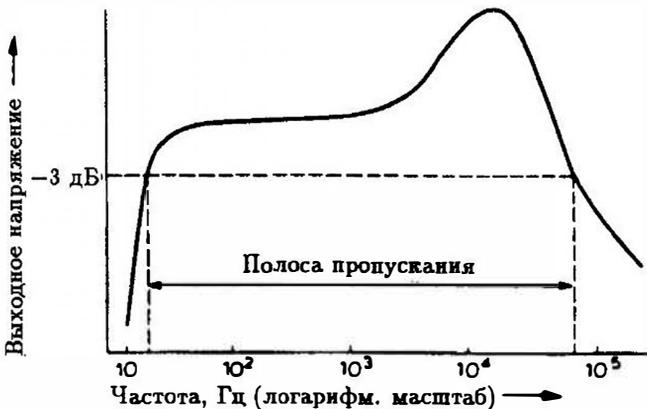


Рис. 5.4.

стотные составляющие. Можно сказать, что сигнал на выходе данного усилителя воспроизводится с частотными искажениями.

Усилители напряжения

Это наиболее распространенный тип усилителей. Эти усилители имеют большой коэффициент усиления по напряжению для обеспечения максимальной величины выходного напряжения. Они используются в тех случаях, когда требуется большой размах напряжения, например в выходных каскадах усилителей мощности.

Усилители мощности

Эти усилители обладают большими коэффициентами усиления по мощности и по току, обеспечивая тем самым максимальную мощность выходного сигнала. Усилитель мощности используется в электронной системе в качестве выходного каскада для передачи мощности в нагрузку. Для стандартных электронных систем требуются следующие типичные значения выходной мощности:

усилитель небольшого радиоприемника	200 мВ
усилитель категории Hi-Fi	10 Вт
система озвучения и звукоусиления	100 Вт и более.

Двухтактный усилитель

Для того чтобы получить от усилителя большую выходную мощность без амплитудных искажений сигнала, используется двухтактный усилитель (рис. 5.5).

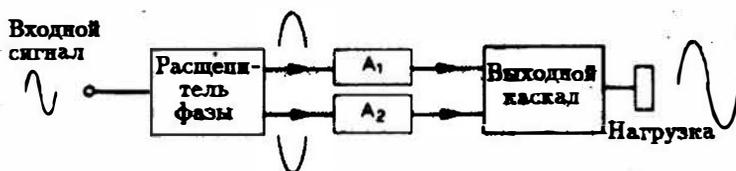


Рис. 5.5. Двухтактный усилитель.

В двухтактном усилителе входной сигнал сначала подается на расщепитель фазы, который расщепляет этот сигнал на две половины-составляющие: положительную и отрицательную. Затем каждая из этих составляющих усиливается отдельным усилителем: положительная составляющая — усилителем A_1 , отрицательная — усилителем A_2 . После усиления составляющие складываются друг с другом в смесителе или выходном каскаде и образуют полный сигнал, который подается к громкоговорителю.



Рис. 5.6. Нелинейные искажения.

Выходной сигнал двухтактного усилителя подвержен нелинейным искажениям, или искажениям типа «ступенька» (рис. 5.6). Эти искажения легко устраняются путем выбора надлежащего режима работы схемы усилителя.

Широкополосный усилитель

Широкополосный усилитель имеет очень широкую полосу пропускания, начинающуюся практически с нулевой частоты (постоянный ток) и продолжающуюся вплоть до частот порядка нескольких мегагерц. Столь широкая полоса пропускания достигается за счет уменьшения коэффициента усиления. По сравнению с УЗЧ широкополосный усилитель имеет намного более широкую полосу пропускания, но меньший коэффициент усиления.

Широкополосный усилитель используется в телевизионных приемниках и для усиления импульсных сигналов, когда приходится иметь дело с широкой полосой частот — до 5 МГц и более (рис. 5.7). Такие усилители называются также видеоусилителями. Другие возможные применения широкополосных усилителей — радарная техника и усилители вертикальной развертки в осциллографах.

Широкополосные усилители используются также для усиления сигналов сложной формы с большим числом гармоник. Чем большее число

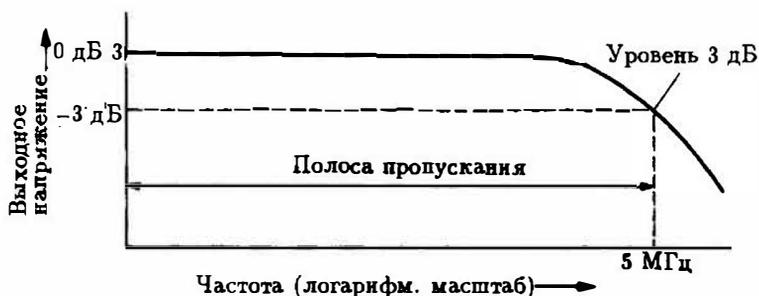


Рис. 5.7. АЧХ широкополосного видеоусилителя.

гармоник представлено в сигнале, тем шире должна быть полоса пропускания усилителя, в противном случае возникают искажения. Для периодического сигнала в виде меандра с бесконечным числом гармоник теоретически требуется бесконечная полоса пропускания. Однако на практике высшими гармониками — выше девятого или одиннадцатого порядка — можно пренебречь без существенного изменения формы сигнала, поскольку эти гармоники очень малы по амплитуде.

Усилители радиочастоты (УРЧ)

УРЧ используются в радиопередатчиках и радиоприемниках. Это избирательные усилители, настраиваемые на одну конкретную частоту; они характеризуются очень узкой полосой пропускания и очень высоким коэффициентом усиления.

Типичная АЧХ усилителя радиочастоты, показанная на рис. 5.8, имеет узкую полосу пропускания между точками по уровню 3 дБ. Здесь f_0 — частота настройки усилителя. При настройке на другую частоту f'_0 АЧХ сдвигается по оси частот вправо (штриховая линия).

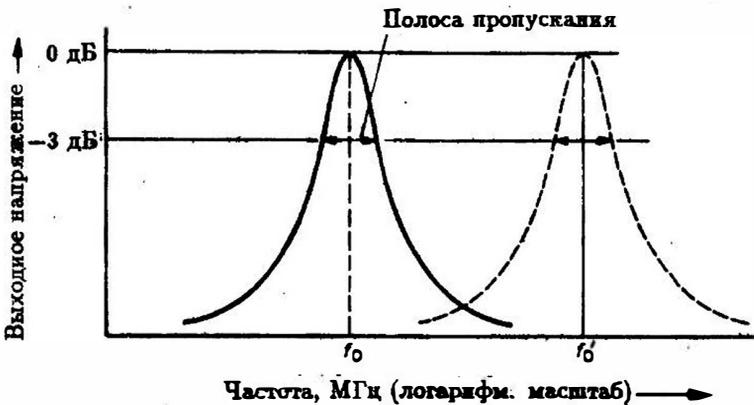


Рис. 5.8. АЧХ усилителя радиочастоты.

Обратная связь

Обратная связь есть процесс подачи части или всего выходного сигнала обратно на вход усилителя (рис. 5.9). Существуют два типа обратной связи — положительная и отрицательная.

Положительная обратная связь (ПОС)

Обратную связь называют положительной, когда выходной сигнал подается обратно на вход усилителя с той же полярностью, что и полярность

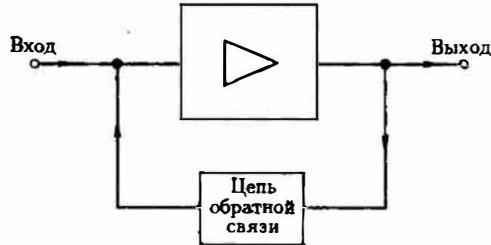


Рис. 5.9. Обратная связь.



Рис. 5.10. Влияние обратной связи на АЧХ усилителя.

исходного входного сигнала. Введение ПОС приводит к увеличению коэффициента усиления исходного (не охваченного обратной связью) усилителя и сужению его полосы пропускания. Устойчивость усилителя при этом ухудшается, что может быть причиной возникновения колебательных процессов.

Отрицательная обратная связь (ООС)

Обратную связь называют отрицательной, когда выходной сигнал подается обратно на вход усилителя с полярностью, противоположной полярности исходного входного сигнала. В отличие от ПОС этот тип обратной связи приводит к уменьшению коэффициента усиления, повышению устойчивости усилителя и расширению полосы пропускания. При введении отрицательной обратной связи АЧХ усилителя становится более равномерной и плоской, как показано на рис. 5.10.

Генераторы

Генераторы — это усилители со столь сильной ПОС, что сигнал на их выходе вырабатывается даже в отсутствие какого-либо «внешнего» входного сигнала (рис. 5.11). Уровень выходного сигнала определяется свойствами используемого усилителя, а также параметрами цепи обратной связи.

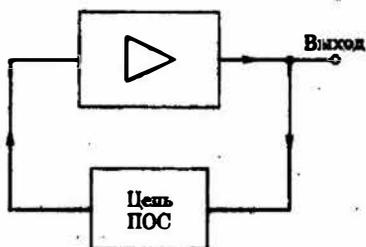


Рис. 5.11. Генератор.

Как объясняется в гл. 32, в генераторах синусоидальных колебаний используются резонансные (частотно-избирательные) цепи для выбора частоты колебаний. Частоту колебаний можно изменять путем изменения номиналов компонентов частотно-избирательной цепи.

В генераторах прямоугольных колебаний резонансные цепи отсутствуют. Вместо этого используются RC -цепи обратной связи, например, как в мультивибраторе. Форма прямоугольных колебаний, т. е. коэффициент заполнения и частота, определяется номиналами используемых R - и C -компонентов.

Одно из наиболее важных требований, предъявляемых к генератору, — постоянство частоты вырабатываемых им колебаний при его работе. Частота колебаний может изменяться по двум причинам. Во-первых, изменения температуры могут вызывать уход (дрейф) номиналов используемых компонентов, и эти изменения приводят к уходу (дрейфу) частоты. Уход частоты можно исключить, используя специальные схемы, компенсирующие эти изменения и обеспечивающие постоянство частоты при всех температурах, или помещая все цепи, определяющие частоту колебаний, в термостат.

Во-вторых, частота колебаний генератора может изменяться при использовании неправильных нагрузочных условий. Это так называемое **затягивание частоты**. Чтобы избежать этого, используется буферный каскад, изолирующий генератор от нагрузки. Нагрузкой может быть громкоговоритель или усилительный каскад (как показано на рис. 5.12). Буферный каскад обеспечивает надлежащие нагрузочные условия для генератора при любой конечной нагрузке.



Рис. 5.12. Применение буферного каскада.

Генератор сигналов низкой частоты

Генератор низкочастотных (НЧ) сигналов (рис. 5.13) вырабатывает сигнал и задает его частоту. НЧ-сигнал усиливается по напряжению для получения необходимого размаха напряжения, обеспечивающего «раскачку» выходного каскада. Выходной каскад представляет собой усилитель мощности, передающий мощность в нагрузку. НЧ-генератор, усилитель напряжения и выходной каскад усиления мощности получают необходимую электрическую энергию от источника питания постоянного тока.

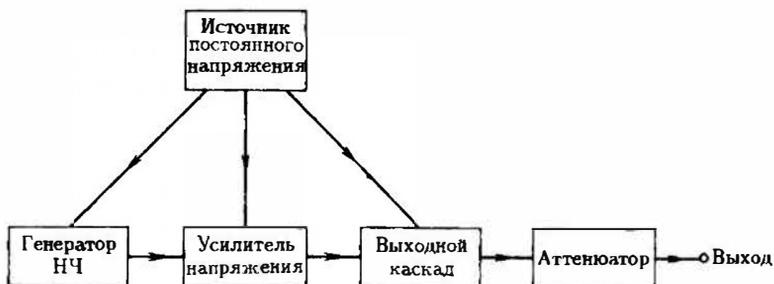


Рис. 5.13. Генератор низкочастотных сигналов.

Прежде чем попасть в нагрузку, электрический сигнал проходит через аттенюатор. Аттенюатор — это пассивный элемент (следовательно, не требующий питания), который контролирует уровень выходного сигнала. Он содержит:

- а) ступенчатый аттенюатор, обеспечивающий регулировку уровня сигнала с шагом 20 дБ (10-кратное изменение уровня за один шаг) и
- б) плавный аттенюатор, обеспечивающий плавную и точную регулировку уровня выходного сигнала.

6

Резонанс

Последовательный резонанс

Рассмотрим цепь (последовательный резонансный контур) на рис. 6.1, где резистор R включен последовательно с катушкой индуктивности L и конденсатором C . Резистор R может быть реальным резистором или может представлять активное сопротивление катушки индуктивности. Величина сопротивления этого резистора не зависит от частоты, т. е. сохраняет постоянное значение при всех частотах. Реактивные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора, напротив, являются частотно-зависимыми. При увеличении частоты, начиная от 0 Гц, реактивное сопротивление катушки индуктивности возрастает, а реактивное сопротивление конденсатора уменьшается. При достижении некоторой частоты f_0 реактивные сопротивления X_L и X_C обоих элементов сравниваются. Говорят, что схема находится в резонансе и f_0 — резонансная частота.

На резонансной частоте противофазные реактивные сопротивления X_L и X_C компенсируют друг друга, в результате чего импеданс, или полное сопротивление, цепи становится чисто резистивным $Z = R$. Это минимум полного сопротивления Z , поэтому на резонансной частоте электрический ток в цепи достигает своего максимального значения, что иллюстрирует АЧХ на рис. 6.2. Поскольку последовательный резонансный контур характеризуется максимальным значением тока в резонансе, его называют также схемой отбора тока.

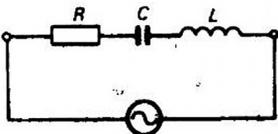


Рис. 6.1. Последовательный резонансный контур.

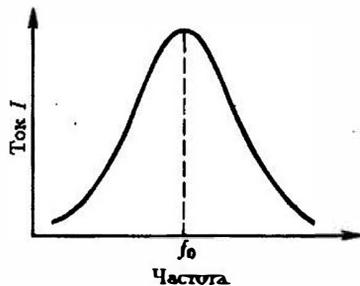


Рис. 6.2. АЧХ последовательного резонансного контура.

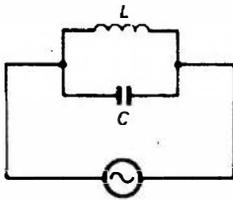


Рис. 6.3. Параллельный резонансный контур.

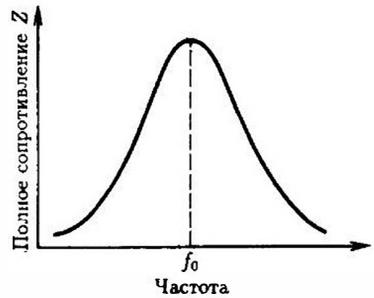


Рис. 6.4. АЧХ параллельного резонансного контура.

Параллельный резонанс

Резонанс может быть получен также при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора (рис. 6.3). При одном конкретном значении частоты, определяемом номиналами элементов L и C , реактивное сопротивление катушки индуктивности компенсирует реактивное сопротивление конденсатора, в результате чего достигается резонанс. Полное сопротивление цепи на резонансной частоте теперь максимально, поэтому напряжение также достигает своего максимального значения. Данная схема называется схемой **режекции**. АЧХ или частотная зависимость импеданса для этой схемы показана на рис. 6.4.

Как для последовательного, так и для параллельного резонанса резонансная частота определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Полагая $L = 10$ мГн и $C = 1$ мкФ, получаем

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi\sqrt{(10 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6})}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-8}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-4}} = \frac{10^4}{2\pi} = 1,59 \text{ кГц.} \end{aligned}$$

Заметим, что резонансная частота не зависит от сопротивления резистора в схеме¹⁾.

Полоса пропускания и избирательность

Резонансные цепи используются главным образом в качестве частотно-избирательных цепей из-за селективности их АЧХ. Обычно используются параллельные частотно-избирательные цепи, поскольку они харак-

¹⁾ Для более точного определения частоты необходимо учитывать и сопротивление резистора R . — Прим. ред.

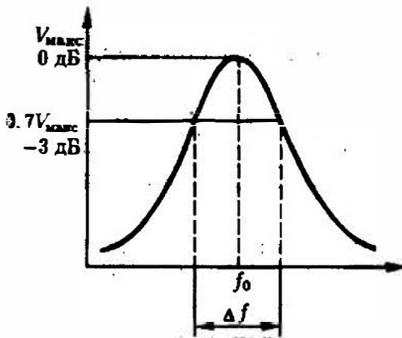


Рис. 6.5. АЧХ частотно-избирательной цепи (Δf — ширина полосы пропускания).

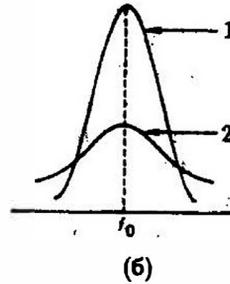
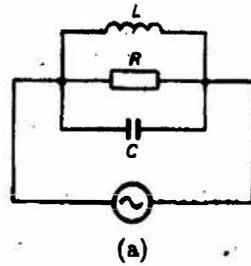


Рис. 6.6. Влияние шунтирования на АЧХ частотно-избирательной цепи. 1 — без шунтирующего резистора; 2 — с шунтирующим резистором.

теризуются высоким импедансом и, следовательно, большим выходным напряжением.

АЧХ частотно-избирательной цепи показана на рис. 6.5. Ширина полосы пропускания определяется между точками по уровню 3 дБ, как показано на рисунке. Избирательность (селективность) такой цепи — это мера ее способности подавлять соседние частоты в пользу выделения требуемой частоты настройки. Цепь с более высокой избирательностью имеет более узкую полосу пропускания по сравнению с менее избирательной цепью, имеющей более широкую полосу пропускания. Избирательность цепи задается параметром Q , который называется добротностью и определяется как

$$Q = \frac{\text{Резонансная частота}}{\text{Ширина полосы пропускания}} = \frac{f_0}{\Delta f}$$

Таким образом, чем выше избирательность схемы, тем выше ее добротность, и наоборот.

Демпфирование

В тех применениях, где требуется широкая полоса пропускания, например в ГВ-приемниках, нужны низкодобротные частотно-избирательные цепи.

Низкую добротность можно получить путем шунтирования параллельного контура резистором R , как показано на рис. 6.6(а). Резистор оказывает так называемый демпфирующий эффект на АЧХ частотно-избирательной цепи, уменьшая селективность последней (рис. 6.6(б)).

Затухающие колебания

Рассмотрим резонансный контур, настроенный на частоту 1 кГц. Поскольку этот контур подавляет все другие частоты, то единственным сигналом, который можно снять с его выводов, является синусоидальный сигнал с частотой 1 кГц. Такой выходной сигнал может быть получен путем подачи в контур энергии переменного тока, в результате чего возникают синусоидальные колебания. Эта энергия может подаваться в виде гармонического сигнала резонансной частоты или в виде сигнала сложной формы, имеющего гармонику на резонансной частоте.

На рис. 6.7 показан резонансный контур, настроенный на частоту 3,3 кГц, который возбуждается периодическим сигналом в виде меандра с частотой 1 кГц. В контуре возникают незатухающие колебания на частоте третьей гармоники возбуждающего сигнала (т. е. на частоте 3,3 кГц). На рис. 6.8 показан тот же самый контур, но возбуждаемый ступенькой напряжения при замыкании ключа S . Сигнал ступенчатой формы содер-

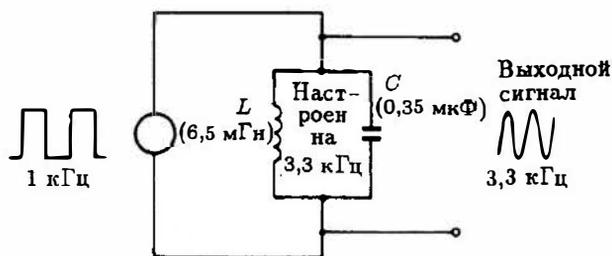


Рис. 6.7. Резонансный контур, генерирующий колебания на третьей гармонике возбуждающего сигнала.

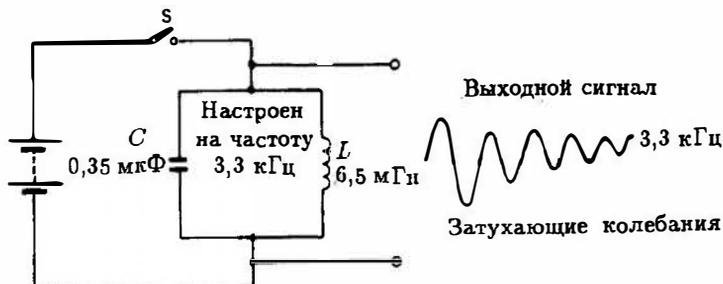


Рис. 6.8. Затухающие колебания в резонансном контуре, возбуждаемые сигналом ступенчатой формы.

жит бесконечное число гармоник, что обеспечивает возбуждение колебаний в контуре на его резонансной частоте 3,3 кГц. Однако эти колебания демпфируются, т. е. затухают, так как энергия, переданная в контур при ступенчатом изменении напряжения, постепенно теряется за счет малых потерь в катушке индуктивности и конденсаторе, а также из-за наличия сопротивления соединительных проводов и т. п. Через некоторое время колебания полностью прекращаются. Аналогичные затухающие колебания в резонансном контуре можно также получить путем размыкания ключа S.

Колебания, возбуждаемые в резонансном контуре, обязательно будут затухающими, если среднее по времени количество электрической энергии, передаваемой в этот контур, недостаточно для компенсации указанных выше потерь в контуре.

Трансформаторы

Электромагнетизм

Электрический ток, протекающий по проводнику, создает вокруг этого проводника магнитное поле (рис. 7.1). Направление возникающего магнитного поля определяется направлением тока.

Способ обозначения направления электрического тока в проводнике показан на рис. 7.2: точку на рис. 7.2(а) можно воспринимать как острие стрелки, указывающей направление тока к наблюдателю, а крестик — как хвост стрелки, указывающей направление тока от наблюдателя.

Магнитное поле, возникающее вокруг проводника с током, показано на рис. 7.3. Направление этого поля легко определяется с помощью правила правого винта (или правила буравчика): если острие буравчика совместить с направлением тока, то при его закручивании направление вращения рукоятки будет совпадать с направлением магнитного поля.



Рис. 7.1. Магнитное поле вокруг проводника с током.



Рис. 7.2. Обозначение направления тока (а) к наблюдателю и (б) от наблюдателя.

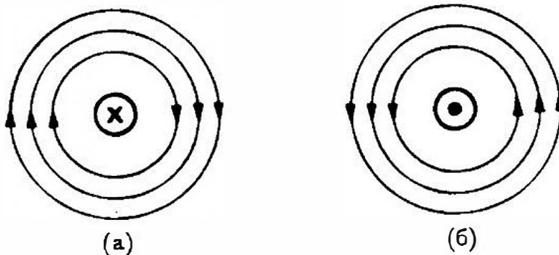


Рис. 7.3. Направление магнитного поля вокруг проводника с током.

Поле, создаваемое двумя параллельными проводниками

1. *Направления токов в проводниках совпадают.* На рис. 7.4(а) изображены два параллельных проводника, расположенные на некотором расстоянии друг от друга, причем магнитное поле каждого проводника изображено отдельно. В промежутке между проводниками создаваемые ими магнитные поля противоположны по направлению и компенсируют друг друга. Результирующее магнитное поле показано на рис. 7.4(б). Если изменить направление обоих токов на обратное, то изменится на обратное и направление результирующего магнитного поля (рис. 7.4(в)).

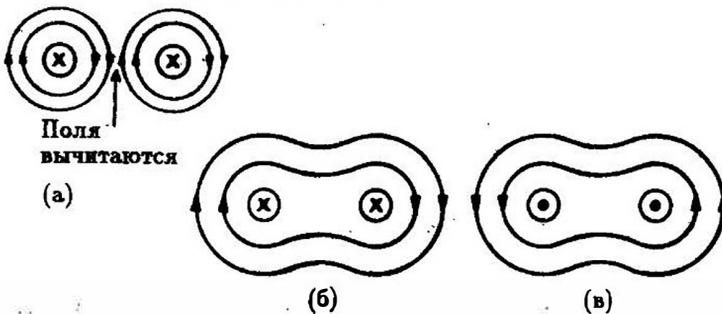


Рис. 7.4. Два проводника с одинаковыми направлениями токов (а) и их результирующее магнитное поле (б, в).

2. *Направления токов в проводниках противоположны.* На рис. 7.5(а) показаны магнитные поля для каждого проводника по отдельности. В этом случае в промежутке между проводниками их поля суммируются и здесь результирующее поле (рис. 7.5(б)) максимально.

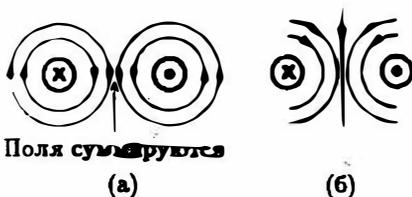


Рис. 7.5. Два проводника с противоположными направлениями токов (а) и их результирующее магнитное поле (б).

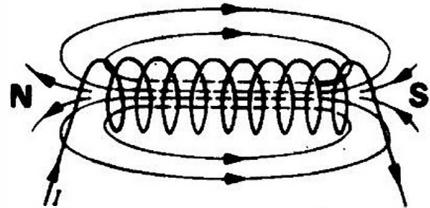


Рис. 7.6. Магнитное поле соленоида.

Магнитное поле соленоида

Соленоид — это цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков проволоки (рис. 7.6). Когда по виткам соленоида протекает ток, соленоид ведет себя как полосовой магнит с северным и южным полюсами. Создаваемое им магнитное поле ничем не отличается от поля постоянного магнита. Магнитное поле внутри соленоида можно усилить, намотав катушку на магнитный сердечник из стали, железа или другого магнитного материала. Напряженность (величина) магнитного поля соленоида зависит также от силы пропускаемого электрического тока и числа витков.

Электромагнит

Соленоид можно использовать в качестве электромагнита, при этом сердечник делается из магнитомягкого материала, например ковкого железа. Соленоид ведет себя как магнит только в том случае, когда через катушку протекает электрический ток. Электромагниты применяются в электрических звонках и реле.

Проводник в магнитном поле

На рис. 7.7 изображен проводник с током, помещенный в магнитное поле. Видно, что магнитное поле этого проводника складывается с магнитным полем постоянного магнита в зоне выше проводника и вычитается в зоне ниже проводника. Таким образом, более сильное магнитное поле находится выше проводника, а более слабое — ниже (рис. 7.8).

Если изменить направление тока в проводнике на обратное, то форма магнитного поля останется прежней, но его величина будет больше под проводником.

Магнитное поле, ток и движение

Если проводник с током поместить в магнитное поле, то на него будет действовать сила, которая пытается передвинуть проводник из области



Рис. 7.7. Проводник с током в магнитном поле.

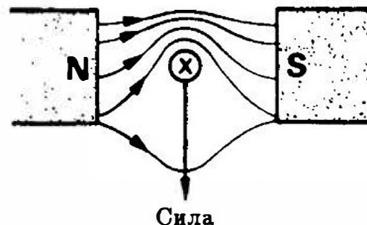


Рис. 7.8. Результирующее поле.

более сильного поля в область более слабого, как показано на рис. 7.8. Направление этой силы зависит от направления тока, а также от направления магнитного поля. Величина силы, действующей на проводник с током, определяется как величиной магнитного поля, так и силой тока, протекающего через этот проводник.

Движение проводника, помещенного в магнитное поле, при пропускании через него тока называется *принципом двигателя*. На этом принципе основана работа электродвигателей, магнитоэлектрических измерительных приборов с подвижной катушкой и других устройств. Если проводник перемещать в магнитном поле, в нем генерируется ток. Это явление называется *принципом генератора*. На этом принципе основана работа генераторов постоянного и переменного тока.

Индукцированная ЭДС

До сих пор рассматривалось магнитное поле, связанное только с постоянным электрическим током. В этом случае направление магнитного поля постоянно и определяется направлением постоянного тока. При протекании переменного тока создается переменное магнитное поле. Если отдельную катушку поместить в это переменное поле, то в ней будет индуцироваться (наводиться) ЭДС (напряжение). Или если две отдельные катушки расположить в непосредственной близости друг к другу, как показано на рис. 7.9, и приложить переменное напряжение к одной обмотке (W_1), то между выводами второй обмотки (W_2) будет возникать новое переменное напряжение (индуцированная ЭДС). Это принцип работы трансформатора.

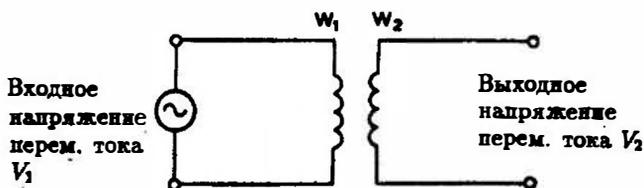


Рис. 7.9. Индуцированная ЭДС.

Трансформатор

Трансформатор состоит из двух отдельных обмоток, называемых *первичной* и *вторичной* обмотками. Входное напряжение переменного тока прикладывается к первичной обмотке и создает изменяющееся магнитное поле. Это магнитное поле взаимодействует со вторичной обмоткой, индуцируя в ней напряжение переменного тока (точнее, ЭДС). Напряжение, индуцируемое во вторичной обмотке, имеет ту же частоту, что и входное

напряжение, но его амплитуда определяется соотношением числа витков вторичной и первичной обмоток.

$$\begin{aligned} \text{Если входное напряжение на выводах первичной обмотки} &= V_1, \\ \text{выходное напряжение на выводах вторичной обмотки} &= V_2, \\ \text{число витков первичной обмотки} &= T_1, \\ \text{число витков вторичной обмотки} &= T_2, \\ \text{то } \frac{V_1}{V_2} &= \frac{T_1}{T_2}. \end{aligned}$$

Кроме того, $I_1/I_2 = T_2/T_1$, где I_1 и I_2 — токи первичной и вторичной обмоток соответственно.

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора

Приведенные выше соотношения предполагают, что трансформатор имеет 100%-ный КПД, т. е. полностью отсутствуют какие-либо потери мощности. Следовательно,

$$\text{Входная мощность } I_1 \cdot V_1 = \text{Выходная мощность } I_2 \cdot V_2.$$

На практике трансформаторы имеют КПД около 96–99%. Для увеличения КПД трансформатора его первичная и вторичная обмотки наматываются на одном магнитном сердечнике (рис. 7.10).

Повышающий и понижающий трансформаторы

Повышающий трансформатор вырабатывает на выходе (во вторичной обмотке) более высокое напряжение, чем приложено на входе (к первичной обмотке). Для этого число витков вторичной обмотки делается больше числа витков первичной обмотки.

Понижающий трансформатор вырабатывает на своем выходе меньшее напряжение, чем на входе, поскольку его вторичная обмотка имеет меньшее число витков по сравнению с первичной.

Коэффициент приведения сопротивления

Трансформатор, изображенный на рис. 7.11, имеет в цепи вторичной обмотки нагрузочный резистор r_2 . Сопротивление r_2 можно пересчитать или, как говорят, привести к первичной обмотке, т. е. к сопротивлению трансформатора r_1 со стороны первичной обмотки. Отношение r_1/r_2 называется коэффициентом приведения сопротивления. Этот коэффициент можно рассчитать следующим образом. Поскольку $r_1 = V_1/I_1$ и $r_2 = V_2/I_2$, то

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{V_1}{I_1} \bigg/ \frac{V_2}{I_2} = \frac{V_1}{I_1} \cdot \frac{I_2}{V_2} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}.$$



Рис. 7.10. Трансформатор.

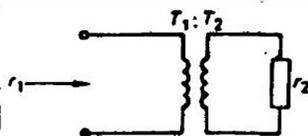
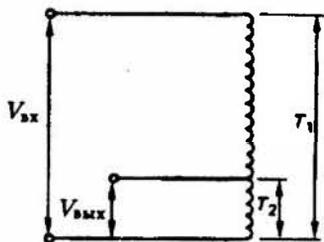
Рис. 7.11. Коэффициент приведения сопротивления
 $r_1/r_2 = T_1^2/T_2^2 = n^2$.

Рис. 7.12. Автотрансформатор.

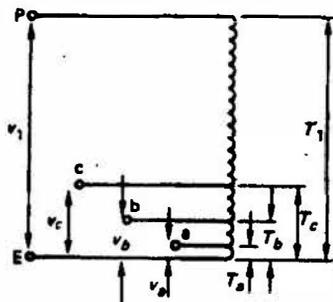


Рис. 7.13. Автотрансформатор с несколькими отводами.

Но $V_1/V_2 = T_1/T_2 = n$ и $I_2/I_1 = T_1/T_2 = n$, поэтому

$$\frac{r_1}{r_2} = n \cdot n = n^2.$$

Например, если сопротивление нагрузки $r_2 = 100$ Ом и отношение числа витков обмоток (коэффициент трансформации) $T_1/T_2 = n = 2 : 1$, то со стороны первичной обмотки трансформатор можно рассматривать как резистор с сопротивлением $r_1 = 100 \text{ Ом} \cdot 2^2 = 100 \cdot 4 = 400$ Ом.

Автотрансформатор

Трансформатор может иметь одну-единственную обмотку с одним отводом от части витков этой обмотки, как показано на рис. 7.12. Здесь T_1 — число витков первичной обмотки и T_2 — число витков вторичной обмотки. Напряжения, токи, сопротивления и коэффициент трансформации определяются теми же формулами, которые применимы к обычному трансформатору.

На рис. 7.13 показан еще один трансформатор с единственной обмоткой, в котором сделано несколько отводов от этой обмотки. Все соотноше-

ния для напряжений, токов и сопротивлений по-прежнему определяются коэффициентом трансформации ($V_1/V_a = T_1/T_a$, $V_1/V_b = T_1/T_b$ и т. д.).

Трансформатор с отводом от средней точки вторичной обмотки

На рис. 7.14 изображен трансформатор с отводом от середины его вторичной обмотки. С верхней и нижней половин вторичной обмотки снимаются выходные напряжения V_a и V_b . Отношение входного напряжения (на первичной обмотке) к каждому из этих выходных напряжений определяется отношением числа витков, причем

$$\frac{V_1}{V_a} = \frac{T_1}{T_a}, \quad \frac{V_1}{V_b} = \frac{T_1}{T_b},$$

где T_1 , T_a и T_b — число витков первичной, вторичной a и вторичной b обмоток соответственно. Поскольку отвод сделан от середины вторичной обмотки, напряжения V_a и V_b равны по амплитуде. Если средняя точка заземлена, как в схеме на рис. 7.14, то выходные напряжения, снимаемые с двух половин вторичной обмотки, находятся в противофазе.

Пример

Обратимся к рис. 7.15. (а) Рассчитайте напряжение между выводами В и С трансформатора. (б) Если между выводами А и В намотано 30 витков, то сколько всего витков имеет вторичная обмотка трансформатора?

Решение

а) $V_{BC} = V_{AD} - V_{AB} - V_{CD} = 36 \text{ В} - 6 \text{ В} - 12 \text{ В} = 18 \text{ В}.$

б) $V_{AB}/V_{AD} = \frac{\text{Число витков между А и В}}{\text{Число витков между А и D}}.$

Следовательно, $6 \text{ В}/36 \text{ В} = 30/T_{AD}$, отсюда $T_{AD} = 30 \cdot 36/6 = 180$ витков.

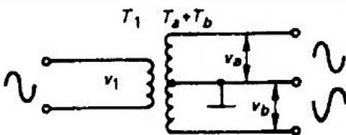


Рис. 7.14. Трансформатор с отводом от средней точки вторичной обмотки.

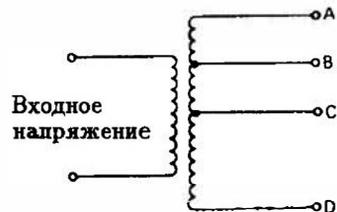


Рис. 7.15. $V_{AD} = 36 \text{ В}$, $V_{AB} = 6 \text{ В}$, $V_{CD} = 12 \text{ В}$.

Магнитная цепь

Принято говорить, что в магнитной цепи магнитный поток (или магнитное поле), измеряемый в теслах, создается силой, называемой магнитодвижущей силой (МДС). Магнитная цепь обычно сравнивается с электрической цепью, причем магнитный поток сопоставляется с током, а магнитодвижущая сила — с электродвижущей силой. Точно так же, как говорят о сопротивлении R электрической цепи, можно говорить о магнитном сопротивлении S магнитной цепи; эти понятия имеют аналогичный смысл. Например, такой магнитомягкий материал, как ковкое железо, обладает низким магнитным сопротивлением, т. е. низким сопротивлением для магнитного потока.

Магнитная проницаемость

Магнитная проницаемость материала — это мера легкости его намагничивания. Например, ковкое железо и другие электромагнитные материалы, такие, как ферриты, обладают высокой магнитной проницаемостью. Эти материалы применяются в трансформаторах, катушках индуктивности, реле и ферритовых антеннах. В отличие от них немагнитные материалы имеют очень низкую магнитную проницаемость. Магнитные сплавы, такие, как кремнистая сталь, обладают способностью сохранять состояние намагниченности в отсутствие магнитного поля и поэтому применяются в качестве постоянных магнитов в громкоговорителях (динамических головках), магнитоэлектрических измерительных приборах с подвижной катушкой и т. д.

Экранирование

Рассмотрим полый цилиндр, помещенный в магнитное поле (рис. 7.16). Если этот цилиндр изготовлен из материала с низким магнитным сопротивлением (магнитомягкого материала), то магнитное поле будет концен-

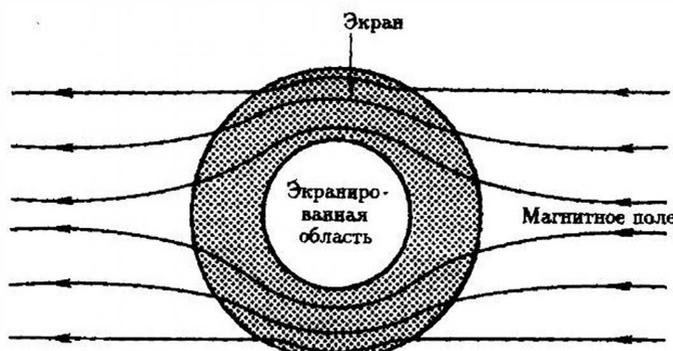


Рис. 7.16. Магнитное экранирование.



Рис. 7.17. Электростатическое экранирование в трансформаторе.

трироваться в стенках цилиндра, как показано на рисунке, не попадая в его внутреннюю область. Следовательно, если в эту область поместить какой-либо предмет, он будет защищен (экранирован) от влияния магнитного поля в окружающем пространстве. Такое экранирование, называемое магнитным экранированием, применяется для защиты от внешних магнитных полей электронно-лучевых трубок, магнитоэлектрических измерительных приборов с подвижной катушкой, динамических головок громкоговорителей и т. п.

В трансформаторах иногда применяется другой тип экранирования, называемый электростатическим или электрическим экранированием. Между первичной и вторичной обмотками трансформатора размещается экран из тонкой медной фольги, как показано на рис. 7.17. При заземлении такого экрана сильно уменьшается влияние емкости между обмотками, которая возникает из-за разности потенциалов этих обмоток. Электростатическое экранирование применяется также в коаксиальных кабелях и всюду, где проводники имеют разные потенциалы и находятся в непосредственной близости друг от друга.

Согласование

Полное входное и полное выходное сопротивления

Любой прибор, будь то простой усилитель или сложный телевизор, может быть представлен в виде «черного ящика» с двумя входными и двумя выходными выводами (рис. 8.1), имеющего полное входное сопротивление $Z_{вх}$ и полное выходное сопротивление $Z_{вых}$. Здесь $Z_{вх}$ — полное сопротивление прибора, если смотреть со стороны входных зажимов АВ, а $Z_{вых}$ — полное сопротивление прибора, если смотреть со стороны его выходных зажимов СD. Поскольку входной сигнал подается с какого-то источника, то наш прибор является для него нагрузочным сопротивлением $Z_{вх}$. С другой стороны, прибор сам имеет нагрузку в виде следующей схемы и является по отношению к ней генератором с внутренним сопротивлением $Z_{вых}$.

Во многих случаях, например в усилителях мощности или при работе телевизора или радиоприемника от антенны, нужно передать энергию с одного каскада на другой. При этом необходимо передать как можно большую часть энергии. В связи с этим встает вопрос о согласовании сопротивлений и максимальной передаче энергии.

Согласование, или максимальная передача энергии, достигается в том случае, когда выходное сопротивление одного каскада равно входному сопротивлению следующего (рис. 8.2).

В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 8.3. Генератор, имеющий внутреннее сопротивление $r = 10$ Ом и ЭДС $e = 3$ В, нагружен сопротивлением R . Максимальная энергия передается на нагрузку R тогда, когда сопротивление R равно внутреннему (или выходному) сопротивлению генератора.



Рис. 8.1. Полное входное и полное выходное сопротивления $Z_{вх}$ и $Z_{вых}$.

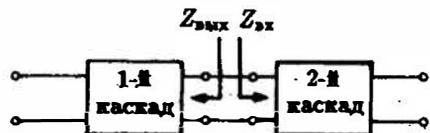


Рис. 8.2. Для согласования необходимо, чтобы $Z_{вх} = Z_{вых}$.

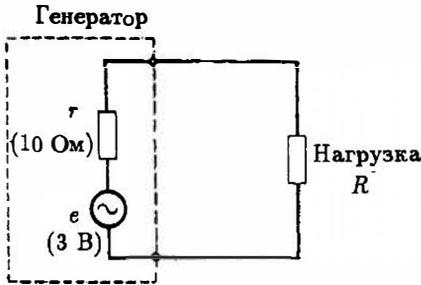


Рис. 8.3.

Для случая $R = 10 \text{ Ом}$ падение напряжения на сопротивлении R равно $V_R = 3/2 = 1,5 \text{ В}$. Следовательно, мощность на выходе, или мощность, передаваемая нагрузке, равна

$$\frac{V^2}{R} = \frac{1,5 \cdot 1,5}{10} = \frac{2,25}{10} = 0,225 \text{ Вт} = 225 \text{ мВт}.$$

Следует заметить, что при точном согласовании нагрузки мощность, рассеиваемая на нагрузке, равна мощности, рассеиваемой на внутреннем сопротивлении r .

Для любой другой величины нагрузки R выходная мощность всегда будет меньше, чем 225 мВт. Так, если $R = 20 \text{ Ом}$,

$$V_R = \frac{3}{10 + 20} \cdot 20 = \frac{3 \cdot 20}{30} = 2 \text{ В},$$

откуда выходная мощность равна

$$\frac{V^2}{R} = \frac{2 \cdot 2}{20} = \frac{4}{20} = 0,2 \text{ Вт} = 200 \text{ мВт}.$$

Аналогично если сопротивление R уменьшится до $10/2 = 5 \text{ Ом}$, то выходная мощность также уменьшится до 200 мВт.

Согласование с помощью трансформатора

Иногда для обеспечения согласования между двумя каскадами схемы или между выходным каскадом схемы и нагрузкой в качестве *связующего звена* применяется трансформатор. На рис. 8.4 показан усилитель мощности звуковой частоты, подсоединенный к громкоговорителю через трансформатор. Предположим, что громкоговоритель имеет сопротивление $r_2 = 10 \text{ Ом}$, а используемый усилитель имеет выходное сопротивление $r_1 = 1000 \text{ Ом}$. Для обеспечения согласования необходимо выбрать

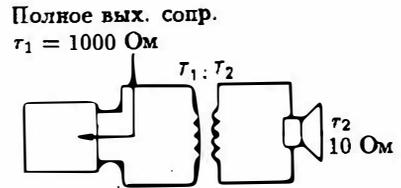


Рис. 8.4. Согласующий трансформатор. Коэффициент трансформации $T_1/T_2 = 10 : 1$.

трансформатор с таким коэффициентом трансформации $T_1/T_2 = n$, чтобы сопротивление громкоговорителя, приведенное к первичной обмотке, равнялось выходному сопротивлению усилителя.

Из гл. 7 мы уже знаем, что

$$n^2 = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1000}{10} = 100, \text{ следовательно, } n = \sqrt{100} = 10.$$

Таким образом, нужен понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 10 : 1.

Заметим, что во всех случаях, когда усилитель нагружен на низкоомную нагрузку (а в большинстве случаев именно так и бывает), необходимо использовать **понижающий** трансформатор.

Примеры

Пример 1

На рис. 8.5 изображена схема, в которой усилитель подключен к 8-Ом громкоговорителю через резистор с сопротивлением 7 Ом.

- Объясните назначение резистора R .
- Каков основной недостаток используемого метода?

Решение

а) Сопротивление R используется для обеспечения максимальной выходной мощности усилителя.

б) Недостатком данной схемы является то, что почти половина выходной мощности теряется на резисторе.

Пример 2

На рис. 8.6 показан способ упрощения подключения головных телефонов. Рассчитать величину сопротивления R , если наушники имеют сопротивление 8 Ом.

Решение

$$R = 30 - 8 = 22 \text{ Ом.}$$

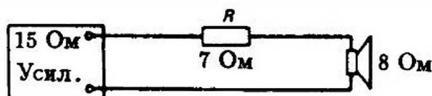


Рис. 8.5.

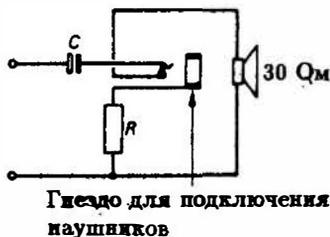


Рис. 8.6.

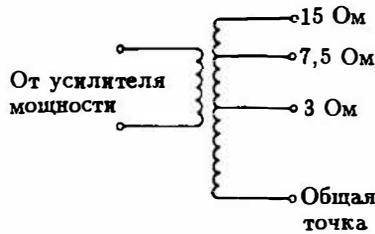


Рис. 8.7.

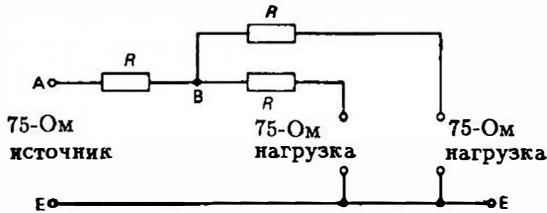


Рис. 8.8.

Пример 3

Обратимся к схеме на рис. 8.7. Как следует подсоединить два громкоговорителя с внутренним сопротивлением каждого по 15 Ом к выходному трансформатору, показанному на рисунке?

Решение

Для обеспечения согласования необходимо, чтобы выходное сопротивление трансформатора было равно сопротивлению нагрузки. Этого можно достигнуть, если громкоговорители, соединенные параллельно и дающие в результате общее сопротивление нагрузки 7,5 Ом, подключить между общей точкой и клеммой с маркировкой «7,5 Ом».

Пример 4

На рис. 8.8 изображена схема расщепителя сигнала, в котором внешняя нагрузка согласована с внешним источником сигнала. Вычислить величину сопротивления R .

Решение

Для согласования общее сопротивление схемы R_{AE} , если смотреть со стороны АЕ, должно быть равно 75 Ом. Общее сопротивление R_{BE} между точками В и Е (обеих нагрузочных ветвей) равно

$$\frac{1}{2}(R + 75) = \frac{R}{2} + \frac{75}{2}.$$

Таким образом, общее сопротивление между точками А и Е равно

$$R_{AE} = R + R_{BE} = R + \frac{R}{2} + \frac{75}{2} = \frac{3R}{2} + \frac{75}{2}.$$

Однако для согласования необходимо, чтобы $R_{AE} = 75$ Ом. Следовательно,

$$75 = \frac{3R}{2} + \frac{75}{2}.$$

Откуда

$$\frac{3R}{2} = 75 - \frac{75}{2} = \frac{75}{2},$$

$$R = \frac{75}{3} = 25 \text{ Ом.}$$

Преобразование формы сигнала

Амплитудное ограничение, или клиппирование

Процесс выравнивания одного или обоих пиков сигнала переменного тока называется клиппированием, или ограничением. Это достигается посредством перегрузки усилителя. При сильном ограничении (рис. 9.1(в)) сигнал, имеющий на входе форму синусоиды, превращается на выходе в сигнал почти прямоугольной формы.



Рис. 9.1. Клиппирование, или амплитудное ограничение.

Фиксация уровня

Схема фиксации уровня также известна под названием схемы восстановления постоянной составляющей. Она формирует переменный сигнал с постоянной составляющей, которой не было во входном сигнале. Схемы восстановления постоянной составляющей (ВПС) используются, например, для того, чтобы добавить постоянную составляющую к видеосигналу (рис. 9.2).

Связь по переменному току

Схема связи по переменному току производит на сигнал действие, противоположное действию схемы ВПС. Она удаляет постоянную составляющую из входного сигнала (рис. 9.3). Обычно эта схема бывает не сложнее конденсатора, который блокирует прохождение постоянной составляющей и пропускает в то же время переменную составляющую сигнала.

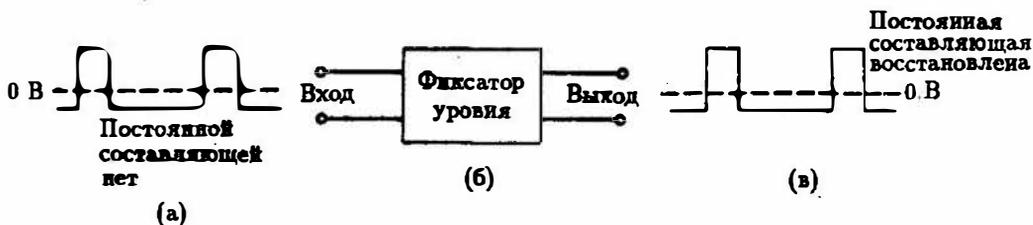


Рис. 9.2. Восстановление постоянной составляющей. (а) Постоянная составляющая в сигнале отсутствует. (б) Схема ВПС. (в) Постоянная составляющая восстановлена.

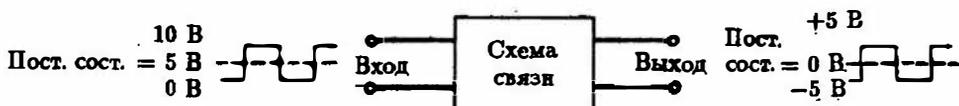


Рис. 9.3. Связь по переменному току.

Выпрямление

Выпрямление — это процесс преобразования переменного тока в постоянный посредством того, что ток имеет возможность протекать только в одном направлении. Выпрямители используются в источниках питания постоянного тока, а также в таких устройствах, как демодуляторы.

Выпрямление бывает двух видов:

а) Однополупериодное выпрямление. В этом случае срезается либо положительная, либо отрицательная полуволна сигнала. В результате на выходе, как видно из рис. 9.4, мы получаем лишь половину входного сигнала. Постоянная составляющая сигналов такой формы составляет 0,318 (приблизительно 1/3) от амплитудного значения.

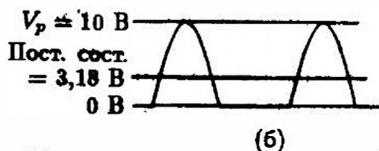
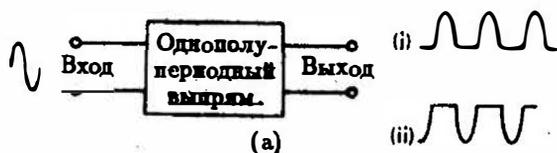


Рис. 9.4. При однополупериодном выпрямлении уровень постоянной составляющей равен 0,318 от амплитудного значения V_p . (i) — проходит положительная полуволна, (ii) — проходит отрицательная полуволна.

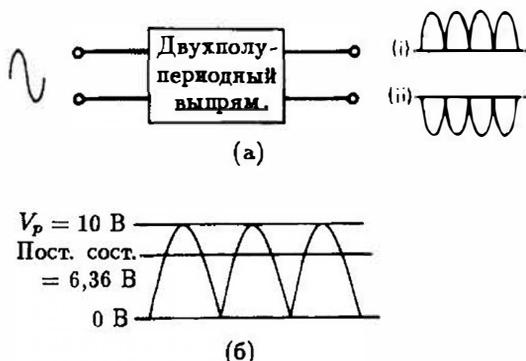


Рис. 9.5. При двухполупериодном выпрямлении уровень постоянной составляющей равен 0,636 от амплитудного значения V_p . На выходе обе полуволны становятся или положительными (i), или отрицательными (ii).

б) Двухполупериодное выпрямление, при котором и положительная, и отрицательная полуволна входного сигнала приобретают одинаковую полярность (рис. 9.5). Постоянная составляющая в этом случае по сравнению с первым случаем удваивается и составляет 0,636 (приблизительно $2/3$) от амплитудного значения.

При однополупериодном выпрямлении частота выходного сигнала равна частоте входного сигнала, в то время как при двухполупериодном выпрямлении частота выходного сигнала удваивается по сравнению с частотой сигнала на входе.

Фильтры

В электронных схемах часто бывает необходимо отделить одну полосу частот от другой. Фильтр пропускает сигналы одной определенной полосы частот, блокируя в то же время прохождение сигналов других частот. Существует три основных типа фильтров.

(а) **Фильтр верхних частот**, пропускающий только высокие частоты и блокирующий прохождение всех низких частот. В случае подачи на вход фильтра сложного сигнала будут пропущены только высокочастотные гармоники, а основная и низкочастотные гармоники будут сильно ослаблены.

(б) **Фильтр нижних частот**, пропускающий низкие частоты и блокирующий прохождение всех высоких частот. В случае подачи на вход фильтра сложного сигнала на выходе будут получены основная и низкочастотные гармоники, а высокочастотные гармоники будут сильно ослаблены.

(в) **Полосовой фильтр**, пропускающий лишь сигналы определенной полосы частот и отсекающий все частоты, лежащие выше или ниже заданной полосы.

Прямоугольный сигнал

Как уже говорилось в гл. 3, сигнал прямоугольной формы является сложным сигналом и состоит из основной гармоники и бесконечного числа нечетных гармоник. Таким образом, прямоугольный сигнал имеет в своем составе как низкочастотные компоненты (основная и низшие гармоники), так и высокочастотные (высшие гармоники). В самом прямоугольном сигнале низкочастотные компоненты формируют его плоскую вершину и плоское основание, а высокочастотные — круто нарастающий фронт и резко спадающий срез.

Когда прямоугольный сигнал подается на фильтр, то в зависимости от типа фильтра отсекаются либо высокочастотные, либо низкочастотные составляющие сигнала.

Дифференциатор

Дифференциатор является фильтром верхних частот. При подаче прямоугольного сигнала на вход дифференциатора на его выходе мы получаем только высокочастотные компоненты в виде острых зубцов положительной и отрицательной полярности. Такие короткие импульсы, или всплески, показаны на рис. 9.6. Каждому циклу входного сигнала соответствуют два импульса на выходе. Амплитуда этих импульсов равна амплитуде входного сигнала.



Рис. 9.6. Дифференциатор.

Интегратор

Интегратор является фильтром нижних частот. При подаче прямоугольного сигнала на вход интегратора на его выходе мы получаем только низкочастотные компоненты, а именно, плоские части сигнала. В идеале на выходе должен быть получен постоянный ток. Однако в реальных схемах на выходе интегратора получается треугольный сигнал. Амплитуда этого сигнала меньше, чем амплитуда входного прямоугольного сигнала (рис. 9.7).

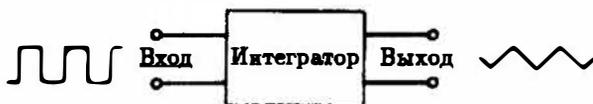


Рис. 9.7. Интегратор.

Воздействие дифференциатора и интегратора на сигнал прямоугольной формы

На рис. 9.8 показано, как изменяется прямоугольный сигнал после прохождения через дифференциатор и через интегратор.

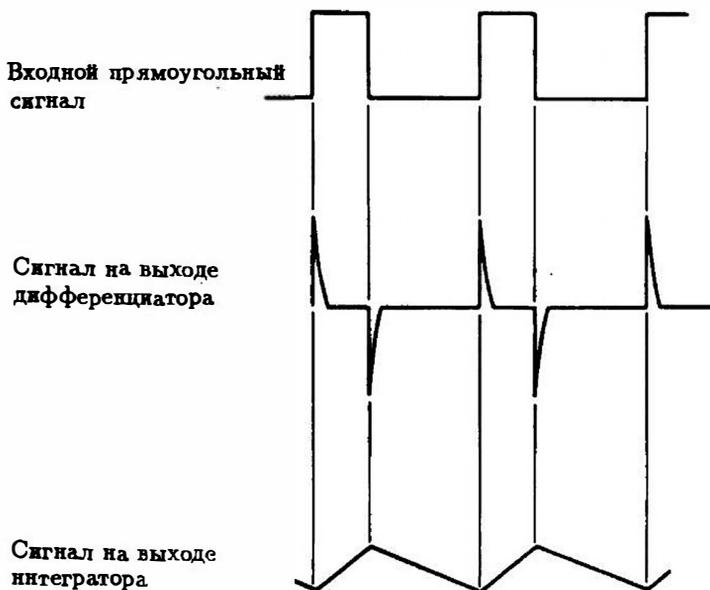


Рис. 9.8. Дифференцирование и интегрирование прямоугольного сигнала.

Воздействие дифференциатора и интегратора на сигнал синусоидальной формы

Синусоидальный сигнал является простым сигналом, поэтому при прохождении как через дифференциатор, так и через интегратор его форма не претерпевает никаких изменений. Изменяется лишь амплитуда сигнала. Поскольку дифференциатор является фильтром верхних частот, то он не изменяет амплитуды высокочастотного синусоидального сигнала. Амплитуда же низкочастотного сигнала при прохождении через дифференциатор будет уменьшаться. Интегратор действует наоборот: оставляет неизменной амплитуду низкочастотного синусоидального сигнала и уменьшает амплитуду высокочастотного.

Источники питания I

Электрические цепи можно разбить на два типа: активные и пассивные. Примерами активных цепей являются усилители и генераторы. Резистивные цепи (состоящие из резисторов), аттенюаторы и трансформаторы — это пассивные цепи. В отличие от пассивных цепей, которые начинают работать просто при их включении в электронную схему, активные цепи требуют подвода энергии постоянного тока. Эту энергию можно получить от батареи или сетевого источника питания.

Источник питания постоянного тока — это устройство, которое преобразует энергию переменного тока в энергию постоянного тока. Он обычно используется для преобразования напряжения электросети в напряжение постоянного тока различной величины.

В этой главе представлены только блок-схемы различных типов выпрямителей и дана их краткая характеристика. Более подробное изложение приведено в гл. 29.

Блок-схема

На рис. 10.1 показаны блок-схемы источников постоянного тока на основе однополупериодного (а) и двухполупериодного (б) выпрямителей. В качестве входного напряжения переменного тока обычно используется напряжение электросети. В обоих случаях первый каскад представляет собой выпрямитель (однополупериодный или двухполупериодный). Выходное напряжение выпрямителя состоит из двух составляющих: постоянной и довольно значительной переменной. Такое выходное напряжение называется пульсирующим, и оно, вообще говоря, непригодно для питания электронных схем постоянным током. Чтобы исключить переменную составляющую, применяется сглаживающий фильтр (фильтр нижних частот), который подавляет эту составляющую до уровня очень малых пульсаций и полностью пропускает постоянную составляющую. Частота пульсаций определяется типом используемого выпрямителя. В однополупериодном выпрямителе пульсации имеют ту же частоту, что и входное напряжение, на выходе двухполупериодного выпрямителя — вдвое выше.

Во многих источниках постоянного тока перед выпрямителем устанавливается трансформатор, преобразующий сетевое напряжение к требуемому уровню входного напряжения выпрямителя (рис. 10.2). Коэффици-

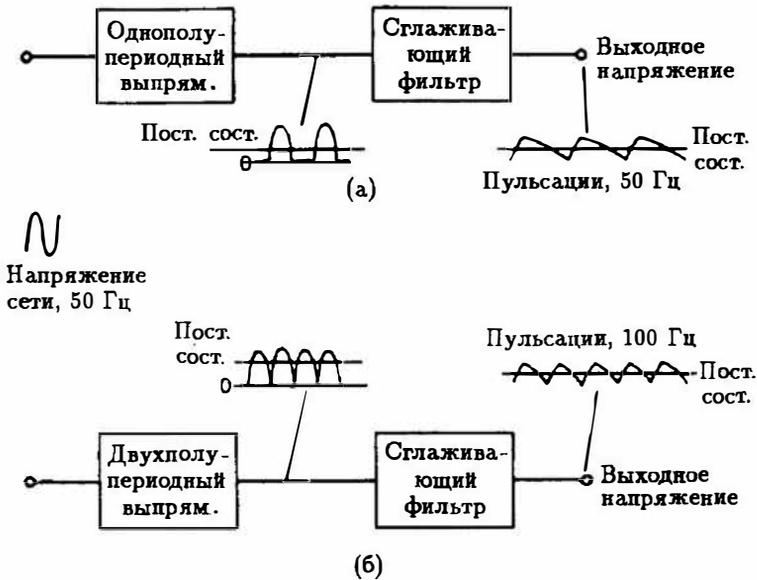


Рис. 10.1. Источники питания постоянного тока.

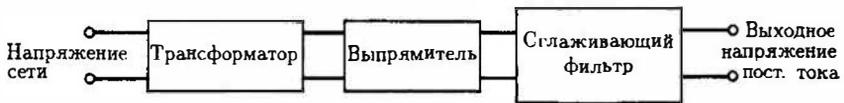


Рис. 10.2. Источник питания постоянного тока с трансформатором.

ент трансформации используемого трансформатора определяет уровень выходного напряжения источника питания.

Нагрузочная характеристика

Выходное напряжение на выводах любого источника питания постоянного тока, включая и батареи, максимально в отсутствие нагрузки (напряжение холостого хода), то есть когда от источника не потребляется ток. При подаче тока в нагрузку это напряжение уменьшается из-за влияния внутреннего сопротивления источника питания. Зависимости величины выходного напряжения источника питания от величины тока нагрузки называется нагрузочной характеристикой (кривой) источника питания. Типичная нагрузочная характеристика показана на рис. 10.3.

Для улучшения нагрузочной характеристики источника питания, т. е. для поддержания выходного напряжения на постоянном уровне при уве-

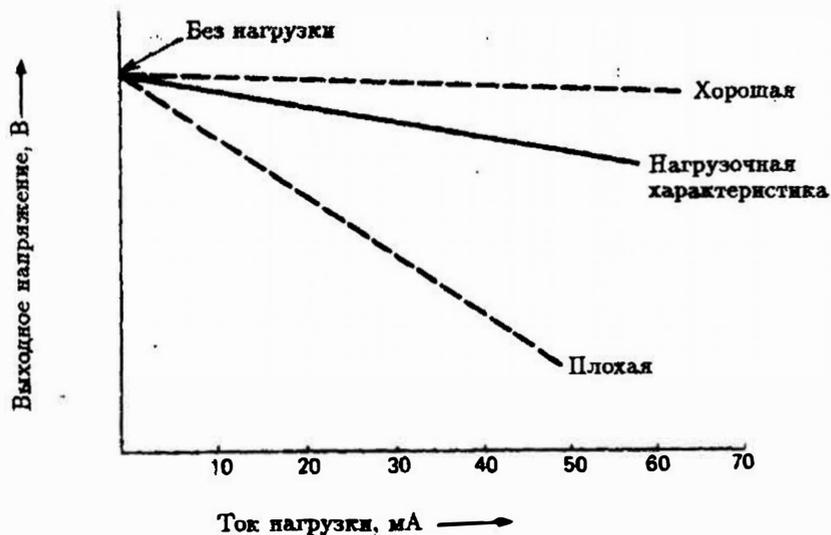


Рис. 10.3. Нагрузочная характеристика.

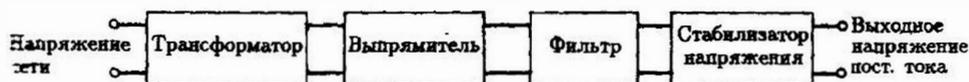


Рис. 10.4. Стабилизированный источник питания.

лчении тока нагрузки, применяются стабилизаторы, включаемые на выходе источника питания. Блок-схема стабилизированного источника питания показана на рис. 10.4.

Инверторы и конверторы

Инвертор — это источник питания, который преобразует напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока (рис. 10.5), а конвертор обеспечивает преобразование уровней напряжения постоянного тока. По



Рис. 10.5.

существо, конвертор — это инвертор с выпрямителем на выходе; последний преобразует выходное переменное напряжение генератора обратно в напряжение постоянного тока (рис. 10.6).

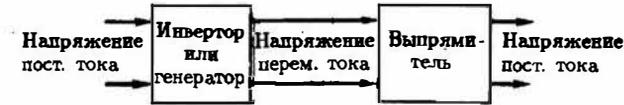


Рис. 10.6.

Цифровые логические схемы и системы

Цифровое управление — сравнительно новая область в электронике. Оно ведет свое происхождение от теории связи. Цифровое управление охватывает компьютерную технику, электронные АТС, промышленные системы управления, системы обработки данных и множество других подобных систем. Цифровые приборы работают в дискретном режиме, обычно ON (включено) или OFF (выключено). Главной и неотъемлемой особенностью цифрового прибора является переход из одного состояния в другое без «остановки» в каком-либо промежуточном положении.

Логические схемы

Логические элементы, или схемы, — это цифровые приборы, которые имеют на выходе одно из двух состояний: нулевой выход (обозначается 0) и фиксированный выход (обозначается 1). Логическая схема может иметь несколько входов и только один выход.

Логическая схема И (рис. 11.1)

Схема И выдает на выходе логическую 1, когда на все ее входы подан сигнал, соответствующий логической 1. На рис. 11.1 показана схема И с двумя входами. Ее выход равен 1 только в том случае, если и на вход А, и на вход В подана 1. В табл. 11.1 функция И представлена в виде так называемой таблицы истинности.

На рис. 11.2 показаны типичные формы входных и выходных сигналов.

Таблица 11.1. Таблица истинности схемы И

Входы		Выход
А	В	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 11.2. Таблица истинности схемы И-НЕ

Входы		Выход
А	В	
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

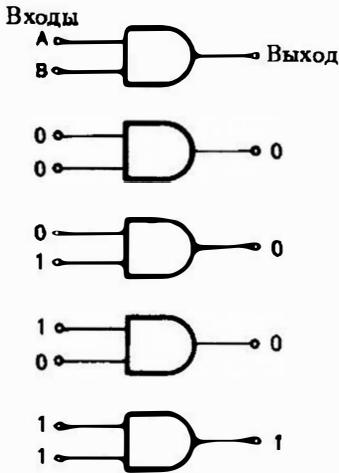


Рис. 11.1. Схема И.

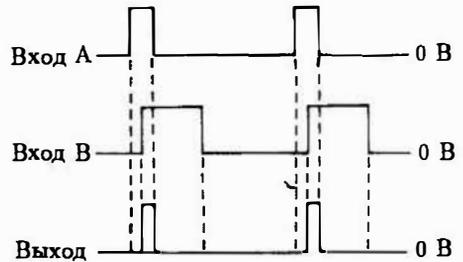


Рис. 11.2. Входные и выходные импульсные сигналы в схеме И с двумя входами.

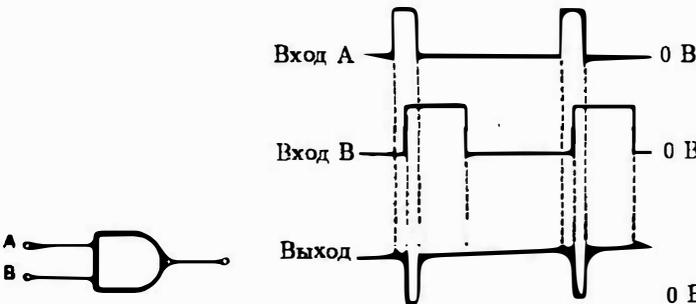


Рис. 11.3. Схема И-НЕ.

Рис. 11.4. Входные и выходные импульсные сигналы в схеме И-НЕ с двумя входами.



Рис. 11.5. Схема ИЛИ.

Обратите внимание, что на выходе логическая 1 появляется только тогда, когда на обоих входах присутствует 1.

Логическая схема И-НЕ (рис. 11.3 и табл. 11.2)

Логическая схема И-НЕ имеет на выходе логический 0, когда на все ее входы поданы сигналы, соответствующие логической 1. И наоборот, если хотя бы на одном из входов схемы И-НЕ присутствует 0, на ее выходе появляется 1 (см. рис. 11.4). Таким образом, схема И-НЕ является логической противоположностью схемы И.

Таблица 11.3. Таблица истинности схемы ИЛИ

Входы		Выход
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 11.4. Таблица истинности схемы ИЛИ-НЕ

Входы		Выход
A	B	
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



Рис. 11.6. Схема ИЛИ-НЕ.

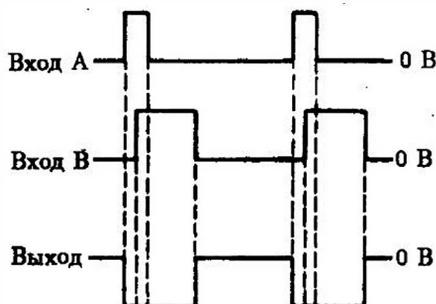


Рис. 11.7. Входные и выходные импульсные сигналы в схеме ИЛИ-НЕ с двумя входами.

Логическая схема ИЛИ (рис. 11.5 и табл. 11.3)

Логическая схема ИЛИ дает на выходе 1, если хотя бы на одном из ее входов присутствует 1. Логический 0 появляется на ее выходе только в том случае, если на всех ее входах действуют логические 0.

Логическая схема ИЛИ-НЕ

(рис. 11.6 и табл. 11.4)

Схема ИЛИ-НЕ дает на выходе 0, если хотя бы на одном ее входе присутствует 1. Логическая 1 появляется на ее выходе только тогда, когда на всех ее входах присутствует логический 0. Таким образом, схема ИЛИ-НЕ является логической противоположностью схемы ИЛИ. На рис. 11.7 показаны типичные формы сигналов, действующих в схеме ИЛИ-НЕ.

Логическая схема НЕ (рис. 11.8 и табл. 11.5)

Логическая схема НЕ является инвертором. Когда на ее входе присутствует 1, на выходе появляется 0, и наоборот. Если соединить между собой входы логических схем И-НЕ или ИЛИ-НЕ (рис. 11.8(б) и (в)), то

Таблица 11.5. Таблица истинности схемы НЕ

Вход	Выход
0	1
1	0

Таблица 11.6. Таблица истинности схемы Иключающее ИЛИ

Входы		Выход
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица 11.7. Таблица истинности схемы Иключающее ИЛИ-НЕ

Входы		Выход
A	B	
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

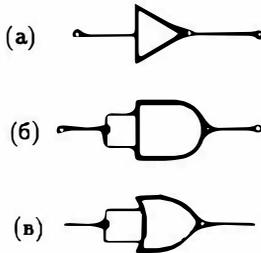


Рис. 11.8. Схема НЕ.

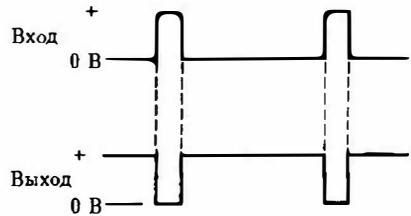


Рис. 11.9. Входные и выходные импульсные сигналы в схеме НЕ.

получится схема инвертора. На рис. 11.9 показаны типичные формы сигналов в схеме НЕ.

Логическая схема Иключающее ИЛИ (рис. 11.10 и табл. 11.6)

Логическая схема Иключающее ИЛИ дает на выходе 1, если только на один ее вход подается 1. Если же на обоих входах присутствуют логические 0 или 1, на выходе появляется логический 0.

Логическая схема Иключающее ИЛИ-НЕ (рис. 11.11 и табл. 11.7)

Схема Иключающее ИЛИ-НЕ дает на выходе 1, когда на обоих ее входах присутствуют логические 0 или 1.



Рис. 11.10. Схема Иключающее ИЛИ.



Рис. 11.11. Схема Иключающее ИЛИ-НЕ.

Международные стандарты и стандарты Великобритании

На рис. 11.12 показаны условные обозначения, утвержденные международным и британским стандартами для изображения логических схем. Сводные таблицы истинности приведены в табл. 11.8.

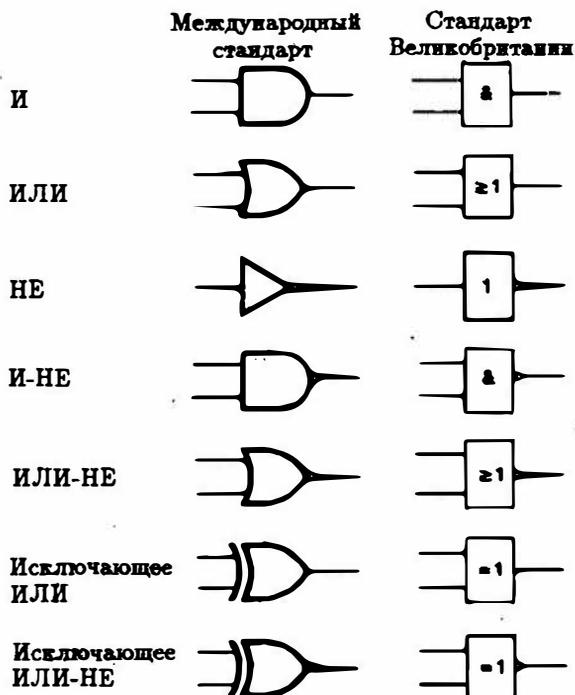


Рис. 11.12. Условные обозначения логических схем.

Таблица 11.8. Сводные таблицы истинности логических схем

Входы		Выходы					
A	B	И	ИЛИ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ	Искл. ИЛИ	Искл. ИЛИ-НЕ
0	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	1

Комбинированные логические схемы

В цифровых системах для получения требуемых характеристик обычно применяются комбинации логических элементов. Например, последовательное включение логических элементов И и НЕ позволяет получить функцию И-НЕ (рис. 11.13(а)). Таким же образом можно получить логическую функцию ИЛИ-НЕ, объединив элементы ИЛИ и НЕ (рис. 11.13(б)).

В качестве поясняющего примера рассмотрим логическую схему на рис. 11.14. На вход схемы подается сигнал 0111. Нужно определить сигнал на выходе.

Решение. На выходе схемы ИЛИ (i) присутствует 1, а на выходе схемы И-НЕ (ii) — 0. Следовательно, на входы схемы ИЛИ (iii) подается комбинация 10 и на ее выходе G действует логическая 1.

На рис. 11.15 изображена комбинация простых логических элементов для управления сигнализацией. Схема G_1 является элементом ИЛИ-НЕ, у которого объединены входы. В результате G_1 действует как инвертор НЕ. Чтобы сработала сигнализация, на звонок должно быть подано положительное напряжение от источника питания, т. е. на выходе элемента И (схема G_2) должна действовать 1. Для этого на оба входа элемента И должны быть поданы 1. Такое может случиться, если ключ S_1 разомкнут, а ключ S_2 замкнут. Другой комбинации, при которой может сработать сигнализация, нет.

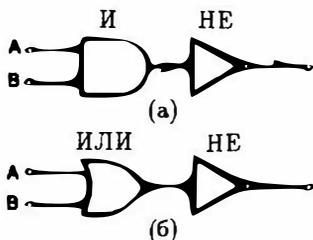


Рис. 11.13.

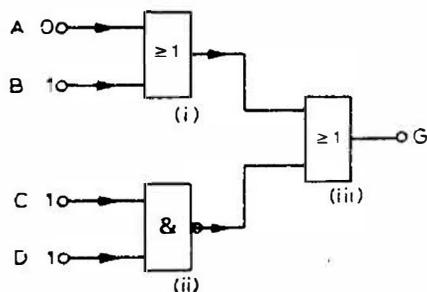


Рис. 11.14.

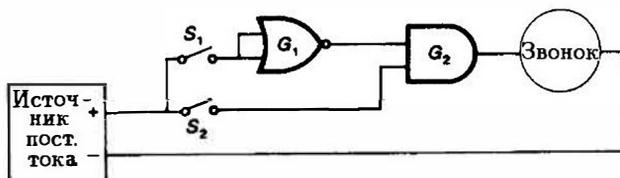


Рис. 11.15.

Двоичная система счисления

Если в десятичной системе счисления используется десять цифр, то в двоичной их всего две: нуль и единица (0 и 1). Эта система идеально подходит для логических схем и имеет дело именно с ними.

В десятичной системе первый столбец А (табл. 11.9) является столбцом единиц, столбец В — столбцом десятков, С — сотен, D — тысяч и т. д. В двоичной системе каждый столбец может быть представлен либо 0, либо 1. При этом первый столбец А соответствует единицам, В — двойкам, С — четверкам, D — восьмеркам и т. д. Любое число может быть представлено как в десятичной системе, так и в двоичной системе. В табл. 11.10 показано преобразование десятичных чисел от 0 до 7 в двоичные.

Таблица 11.9

Десятичные столбцы				Двоичные столбцы			
D 10^3	C 10^2	B 10^1	A 10^0	D 2^3	C 2^2	B 2^1	A 2^0
Тысячи	Сотни	Десятки	Единицы	Восьмерки	Четверки	Двойки	Единицы

Таблица 11.10

Десятичные числа	Двоичные числа		
	C	B	A
	(4)	(2)	(1)
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

Для чисел, больших 7, нужен четвертый столбец (восьмерки). Так, $8 = 1000$, $9 = 1001$, $10 = 1010$, $11 = 1011$ и т. д.

В табл. 11.11 приведено несколько примеров преобразования двоичных чисел в десятичные.

Таблица 11.11

Двоичные числа	Двоичные столбцы						Десятичные числа
	32	16	8	4	2	1	
1110	—	—	1	1	1	0	$= 8 + 4 + 2 = 14$
1011	—	—	1	0	1	1	$= 8 + 2 + 1 = 11$
11001	—	1	1	0	0	1	$= 16 + 8 + 1 = 25$
10111	—	1	0	1	1	1	$= 16 + 4 + 2 + 1 = 23$
110010	1	1	0	0	1	0	$= 32 + 16 + 2 = 50$

Счетчик частоты

Логический элемент И в соединении со счетчиком может применяться для измерения частоты или периода. На рис. 11.16 показана схема измерителя частоты, состоящая из логического элемента И с двумя входами и счетчика. На вход А подается входной сигнал, а на вход В — тактовые импульсы заданной длительности. Сигнальные импульсы будут появляться на выходе схемы И только во время действия тактового импульса. Затем эти импульсы поступают на счетчик, который считает их и таким образом определяет частоту входного сигнала. Например, если длительность тактового импульса равна 10 мс, а длительность входного сигнала при его частоте 1 кГц составляет 1 мс, то за время действия тактового импульса на выходе схемы появятся только 10 импульсов, которые, будучи посчитаны счетчиком, дадут частоту 1 кГц.

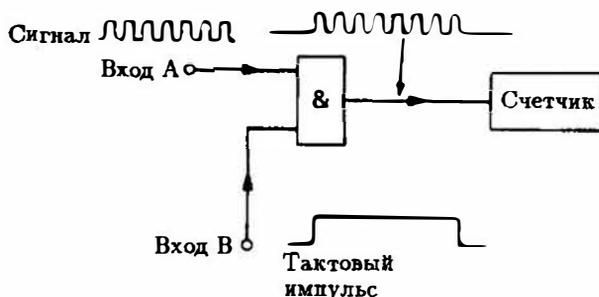


Рис. 11.16. Схема И в качестве измерителя частоты.

Цифровой датчик времени (цифровые часы) (рис. 11.17)

Импульсы от кварцевого генератора, имеющего очень высокую стабильность частоты, подаются на цепочку делителей частоты, которая генери-



Рис. 11.17. Блок-схема цифрового датчика времени.

рует точную последовательность тактовых импульсов. Декодер преобразует тактовые импульсы делителя в соответствующие сигналы, которые поступают на индикатор (см. также гл. 35). Секундный индикатор работает с самой высокой частотой, а часовой — с самой низкой.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

АЦП преобразует входной аналоговый сигнал в цифровой (рис. 11.18). Выходной сигнал представляет собой некоторое число параллельных цифровых разрядов (четыре на рис. 11.18). Каждый разряд — это двоичный столбец.

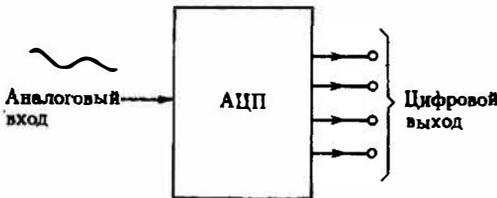


Рис. 11.18.

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)

На вход ЦАП поступает параллельный цифровой код. ЦАП преобразует его снова в величину напряжения (или ток), которая была представлена

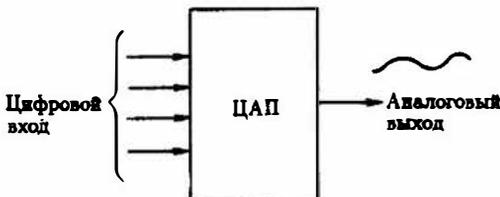


Рис. 11.19.

в виде двоичного входного сигнала. Если это проделать с последовательностью цифровых входных сигналов, то можно восстановить аналоговую форму исходного сигнала (рис. 11.19).

Цифровая обработка сигнала

Большинство сигналов, встречающихся в повседневной жизни, например звук и видео, существуют в аналоговой форме. Прежде чем ввести такие сигналы в цифровую систему, например в цифровой магнитофон, необходимо преобразовать их в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (рис. 11.20). После соответствующей обработки цифровой сигнал снова преобразуется в исходную аналоговую форму, т. е. в звуковой сигнал, с помощью цифро-аналогового преобразователя.



Рис. 11.20.

12

Микрокомпьютеры и другие системы

Компьютерные системы

На рис. 12.1 показана основная блок-схема компьютерной системы. «Мозгом» компьютера является микропроцессор (МП), который выполняет арифметические и логические операции и управляет всей системой в целом. Так, микропроцессор может выполнять арифметические операции сложения и умножения, логические операции И, ИЛИ, ИЛИ-НЕ и др., а также пересылать данные в соответствии с командами программы. Программа представляет собой последовательность инструкций, или команд, под действием которых операции выполняются последовательно шаг за шагом. Программы хранятся в блоке памяти. Кроме того, микропроцессор может хранить в памяти некоторые данные, которые потребуются позднее, например отсчеты температуры через заданные промежутки времени для более позднего анализа или цифры объема продаж какого-либо изделия для дальнейшего сравнения с другими изделиями. Как видно из рис. 12.1, связь между МП и памятью возможна в обоих направлениях. Такая связь называется *двунаправленной*.



Рис. 12.1.

Микропроцессор также управляет работой всей системы: синхронизирует работу всех блоков, активизирует нужный блок и направляет поток данных в системе.

Входные данные, например отсчеты температуры, объемы продаж и другая информация, которую нужно обработать с помощью определенной программы, вводятся в микропроцессор через устройства ввода данных, например термодатчик или клавиатуру. Результаты обработки микропроцессор выдает во внешний мир через устройства вывода данных, например принтер или блок визуального отображения (монитор).

Устройство сопряжения (интерфейс)

В большинстве случаев непосредственное соединение различных частей компьютерной системы невозможно. Причина может заключаться в несовместимости сигналов, необходимости их преобразования (например, аналоговой величины в цифровую) или согласования (усиления или ослабления). Для решения этой проблемы между блоками или между блоками и системой (рис. 12.2) устанавливают блоки сопряжения (интерфейсы). Интерфейсом может быть аналого-цифровой преобразователь, датчик, аттенуатор или простой адаптер (переходное устройство).

На рис. 12.3 приведена полная блок-схема компьютера с микропроцессором. Такой компьютер называют также микрокомпьютером. Как видим, в этой схеме присутствуют четыре устройства сопряжения. Связь

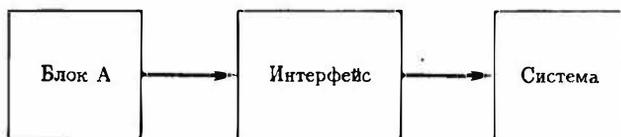


Рис. 12.2.

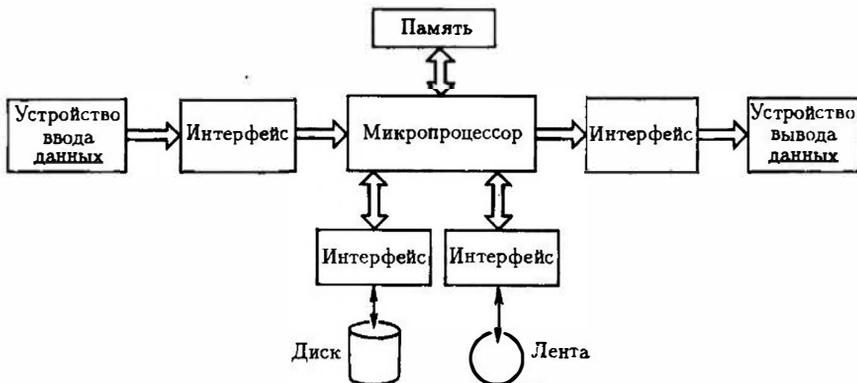


Рис. 12.3.

между микропроцессором и другими устройствами осуществляется по многочисленным параллельно уложенным проводящим дорожкам. По этим дорожкам (линиям) передается цифровая информация в виде двоичных чисел. Число линий может равняться 8, 16 или 32. Линии объединяются в шины. В большинстве микрокомпьютерных систем в дополнение к основной памяти имеется внешнее запоминающее устройство (ЗУ). Во внешнее ЗУ загружаются различные программы и данные, которые будут обрабатываться или уже обработаны микропроцессором. Таким образом, связь между микропроцессором и внешним ЗУ тоже двунаправленная. ЗУ записывает информацию на магнитные ленты (стример) или диски.

Схема фазовой автоматической подстройки частоты

Во многих применениях необходима фазовая автоматическая подстройка частоты (ФАПЧ) сигналов. ФАПЧ заключается в выработке сигнала, который имеет ту же фазу и, следовательно, ту же частоту, что и опорный сигнал. На рис. 12.4 изображена блок-схема устройства ФАПЧ.



Рис. 12.4.

Основными элементами схемы ФАПЧ являются фазовый дискриминатор (ФД) и генератор, управляемый напряжением (ГУН). ФД имеет два входа и один выход напряжения постоянного тока. Величина этого напряжения определяется разностью фаз двух сигналов, поступающих на входы фазового дискриминатора. ГУН вырабатывает синусоидальный сигнал, частота которого зависит от уровня постоянного напряжения на его входе.

Обратимся к схеме на рис. 12.4. Выходной сигнал ГУН по цепи обратной связи подается на вход В фазового дискриминатора. Величина постоянного напряжения на выходе ФД зависит от того, насколько фаза сигнала В отличается от фазы опорного сигнала А. Выходной сигнал ФД усиливается усилителем постоянного тока, а затем поступает на вход ГУН и регулирует частоту его выходного сигнала.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока сигнал В, подаваемый по цепи обратной связи, и опорный сигнал А не совпадут по фазе. Высококачественные составляющие, присутствующие в выходном сигнале ФД, удаляются фильтром нижних частот (рис. 12.5). Буферный каскад, введенный



Рис. 12.5.

в схему, предохраняет ГУН от перегрузки фазовым дискриминатором и нагрузкой, подключаемой к выходу схемы.

Схему ФАПЧ можно применять в качестве генератора колебаний с фиксированной частотой, например, в стереофонических декодерах и делителях частоты. Она может также работать в синтезаторах частоты и в измерителях частоты контролируемых процессов.

Система автоматического управления скоростью вращения двигателя

На рис. 12.6 изображена блок-схема системы управления скоростью вращения двигателя. Назначение этой системы — устанавливать и поддерживать постоянную скорость вращения двигателя постоянного тока. Требуемая скорость вращения двигателя задается блоком установки скорости. Двигатель управляется усилителем мощности постоянного тока. На валу двигателя насажен генератор постоянного тока, величина выходного напряжения которого зависит от скорости вращения двигателя. Выходное напряжение генератора по цепи обратной связи подается на один из входов дифференциального усилителя. На второй вход подается напряжение от блока установки скорости. Дифференциальный усилитель сравнивает эти два напряжения, и на его выходе появляется сигнал, пропорциональный разности напряжений на входе. Предположим, что двигатель по какой-то причине начал вращаться быстрее, чем это было задано. В результате выходное напряжение генератора возрастает, а разность между этим напряжением и напряжением, подаваемым от блока установки скорости, на входе дифференциального усилителя уменьшается. При этом уменьшается выходное напряжение усилителя мощности, и, как следствие, скорость вращения двигателя возвращается к заданному значению. При снижении скорости вращения двигателя ниже заданного значения происходит обратный процесс.



Рис. 12.6.

Магнитофон

В магнитофоне звуковая (аудио) информация преобразуется в изменяющееся магнитное поле в узком зазоре головки записи. Это поле преобразуется в картину силовых линий на магнитной ленте, проходящей вдоль зазора с постоянной скоростью. При воспроизведении картина силовых линий магнитного поля на ленте снова преобразуется в изменяющееся магнитное поле и затем в аудиосигнал. Головка записи может быть использована и для воспроизведения.

Непосредственное намагничивание ленты вносит нелинейность. Чтобы избавиться от нее, аудиосигнал накладывается на высокочастотный сигнал, имеющий частоту 30–100 кГц и называемый высокочастотным (ВЧ) смещением. ВЧ-смещение используется также для стирания записи. Стирающая головка размещается перед головкой записи и включается только тогда, когда магнитофон работает в режиме записи.



Рис. 12.7.

На рис. 12.7 представлена блок-схема магнитофона. При переключении в режим воспроизведения головка воспроизведения преобразует магнитную информацию на ленте в аудиосигнал. Этот сигнал последовательно проходит через предварительный усилитель, выходной каскад усилителя мощности и затем подается на громкоговоритель. В режиме записи работают обе головки — записи и стирающая. Аудиоинформация, поступающая от микрофона, усиливается и затем подается на преобразователь (головка записи), который превращает ее в изменяющееся магнитное поле. Стирающая головка гарантирует, что лента очищена от всякой магнитной информации (прежде чем будут записаны новые сигналы).

13

СВЯЗЬ

Следующие четыре главы посвящены описанию различных методов связи, или, другими словами, передачи информации. Передача информации между двумя субъектами (лицами или пунктами) может принимать самые различные формы. Самой распространенной из них является обычная прямая речь, когда звуковые волны передаются непосредственно по воздуху. Флажки, лампы и дымовые сигналы — это визуальные методы связи, которые имеют больший радиус действия, чем звуковые волны. Во всех этих случаях информация передается только тогда, когда имеет место изменение передаваемой количественной характеристики сигнала. Так, например, свет электрической лампы, имеющей неизменяющуюся яркость свечения, не несет никакой информации. И только если свет прерывается согласно какому-то коду, информация передается.

Описанные системы связи ограничены в своем радиусе действия и зависят от состояния атмосферы. Звуковые волны могут распространяться на несколько сотен метров, но находятся в сильной зависимости от направления и силы ветра. Сигналы, передаваемые лампой, зависят от прозрачности воздуха.

Электрическая связь

Применение электричества как средства связи позволило преодолеть многие из перечисленных трудностей. В электрической связи для передачи информации из одной точки пространства в другую используются различные электрические колебания. Связь может осуществляться по проводам (проводная связь) или без проводов (радиосвязь).

Преобразователи

В любой системе электрической связи подлежащая передаче информация, например речь, музыка или данные, сначала должна быть преобразована в изменения тока или напряжения. На приемном конце электрический сигнал необходимо снова преобразовать в исходную информацию. Так, микрофон превращает звуковые волны в электрический сигнал, а на приемном конце электрический сигнал снова преобразуется в звуковые колебания с помощью громкоговорителя. Устройства типа микрофона и громкоговорителя называются преобразователями.

Так же, как и в неэлектрических системах связи, поток информации не может быть передан неизменяющимся током (или напряжением) или непрерывным тональным сигналом постоянной амплитуды или частоты. Информация только тогда может быть передана из одной точки пространства в другую, когда на неизменяющийся ток или тональный сигнал оказывается какое-либо воздействие (модуляция). В настоящее время изобретено уже довольно много методов модуляции.

Ширина полосы пропускания

На рис. 13.1 изображена простейшая система электрической связи.

Она состоит из батареи и ключа или переключателя на передающем конце и электрической лампы на приемном. Передающая и приемная части системы соединены линией передачи. Вот простейший код этой системы:

Ключ замкнут (лампа горит) соответствует «Да».
 Ключ разомкнут (лампа не горит) соответствует «Нет».

Если эта информация передается каждую секунду, то лампа будет переходить из состояния «Да» в состояние «Нет» каждую секунду. Форма сигнала, передаваемого по линии, показана на рис. 13.2(а). Частота передачи в данном случае равна 1 Гц.

Если увеличить частоту передачи информации («Вкл.» и «Выкл.» или «Да» и «Нет») до 10 раз в секунду, то передаваемый сигнал будет совершать 10 полных циклов за секунду (рис. 13.2(б)) и частота его будет



Рис. 13.1. Простейшая система электрической связи.

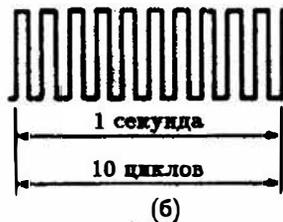
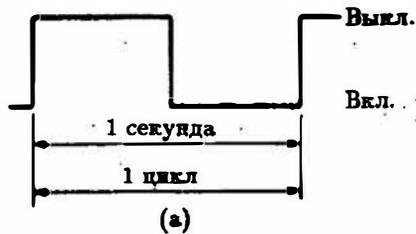


Рис. 13.2.

равна 10 Гц. Если информация может изменяться от 1 до 10 раз («Да» и «Нет») в секунду, то частота ее передачи должна изменяться от 1 до 10 Гц. Тогда система передачи применительно к этому случаю должна иметь частотный диапазон в интервале от 1 до 10 Гц. Этот интервал называется шириной полосы передачи системы.

Итак, ширина полосы частот зависит от количества (объема) и скорости изменения информации. Для передачи большего объема информации необходима большая ширина полосы. Поэтому система с заданной шириной полосы частот может обрабатывать только тот объем информации, который соответствует ее ширине полосы. В нашем примере, если ширина полосы ограничена частотой 10 Гц, то количество информации, которое может быть передано, ограничено десятью «Да» и десятью «Нет».

В реальных системах из соображений снижения затрат ширину полосы ограничивают значением, при котором информация передается еще без искажения. Например, канал, имеющий ширину полосы 300 Гц, будет занимать столько же места в эфире (пространство частот); сколько занимают три канала, имеющие ширину полосы по 100 Гц. Следовательно, система с более узкой полосой более экономична.

Телефонная связь

В основу телефонной связи положен принцип наложения сигнала звуковой частоты на неизменяющееся напряжение. На рис. 13.3 изображена простая блок-схема телефонной системы.

Звуковые волны в микрофоне преобразуются в электрические колебания. Телефонная линия находится под постоянным напряжением 50 В. На это напряжение накладывается напряжение переменного тока, вырабатываемое микрофоном (нижний рисунок). Промежуточные усилители, или повторители, восстанавливают форму телефонного сигнала, искаженного или ослабленного влиянием сопротивления телефонной линии. В зависимости от протяженности линии устанавливается один или более

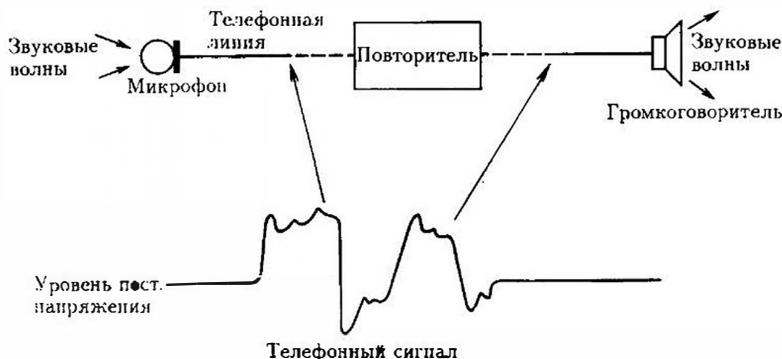


Рис. 13.3. Блок-схема телефонной системы.

промежуточных усилителей. На приемном конце звуковой сигнал восстанавливается с помощью громкоговорителя.

Телефонные системы имеют ширину полосы в диапазоне от 300 до 3400 Гц, т. е. 3,1 кГц. Это составляет лишь малую долю от полного диапазона звуковых частот 20 — 20 000 Гц и является одной из причин плохого качества звука, который мы слышим при разговоре по телефону. Однако для получения удовлетворительной разборчивости речи этого достаточно.

Телеграфная связь

На рис. 13.4 дана упрощенная блок-схема телеграфной системы. При замыкании и размыкании ключа на передатчике по линии связи передаются последовательности импульсов, под действием которых срабатывает реле на приемном конце.

Реле может управлять переключателем или лампой. Передаваемые сигналы представляют собой последовательность чередующихся импульсов (меток) и пауз между ними. Каждой букве алфавита соответствует свой набор меток и пауз согласно выбранному коду (например, коду Морзе).

Телеграфные системы связи являются сравнительно медленными и дешевыми: ширина полосы не более 120 Гц, следовательно, в одном телефонном канале можно разместить 25 телеграфных каналов:

$$\frac{\text{Ширина полосы телефонной системы}}{\text{Ширина полосы телеграфной системы}} = 3000/120 = 25.$$

Для отделения одного канала от другого требуется система фильтров.

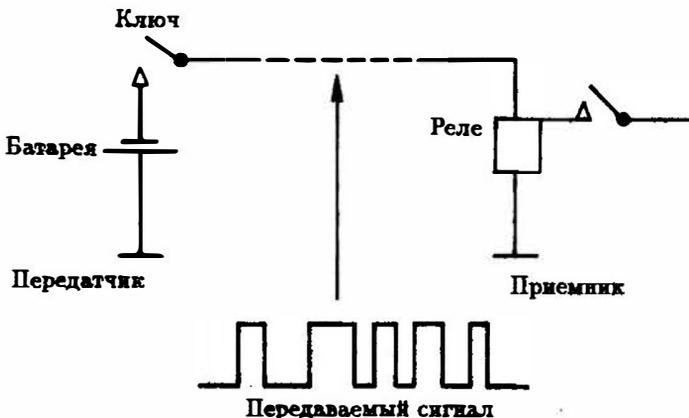


Рис. 13.4. Упрощенная блок-схема телеграфной системы.

Модуляция

Информация может быть передана из точки А в точку В путем изменения формы сигнала переменного тока. Для этого подлежащую передаче информацию представляют в виде сигнала и с помощью этого сигнала изменяют какую-либо характеристику сигнала высокой частоты. Таким образом, информационный сигнал оказывается заключенным в высокочастотный сигнал. Этот процесс называется *модуляцией*.

Высокочастотный сигнал называется *несущей*, а после модуляции — *модулированной несущей*. При применении модуляции информационный сигнал не передается непосредственно, а «переносится» с помощью несущей.

Демодуляция

На приемном конце информационный сигнал выделяют из модулированной несущей, чтобы восстановить исходный сигнал. Этот процесс называется *демодуляцией*, или детектированием.

Виды модуляции

Все известные виды модуляции объединяются в группы в зависимости от того, какую характеристику несущей изменяет информационный сигнал. Например, если в соответствии с сигналом изменяется амплитуда несущей, то такая модуляция называется амплитудной. Если же сигнал воздействует на частоту несущей, то модуляция называется частотной, и т. д. Подробнее различные виды модуляции будут рассмотрены в следующих главах.

Радиосвязь

Радиосвязью называется беспроводная передача сигнала с помощью электромагнитных волн, которые распространяются в пространстве со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, т. е. со скоростью света.

На рис. 13.5 представлен частотный спектр электромагнитных волн. Видимый свет, к которому чувствителен глаз человека, занимает лишь узкую полосу в этом спектре. Подобно тому, как ухо воспринимает звуковые волны, так глаз воспринимает полосу электромагнитных волн, называемых световыми волнами. Вся гамма цветов, воспринимаемая человеком, создается различными частотами, лежащими в диапазоне световых волн.

Частоты, лежащие ниже 300 000 МГц, называются радиочастотами и используются в качестве несущих в радиосвязи. Весь спектр радиоволн разделен на диапазоны, или полосы, как показано в таблице и на рис. 13.5. При беспроводной или радиосвязи для передачи (излучения) и приема модулированных радиоволн применяются антенны.

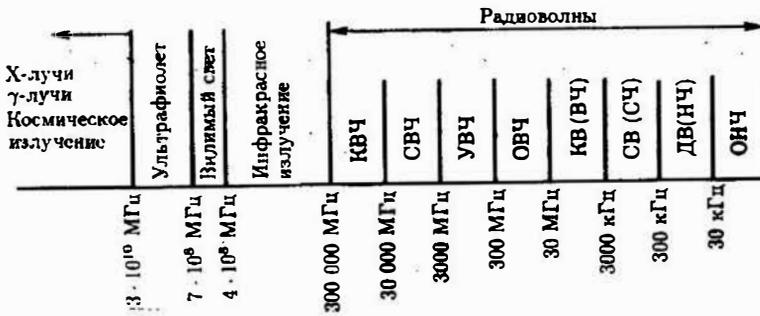


Рис. 13.5. Частотный спектр электромагнитных волн.

ОНЧ (VLF) (очень низкие частоты)		Ниже 30 кГц
НЧ (LF) (низкие частоты)	ДВ (LW) (длинные волны)	30–300 кГц
СЧ (MF) (средние частоты)	СВ (MW) (средние волны)	300–3000 кГц
ВЧ (HF) (высокие частоты)	КВ (SW) (короткие волны)	3000–30 000 кГц
ОВЧ (VHF) (очень высокие частоты)		30–300 МГц
УВЧ (UHF) (ультравысокие частоты)		300–3000 МГц
СВЧ (SHF) (сверхвысокие частоты)		3000–30 000 МГц
КВЧ (EHF) (крайне высокие частоты)		30 000–300 000 МГц

Амплитудная модуляция

Амплитудная модуляция (АМ) — наиболее распространенный тип модуляции. В системе с АМ амплитуда несущей изменяется в соответствии с изменением сигнала или информации (рис. 14.1). В отсутствие сигнала амплитуда несущей имеет постоянный уровень, как показано на рис. 14.1(б). При модуляции синусоидальным сигналом амплитуда несущей увеличивается или уменьшается относительно своего немодулированного уровня по синусоидальному закону в соответствии с нарастанием или спаданием модулирующего сигнала. Чем больше амплитуда модулирующего сигнала, тем сильнее изменяется амплитуда несущей. Амплитудно-модулированная несущая (рис. 14.1(в)) имеет огибающую, в точности повторяющую форму модулирующего сигнала, и при демодуляции именно эта огибающая выделяется как полезный сигнал.

Глубина модуляции

Отношение амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде несущей называется глубиной или коэффициентом модуляции. Она определяет меру изменения уровня несущей при модуляции. Глубина модуляции всегда выражается в процентах, и поэтому о ней говорят как о «процентной» модуляции.

$$\text{Глубина модуляции} = \frac{\text{Амплитуда сигнала}}{\text{Амплитуда несущей}} \cdot 100\%$$

(см. рис. 14.1). Например, если амплитуда сигнала равна 1 В, а амплитуда несущей — 2 В, то глубина модуляции составляет $(1 \text{ В}) / (2 \text{ В}) \cdot 100\% = 50\%$. Такую глубину модуляции имеет АМ-несущая, показанная на рис. 14.1.

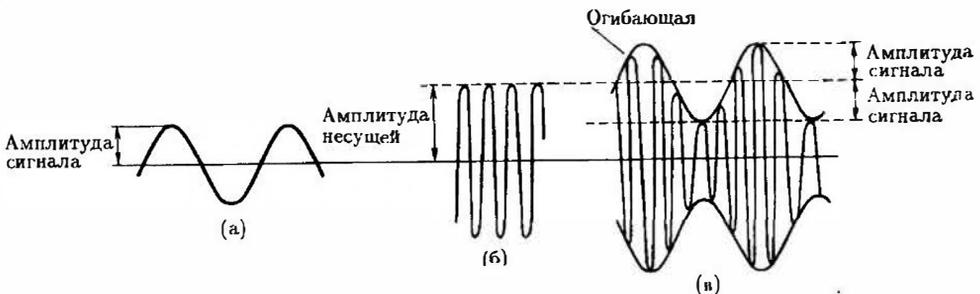


Рис. 14.1. Амплитудная модуляция (глубина модуляции 50%): (а) сигнал; (б) несущая; (в) модулированная несущая.

Перемодуляция

На рис. 14.2(а) показана АМ-несущая со 100%-ной глубиной модуляции. Глубина модуляции, превышающая 100%, приводит к искажениям (рис. 14.2(б)). По этой причине глубину модуляции ограничивают. Например, при передачах радиостанции Би-би-си она ограничена величиной 80%.

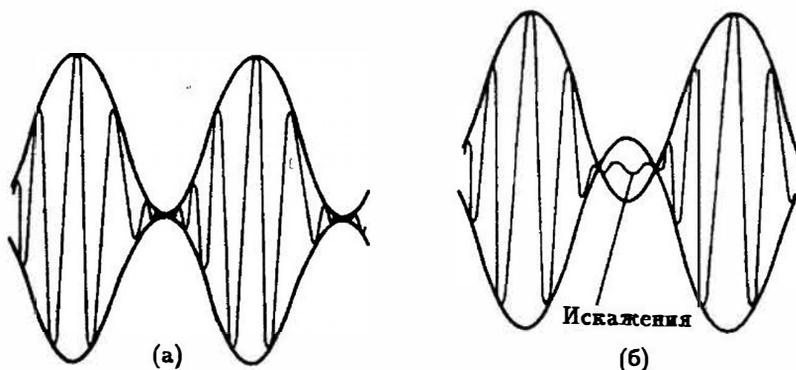


Рис. 14.2. (а) Модуляция 100%; (б) перемодуляция.

Боковые частоты

Можно показать, что амплитудно-модулированная несущая состоит из трех гармонических (синусоидальных) компонент с постоянными амплитудами и разными частотами. Этими тремя компонентами являются: сама несущая и два сигнала боковых частот f_1 и f_2 . Каждый модулирующий гармонический сигнал порождает две боковые частоты. Пусть f_s — частота модулирующего сигнала и f_c — частота несущей, тогда

$$f_1 = f_c - f_s, \quad f_2 = f_c + f_s,$$

где f_1 и f_2 — так называемые нижняя боковая и верхняя боковая частоты соответственно. Например, если частота несущей равна 100 кГц, а частота сигнала — 1 кГц, то

$$\text{Нижняя боковая частота } f_1 = 100 - 1 = 99 \text{ кГц,}$$

$$\text{Верхняя боковая частота } f_2 = 100 + 1 = 101 \text{ кГц.}$$

Амплитудно-модулированная несущая, т. е. несущая вместе с двумя сигналами боковых частот, может быть представлена в виде трех вертикальных стрелок, каждая из которых соответствует одному гармоническому сигналу (рис. 14.3). То, что изображено на этом рисунке, называется частотным спектром сигнала (в данном случае частотным спектром АМ-несущей).

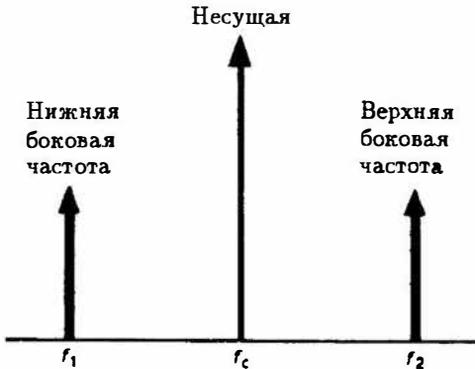


Рис. 14.3. Частотный спектр АМ-несущей.

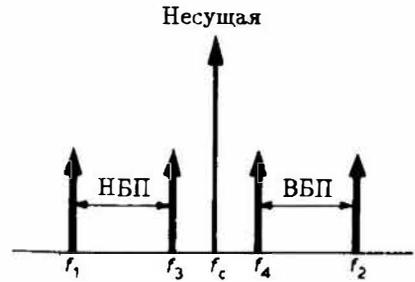


Рис. 14.4. Боковые полосы.

Боковые полосы

Информационные сигналы почти всегда имеют сложную форму и состоят из большого числа гармонических сигналов. Поскольку каждый гармонический сигнал порождает пару боковых частот, то сложный негармонический сигнал будет порождать многочисленные боковые частоты, что приведет к образованию двух полос частот по обе стороны от несущей (рис. 14.4). Это так называемые боковые полосы частот. Область частот между наибольшей верхней боковой частотой f_2 и наименьшей верхней боковой частотой f_4 называют верхней боковой полосой (ВБП). Аналогично область частот между наибольшей нижней боковой частотой f_3 и наименьшей нижней боковой частотой f_1 называют нижней боковой полосой (НБП).

Эти две боковые полосы расположены симметрично относительно несущей, и каждая из них содержит одну и ту же информацию. Несущая не несет никакой информации. Всю информацию несут боковые частоты.

При модуляции одиночным гармоническим сигналом принимается, что верхняя и нижняя боковые полосы простираются от несущей до верхней и нижней боковых частот соответственно (рис. 14.5).

Пример 1

Несущая с частотой 100 кГц промодулирована по амплитуде сигналом, занимающим полосу частот 400–3400 Гц. Определите ширину боковых полос.

Решение

Частота 3400 Гц, самая высокая в спектре сигнала, порождает две боковые частоты (рис. 14.6):

$$f_1 = 100\,000 - 3400 = 96\,600 \text{ Гц,}$$

$$f_2 = 100\,000 + 3400 = 103\,400 \text{ Гц.}$$

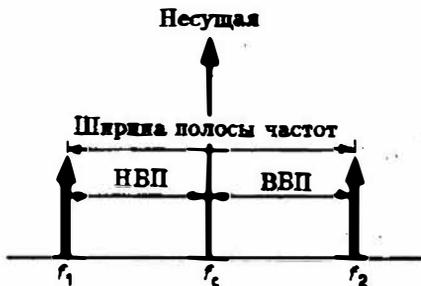


Рис. 14.5. Боковые полосы и ширина полосы частот, занимаемой несущей при ее модуляции одиночным гармоническим сигналом.

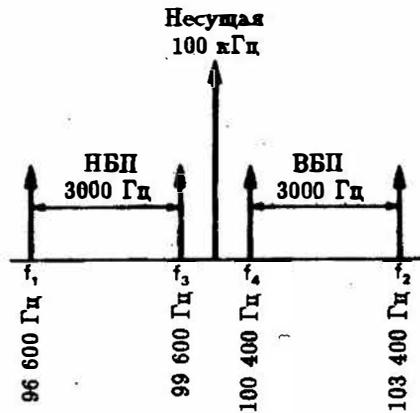


Рис. 14.6.

Частота 400 Гц, самая низкая в спектре сигнала, порождает еще две боковые частоты:

$$f_3 = 100\,000 - 400 = 99\,600 \text{ Гц,}$$

$$f_4 = 100\,000 + 400 = 100\,400 \text{ Гц.}$$

Ширина верхней боковой полосы (ВБП): $f_2 - f_4 = 103\,400 - 100\,400 = 3000 \text{ Гц.}$

Ширина нижней боковой полосы (НБП): $f_3 - f_1 = 99\,600 - 96\,600 = 3000 \text{ Гц.}$

Другими словами, обе боковые полосы имеют одну и ту же ширину, равную разности значений наивысшей и наименьшей частот в спектре модулирующего сигнала: $8400 - 400 = 3000 \text{ Гц.}$

Боковые частоты для любой другой частоты в спектре сигнала будут находиться внутри верхней и нижней боковых полос.

Ширина полосы частот

Так как информацию несут только боковые частоты, то для качественной передачи этой информации ширина полосы частот, занимаемой в эфире АМ-системой, должна быть достаточно велика, чтобы вместить все имеющиеся боковые частоты. При модуляции гармоническим сигналом возникают две боковые частоты. Таким образом, полоса частот простирается от нижней боковой частоты f_1 до верхней боковой частоты f_2 (как показано на рис. 14.5).

Например, если модулирующий гармонический сигнал имеет частоту 1 кГц, то ВБП = НБП = 1 кГц и ширина полосы составит

$$\text{НБП} + \text{ВБП} = 2 \cdot 1 \text{ кГц} = 2 \text{ кГц.}$$

Другими словами, в данном случае ширина полосы частот, занимаемой амплитудно-модулированной несущей, равна удвоенной частоте модулирующего сигнала.

В случае передачи сложного сигнала ширина полосы частот, занимаемой АМ-системой передачи информации, равна удвоенной наивысшей частоте в спектре модулирующего сигнала и, таким образом, включает в себя все боковые частоты.

Одно- и двухполосная передача

Поскольку одна боковая полоса содержит столько же информации, сколько и другая, передачу можно осуществлять с использованием только одной боковой полосы, и при этом не будет никакой потери информации. При однополосной передаче (SSB — по связной терминологии) одна из боковых полос — или нижняя, или верхняя — подавляется и передается только одна оставшаяся боковая полоса. При двухполосной (DSB) передаче передаются обе боковые полосы.

Однополосная передача занимает лишь половину той полосы частот, которая используется при двухполосной передаче, и по этой причине она применяется в телефонии и радиосвязи. При однополосной передаче в заданном диапазоне частот несущей можно расположить вдвое большее число информационных каналов, чем при двухполосной передаче. В силу простоты двухполосная передача используется всеми радиовещательными системами с АМ. Поэтому, когда речь идет о связи с использованием АМ, обычно имеется в виду двухполосная передача, если не оговорено обратное.

Пример 2

Несущая промодулирована по амплитуде периодическим сигналом в виде меандра с частотой 100 Гц. Пренебрегая гармониками выше пятой, установите ширину полосы частот, необходимую а) для DSB (двухполосной)-передачи и б) для SSB (однополосной)-передачи.

Решение

Сигнал в виде меандра с частотой 100 Гц содержит следующие гармоники:

$$\text{основную гармонику} = 100 \text{ Гц,}$$

$$\text{гармонику 3-го порядка} = 3 \cdot 100 = 300 \text{ Гц,}$$

$$\text{гармонику 5-го порядка} = 5 \cdot 100 = 500 \text{ Гц.}$$

Гармониками более высокого порядка пренебрегаем. Таким образом, в обрезанном спектре модулирующего сигнала максимальная частота $f_{\text{макс}} = 500$ Гц.

$$\text{Ширина полосы для DSB-передачи} = 2 \cdot f_{\text{макс}} = 2 \cdot 500 = 1000 \text{ Гц.}$$

$$\text{Ширина полосы для SSB-передачи} = \text{DSB}/2 = 1000/2 = 500 \text{ Гц.}$$

АМ-радиопередатчик

В АМ-радиопередатчике звуковые волны сначала преобразуются в электрический сигнал (модулирующий сигнал звуковой частоты) с помощью микрофона (рис. 14.7). Этот сигнал усиливается в УЗЧ (каскад 1) перед подачей в АМ-модулятор (каскад 2). Сигнал несущей вырабатывается генератором радиочастоты (РЧ, каскад 5), усиливается в усилителе радиочастоты (УРЧ, каскад 6), настроенном на определенную частоту несущей, и подается в АМ-модулятор. Несущая, промодулированная по амплитуде, усиливается затем каскадом 3 и подается на выходной усилитель мощности РЧ (каскад 4). Этот выходной каскад передает мощность РЧ (т. е. мощность несущей) в антенну. Ширину полосы частот, излучаемых АМ-радиопередатчиком при двухполосной передаче, ограничивают величиной 9 кГц.

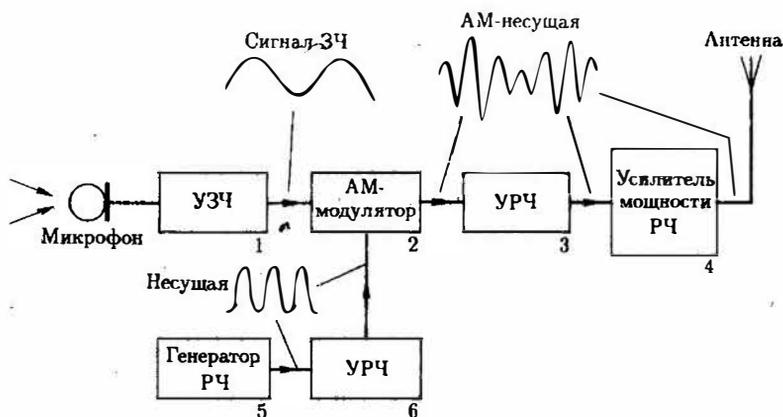


Рис. 14.7. Блок-схема АМ-радиопередатчика.

АМ-радиоприемник

Радиоприемник должен работать в диапазоне частот несущей (например, в диапазоне средних и длинных волн) и воспроизводить выходной сигнал звуковой частоты (ЗЧ), в точности соответствующий исходному модулирующему сигналу. Приемник должен обеспечивать выбор требуемой частоты несущей (т. е. желаемой радиостанции) с одновременной отстройкой от всех других частот.

Радиоприемник прямого усиления

На рис. 14.8 показана блок-схема радиоприемника прямого усиления. Каскады 1 и 2 — это два одинаковых УРЧ с одноручечной настройкой (согласованно перестраиваемые УРЧ). Благодаря согласованной настройке

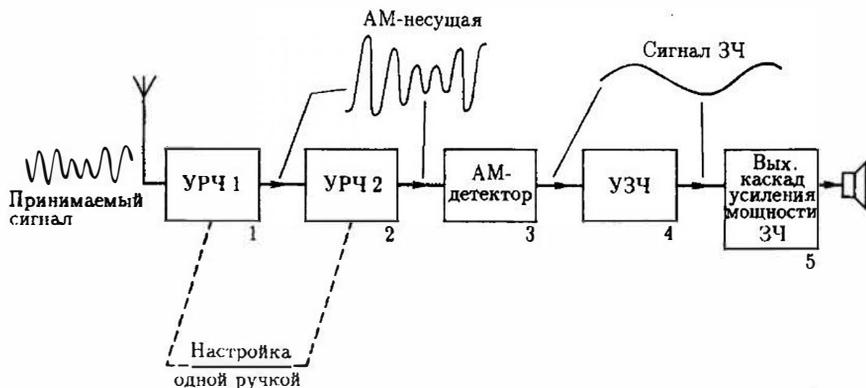


Рис. 14.8. Радиоприемник прямого усиления.

оба усилителя всегда настроены на одну и ту же частоту несущей. Вращая ручку настройки этих УРЧ, можно осуществлять выбор и усиление нужной частоты. Выбранная АМ-несущая затем демодулируется детектором, на выходе которого воспроизводится сигнал звуковой частоты. За детектором следуют усилитель напряжения звуковой частоты (каскад 4), выходной каскад усиления мощности и, наконец, громкоговоритель.

В настоящее время радиоприемники прямого усиления больше не выпускаются, так как они имеют ряд недостатков. Главный недостаток заключается в том, что каждый РЧ-каскад (каскад 1 и 2) должен допускать перестройку во всем диапазоне принимаемых частот, например от 600 до 1600 кГц в средневолновом диапазоне. Перестройка обоих РЧ-каскадов должна происходить одновременно, следовательно, нужна одноручечная настройка. При этом возникают серьезные проблемы с реализацией механической конструкции системы настройки приемника и обеспечением высокой избирательности усилителей.

Супергетеродинный радиоприемник

С целью преодоления недостатков радиоприемников прямого усиления был предложен супергетеродинный принцип приема. Выбранная блоком настройки частота несущей преобразуется с помощью преобразователя частоты к некоторой стандартизованной частоте, называемой *промежуточной частотой (ПЧ)*. Поэтому усилители радиочастоты в супергетеродинном приемнике настраиваются только на одну частоту — на промежуточную. В АМ-радиоприемниках в качестве ПЧ обычно используется частота 470 кГц¹⁾.

¹⁾ В отечественных радиоприемниках промежуточная частота равна 465 кГц. — Прим. ред.

Преобразование частоты

Преобразование частоты осуществляется с помощью смесителя и специального генератора — гетеродина (рис. 14.9). На смеситель подаются два отдельных РЧ-сигнала: сигнал с частотой принятой несущей f_c и сигнал гетеродина с частотой f_o . Смеситель вырабатывает четыре различные частоты: две исходные, f_c и f_o , а также их сумму $f_o + f_c$ и разность $f_o - f_c$. На выходе выбирается сигнал с разностной частотой, которая и является ПЧ. При любых перестройках гетеродина его частота всегда должна быть на 470 кГц выше частоты принимаемой несущей. Это достигается за счет сопряжения гетеродина с блоком настройки.

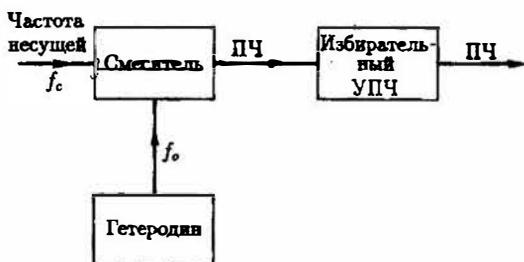


Рис. 14.9. Преобразование частоты в супергетеродинном приемнике.

Блок-схема супергетеродинного радиоприемника

Частота принимаемой несущей выделяется блоком настройки и затем преобразуется к промежуточной частоте смесителем (рис. 14.10). Каскады 4 и 5 представляют собой усилители радиочастоты, настроенные на промежуточную частоту 470 кГц (их называют усилителями ПЧ, или УПЧ). Модулированный сигнал промежуточной частоты обрабатывается АМ-детектором, который извлекает низкочастотную информацию и подает ее на блок обработки звукового сигнала и далее к громкоговорителю.

Ширина полосы частот в АМ-системе радиовещания

Ширина полосы частот АМ-системы радиовещания ограничена величиной 9 кГц. Чтобы избежать перекрытия сигналов соседних радиостанций, ширина каждой боковой полосы не должна превышать 4,5 кГц. Это и определяет максимальную частоту 4,5 кГц в спектре модулирующего звукового сигнала. Для охвата обеих боковых полос ширина полосы пропускания РЧ-каскада настройки и УПЧ должна составлять 9 кГц, тогда как усилитель звуковой частоты может иметь полосу пропускания шириной не более 4,5 кГц.

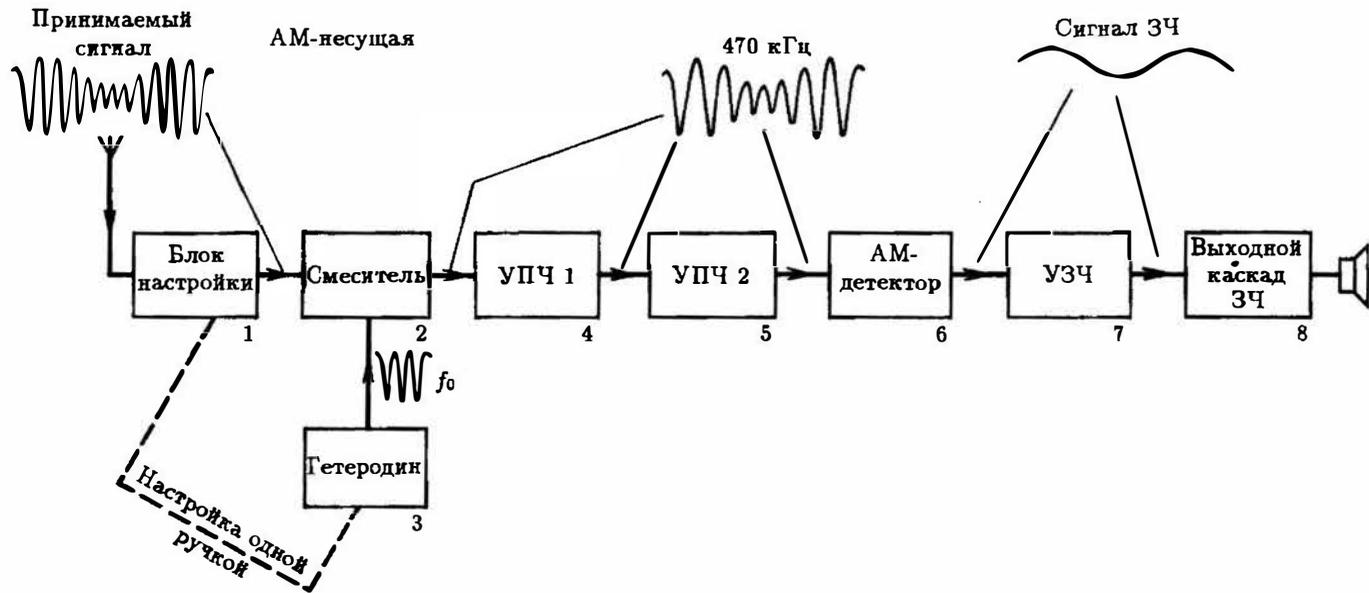


Рис. 14.10. Супергетеродинный радиоприемник.

Частотная модуляция

Другим распространенным типом модуляции, применяемым в радиосвязи, является частотная модуляция (ЧМ), при которой частота несущей изменяется в соответствии с модулирующим сигналом (рис. 15.1).

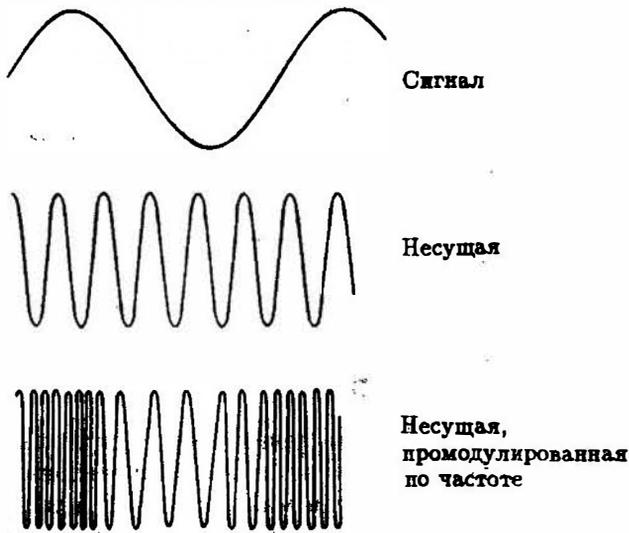


Рис. 15.1. Частотная модуляция. Обратите внимание, что амплитуда несущей остается постоянной, а частота изменяется.

Девияция частоты

Девияция частоты есть степень изменения частоты несущей при изменении уровня сигнала на 1 В. Девияция частоты измеряется в килогерцах на вольт (кГц/В). Предположим, например, что несущая с частотой 1000 кГц должна быть промодулирована сигналом в виде меандра с амплитудой 5 В (рис. 15.2). Предположим также, что девияция частоты равна 10 кГц/В. Тогда во временном интервале от А до В частота несущей увеличится на $5 \cdot 10 = 50$ кГц (произведение амплитуды сигнала на девияцию частоты) и станет равной $1000 \text{ кГц} + 50 \text{ кГц} = 1050 \text{ кГц}$. Во временном интервале от В до С частота несущей изменится на ту же величину, а именно на $5 \cdot 10 = 50$ кГц, но на этот раз в отрицательную сторону с уменьшением частоты несущей до $1000 - 50 = 950 \text{ кГц}$.

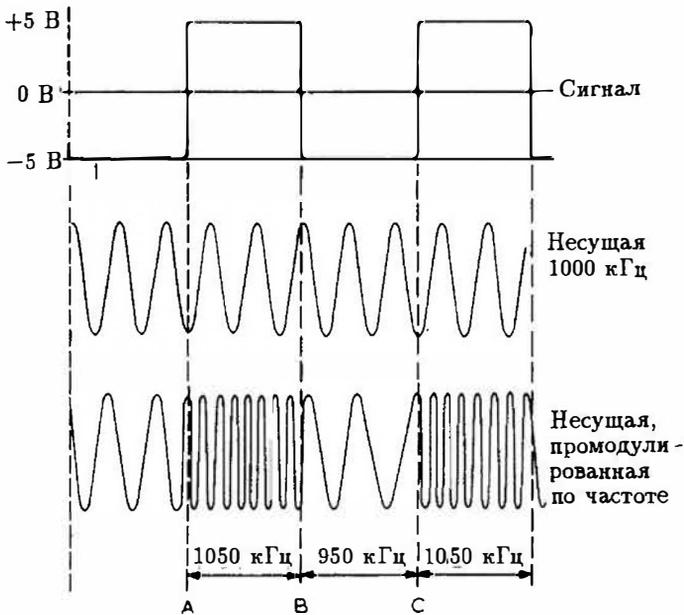


Рис. 15.2. Частотная модуляция несущей сигналом в виде меандра.

Максимальная девиация

Изменение частоты несущей при изменении уровня сигнала должно быть ограничено некоторой максимальной величиной, превышение которой недопустимо. Эта величина называется максимальной девиацией. Например, при ЧМ-передачах радиостанции Би-би-си используется девиация частоты 15 кГц/В и максимальная девиация 75 кГц. Максимальная величина модулирующего сигнала определяется максимальной допустимой девиацией.

$$\text{Максимальный сигнал} = \frac{\text{Максимальная девиация}}{\text{Девиация частоты}} = \frac{\pm 75}{15} = \pm 5 \text{ В}$$

или, другими словами, 5 В в положительную или отрицательную область.

Боковые частоты и ширина полосы

Если несущая промодулирована по частоте гармоническим сигналом, образуется неограниченное число боковых частот. Амплитуды боковых компонент постепенно уменьшаются по мере отдаления частоты этих компонент от частоты несущей.

Таким образом, для размещения всех боковых частот ширина полосы частот ЧМ-системы должна быть бесконечной. На практике малые по амплитуде боковые компоненты ЧМ-сигнала могут быть отброшены без

внесения каких-либо заметных искажений. Например, ЧМ-передачи радиостанции Би-би-си ведутся с использованием полосы частот шириной 250 кГц.

Сравнение АМ- и ЧМ-систем модуляции

	<i>Амплитудная модуляция</i>	<i>Частотная модуляция</i>
1. Амплитуда несущей	Изменяется вместе с сигналом	Остается постоянной
2. Боковые частоты	Две для каждой частоты в спектре сигнала	Бесконечное число
3. Ширина занимаемой полосы частот	9 кГц	250 кГц
4. Диапазон частот	ДВ, СВ, КВ	УКВ

Преимущества частотной модуляции

Радиовещание с использованием ЧМ имеет следующие преимущества по сравнению с АМ-передачей программ.

1. В системе с ЧМ обеспечивается лучшее качество звучания. Это связано с большой шириной полосы частот ЧМ-сигнала, охватывающей гораздо большее число гармоник.
2. При ЧМ-передаче достигается очень низкий уровень шума. Шум — это нежелательные сигналы, которые появляются на выходе обычно в форме изменения амплитуды несущей. В ЧМ-системе эти сигналы легко устраняются путем двустороннего ограничения амплитуды несущей. Информация, которую несет изменяющаяся частота, при этом полностью сохраняется.

ЧМ-передатчик

Передатчик частотно-модулированных сигналов (рис. 15.3) похож на АМ-передатчик, за исключением блока модуляции (каскад 3). Частотная модуляция осуществляется генератором радиочастоты, частота которого изменяется в соответствии с уровнем модулирующего сигнала звуковой частоты, поступающего от усилителя звуковой частоты (каскад 2).

ослабить как в АМ-, так и в ЧМ-приемниках, используя автоматическую регулировку усиления (АРУ).

АРУ осуществляется с помощью цепи обратной связи по постоянному току, как показано на рис. 15.5. Постоянная составляющая с выхода детектора подается обратно на вход первого УПЧ. Напряжение обратной связи управляет величиной коэффициента усиления этого УПЧ, уменьшая коэффициент усиления при увеличении амплитуды принимаемой несущей и увеличивая его при уменьшении этой амплитуды.

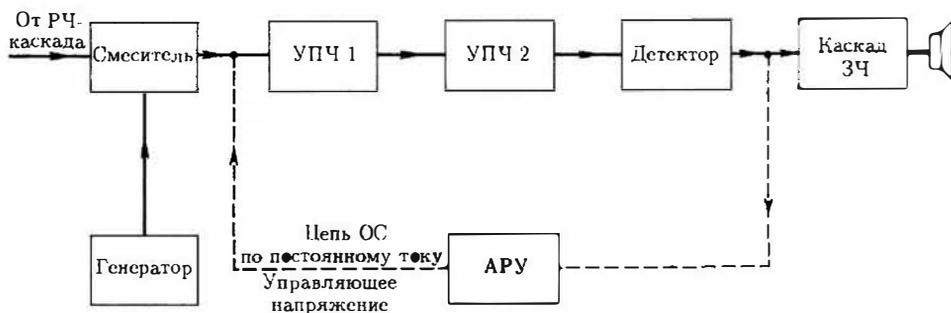


Рис. 15.5. Автоматическая регулировка усиления (АРУ).

Автоматическая подстройка частоты

Искажение выходного сигнала приемника может быть вызвано неточной настройкой. Для правильной настройки на выбранную станцию используется автоматическая подстройка частоты (АПЧ). Чаще всего АПЧ используется в ЧМ-приемниках. Система АПЧ, показанная на рис. 15.6, управляет частотой гетеродина с помощью дискриминатора (или компаратора). Дискриминатор преобразует отклонения от правильной промежуточной частоты в «управляющее напряжение», которое подстраивает частоту генератора.



Рис. 15.6. Система автоматической подстройки частоты (АПЧ).

Импульсная модуляция

В уже рассмотренных видах модуляции использовалась непрерывная несущая (аналоговый сигнал). Существует еще один вид модуляции, когда несущая представляет собой последовательность импульсов. В этом случае модулирующий сигнал воздействует на характеристики этих импульсов.

1. *Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)*, при которой амплитуда импульса изменяется в соответствии с сигналом (рис. 16.1(а)).
2. *Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)*, при которой ширина, или длительность, импульса изменяется в соответствии с сигналом (рис. 16.1(б)).
3. *Фазоимпульсная модуляция (ФИМ)*, при которой положение (фаза) импульса изменяется в соответствии с сигналом (рис. 16.1(в)).

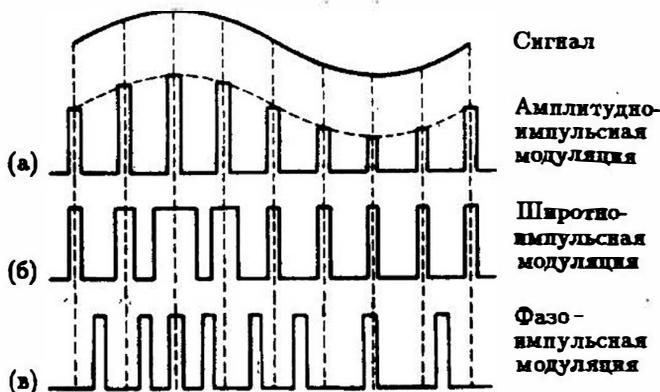


Рис. 16.1. Импульсная модуляция.

Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)

При амплитудно-импульсной модуляции модулирующий сигнал используется для изменения амплитуды импульсов. Частота повторения импульсов и их ширина остаются неизменными. Следовательно, для передачи информации вместо непосредственной передачи импульсов нужно передавать только изменение их амплитуды. Если амплитуду каждого импульса задавать некоторым кодом и затем передавать этот код, то



Рис. 16.2. Отсчет (выборка) уровня модулирующего сигнала и его кодирование в системе ИКМ.

Уровень напряжения	Импульсы	Двоичный код
7		111
6		110
5		101
4		100
3		011
2		010
1		001
0		000

Рис. 16.3.

мы получим то, что называется системой импульсно-кодовой модуляции (рис. 16.2).

В этой системе уровень каждого импульса или отсчета (выборки) аналогового сигнала представляется набором импульсов постоянной амплитуды и частоты, соответствующим двоичному коду (см. гл. 11). Порядок расположения импульсов в этом наборе, т. е. наличие или отсутствие импульсов в соответствующих местах, характеризует уровень исходного импульса (отсчета). Например, трехразрядный двоичный код составляется из комбинаций трех импульсов для представления уровня, как показано на рис. 16.3.

С помощью трехразрядного двоичного кода можно закодировать, т. е. преобразовать в двоичный код, только восемь дискретных уровней (0–7). Четырехразрядный двоичный код позволяет закодировать 16 уровней (0–15) и т. д.

На передающей стороне для преобразования каждого уровня сигнала в серию импульсов используется блок кодирования. Полученные наборы импульсов передаются один за другим по линии связи. На приемной стороне для преобразования закодированных уровней в исходную информацию используются устройства декодирования.

ИКМ имеет сравнительно низкую чувствительность к искажениям и шумам на линиях связи. Другое ее преимущество состоит в том, что ИКМ основана на той же системе кодирования, которая используется при передаче данных в компьютерных системах, поэтому в обоих случаях можно использовать одно и то же оборудование для кодирования, декодирования, усиления и передачи сигналов.

Временное уплотнение

При использовании прерывающейся несущей, т. е. последовательности импульсов, модулирующий сигнал отсчитывается в строго определенные моменты времени, и его уровень определяется и передается каждый раз, когда присутствует импульс несущей. В интервале между импульсами не передается никакой информации, и эти интервалы можно использовать для передачи отсчетов других сигналов. При этом один канал может работать как многопроводная линия связи с одновременной передачей различной информации по каждой линии. Такой метод называется методом временного уплотнения.

Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ)

Принцип работы электронно-лучевой трубки построен на испускании электронов отрицательно заряженным термокатодом, которые затем притягиваются положительно заряженным анодом и собираются на нем. Это принцип работы старой электронной лампы с термокатодом.

В ЭЛТ высокоскоростные электроны испускаются электронной пушкой (рис. 17.1). Они фокусируются электронной линзой и направляются к экрану, который ведет себя как положительно заряженный анод. Экран покрыт изнутри флуоресцирующим порошком, который начинает светиться под ударами быстрых электронов. Электронный пучок (луч), испускаемый электронной пушкой, создает неподвижное пятно на экране. Для того чтобы электронный пучок оставил след (линию) на экране, его нужно отклонять как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях — X и Y .

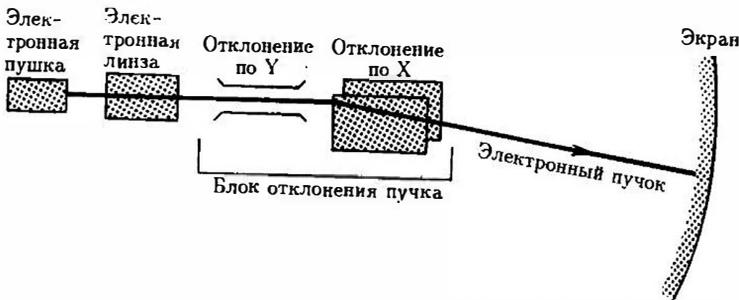


Рис. 17.1. Блок-схема электронно-лучевой трубки.

Методы отклонения пучка

Существует два метода отклонения пучка электронов в ЭЛТ. В *электростатическом* методе используются две параллельные пластины, между которыми создается разность электрических потенциалов (рис. 17.2(a)). Электростатическое поле, возникающее между пластинами, отклоняет электроны, попадающие в область действия поля. В *электромагнитном*

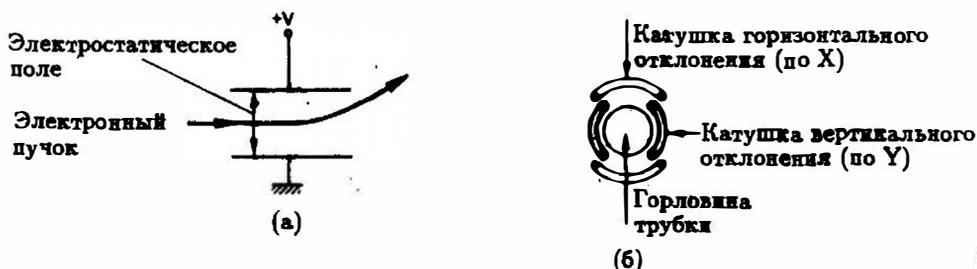


Рис. 17.2. Электростатический (а) и электромагнитный (б) методы отклонения электронного пучка.

методе пучок электронов управляется магнитным полем, создаваемым электрическим током, протекающим через катушку. При этом, как показано на рис. 17.2(б), применяются два набора управляющих катушек (в телевизорах они называются отклоняющими катушками). Оба метода обеспечивают линейное отклонение. Однако метод электростатического отклонения имеет более широкий частотный диапазон, именно поэтому его применяют в осциллографах. Электромагнитное отклонение лучше подходит для высоковольтных трубок (кинескопов), работающих в телевизорах, и к тому же более компактно в реализации, поскольку обе катушки располагаются в одном и том же месте вдоль горловины телевизионной трубки.

Конструкция ЭЛТ

На рис. 17.3 дано схематическое представление внутреннего устройства электронно-лучевой трубки с электростатической отклоняющей системой. Показаны различные электроды и соответствующие им потенциалы. Электроны, испускаемые катодом (или электронной пушкой), проходят через небольшое отверстие (апертуру) в сетке. Сетка, потенциал кото-

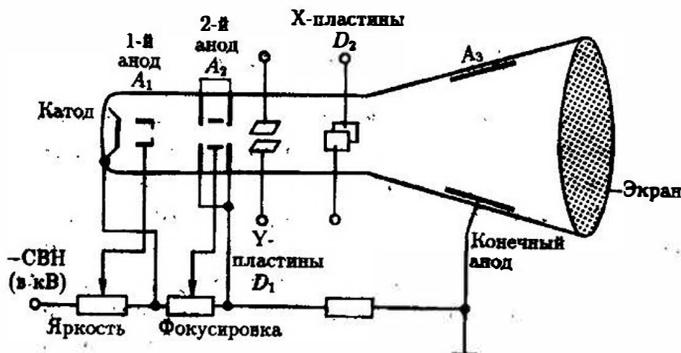


Рис. 17.3. Электронно-лучевая трубка.

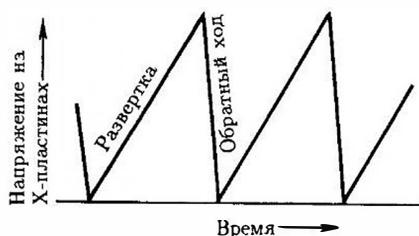


Рис. 17.4. Сигнал временной развертки.

рой отрицателен по отношению к потенциалу катода, определяет интенсивность или число испускаемых электронов и, таким образом, яркость пятна на экране. Затем электронный пучок проходит сквозь электронную линзу, фокусирующую пучок на экран. Конечный анод A_3 имеет потенциал в несколько киловольт (по отношению к катоду), что соответствует диапазону сверхвысоких напряжений (СВН). Две пары отклоняющих пластин D_1 и D_2 обеспечивают электростатическое отклонение пучка электронов в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно.

Вертикальное отклонение обеспечивают Y -пластины (пластины вертикального отклонения), а горизонтальное — X -пластины (пластины горизонтального отклонения). Входной сигнал подается на Y -пластины, которые отклоняют электронный пучок вверх и вниз в соответствии с амплитудой сигнала.

X -пластины заставляют пучок перемещаться по горизонтали от одного края экрана к другому (развертка) с постоянной скоростью и затем очень быстро возвращаться в исходное положение (обратный ход). На X -пластины подается сигнал пилообразной формы (рис. 17.4), вырабатываемый генератором. Этот сигнал называют сигналом временной развертки.

Подавая соответствующим образом сигналы на X - и Y -пластины, можно получить такое смещение электронного пучка, при котором на экране ЭЛТ будет «прорисовываться» точная форма входного сигнала.

Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевой осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки и других блоков, обеспечивающих воспроизведение на экране ЭЛТ неподвижного изображения (осциллограммы), форма которого идентична форме исходного входного сигнала. На рис. 17.5 приведена блок-схема сигнальных цепей и цепей временной развертки осциллографа.

Вертикальный размер осциллограммы регулируется Y -аттенуатором (или регулятором) и Y -усилителем (усилителем вертикального отклонения), позволяя осуществлять калиброванное измерение амплитуды входного сигнала в вольтах на сантиметр (В/см). Генератор развертки син-

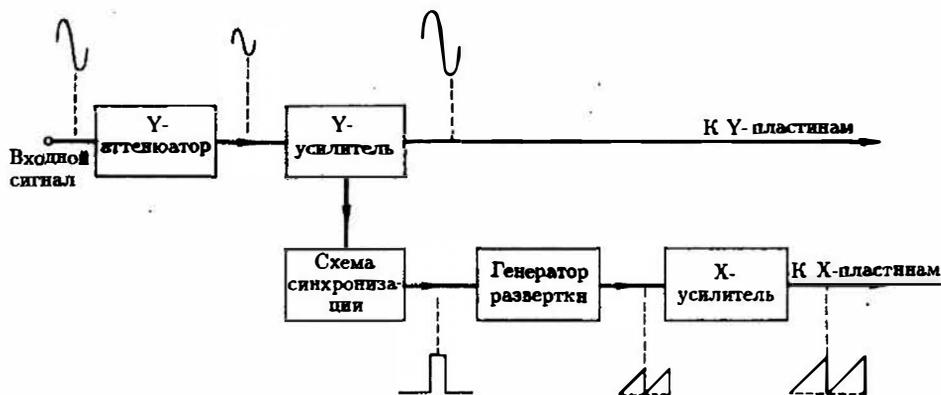


Рис. 17.5. Блок-схема электронно-лучевого осциллографа.

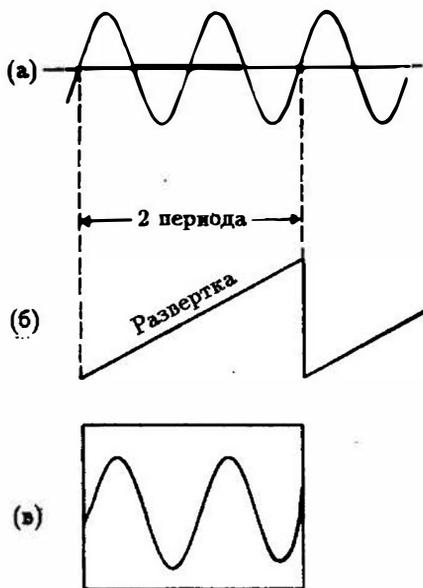


Рис. 17.7.

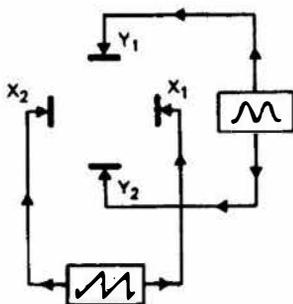


Рис. 17.6.

хронизируется с входным сигналом, подаваемым на Y-пластины, что обеспечивает получение на экране неподвижного изображения.

На рис. 17.6 изображены X- и Y-пластины осциллографа и подаваемые на них сигналы. Сигнал, подаваемый на Y-пластины, заставляет пучок и, следовательно, пятно на экране двигаться вверх и вниз в вертикальном направлении. Пилообразный сигнал, подаваемый на X-пластины, вызывает перемещение пучка в горизонтальном направлении с постоянной скоростью на участке развертки пучка. В конце этого участка напряжение развертки резко падает до начального значения, в результате чего пят-

но на экране быстро возвращается в свою исходную позицию. На участке развертки пучка горизонтальное смещение пропорционально времени. Поэтому скорость развертки может быть откалибрована в секундах на сантиметр (с/см).

Для синхронизации длительность одного цикла развертки (или просто длительность развертки) устанавливается равной целому числу периодов входного сигнала, например двум, трем, четырем и т. д. В этом назначении схемы синхронизации.

Рис. 17.7 иллюстрирует развертку с длительностью, в два раза большей длительности одного периода входного сигнала. На каждый цикл развертки приходится два периода входного сигнала, поэтому изображение на экране будет таким, какое показано на рис. 17.7(в).

Если теперь частоту развертки удвоить, т. е. уменьшить наполовину длительность развертки и сделать ее равной длительности периода входного сигнала, осциллограмма будет отображать лишь один период сигнала (рис. 17.8(а)). Если же частоту развертки уменьшить вдвое (удваивая длительность развертки), то на осциллограмме появится в два раза большее число периодов входного сигнала (четыре) (рис. 17.8(б)).

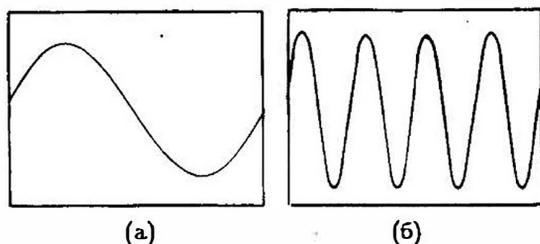


Рис. 17.8.

Типичные потенциалы электродов

Потенциалы электродов ЭЛТ зависят от размера экрана. Более высокие потенциалы необходимы для трубок, применяемых в телевизорах. В осциллографе потенциалы электродов ЭЛТ обычно ниже.

Типичные значения потенциалов:

	Осциллограф	Телевизор
Катод	30 В	70 В (черно-белый) 120 В (цветной)
Сетка	0 В	30 В
Фокусирующая линза	+1400 В	2–3 кВ
Конечный анод	+2000 В	15–20 кВ (черно-белый) 20–25 кВ (цветной)

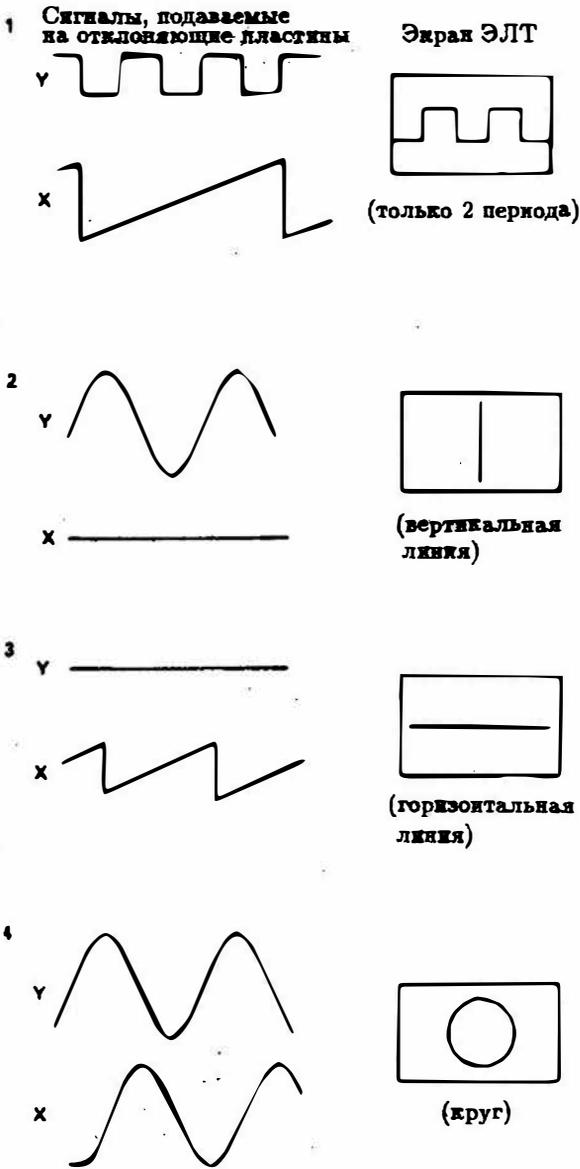


Рис. 17.9.

Пример 1

На X- и Y-пластины осциллографа подаются сигналы, изображенные на рис. 17.9. Для каждого случая нарисован эскиз ожидаемой осциллограммы на экране.

18

Телевидение

Телевизионное вещание включает в себя передачу как изображения, так и звукового сигнала. Чтобы обеспечить передачу возросшего объема информации, система передачи телевизионного сигнала должна работать в расширенном диапазоне частот. Поэтому в качестве несущей используются частоты УКВ-диапазона.

В телевизионных системах изображение, которое должно быть передано, формируется на светочувствительной пластине с помощью электронной камеры. Затем эта пластина сканируется электронным лучом. Передаваемое изображение чаще всего бывает движущимся, поэтому сканирование должно производиться с достаточно большой частотой, чтобы соседние кадры не слишком отличались друг от друга. Благодаря инерционности зрения зритель воспринимает движущееся изображение таким, каким оно было при съемке фильма.

Сканирование изображения

При сканировании изображение разбивается на строки и в каждой точке определяется величина яркости (рис. 18.1). В ТВ-системах за одну секунду сканируется 25 полных кадров изображения. В системе британского телевидения (как и в России. — *Прим. перев.*) принят стандарт, согласно которому каждый кадр разбивается на 625 строк.



Рис. 18.1. Строки развертки.

Чересстрочная развертка кадров

Хотя частота смены кадров 25 кадр/с и обеспечивает эффект непрерывности движения, все равно создается впечатление, что изображение мелькает. От этого можно избавиться, увеличив частоту кадров до 50 кадр/с, но тогда придется вдвое расширить полосу передачи. В конце концов решение было найдено в виде чересстрочной развертки: сначала передаются все нечетные строки, а затем все четные. Каждая половина кадра называется полем или полукадром. Полукадры передаются попеременно с частотой 50 Гц, что глаз воспринимает практически так же, как смену полных кадров с частотой 50 Гц, и мелькание при этом отсутствует.

Видеосигнал

Видеосигнал представляет собой непрерывную последовательность сигналов, несущих информацию об изображении по мере его построчного сканирования. Начало каждой строки и каждого полукадра отмечается синхронизирующими импульсами (синхроимпульсами). Синхроимпульсы делятся на синхроимпульсы строк и синхроимпульсы кадров. Синхроимпульсы строк отмечают начало каждой строки (рис. 18.2), а синхроимпульсы кадров — начало каждого полукадра. Синхроимпульсы кадров повторяются с частотой следования полукадров, т. е. 50 раз в секунду. Синхроимпульсы строк повторяются гораздо чаще. Так, при разбиении кадра на 625 строк развертки они вырабатываются 625 раз в течение каждого полного кадра изображения. Следовательно, за одну секунду требуется выработать $625 \cdot 25 = 15\,625$ импульсов, т. е. частота их следования составляет 15 625 Гц (15,625 кГц).

Как видно из рис. 18.2, синхроимпульсы располагаются ниже уровня черного цвета. При обратном ходе по строке электронный луч гасится, чтобы на экране не возникла мешающая линия.



Рис. 18.2. Видеосигнал.

Система, использующая разбиение кадра на 625 строк

В этой системе каждый кадр изображения разбивается на 625 строк.

Несущая	УВЧ-диапазон (400–900 МГц)
Модуляция	Изображение АМ, звук ЧМ
Ширина полосы видеосигнала	5,5 МГц
Частота полукадров	50 Гц
Частота строк	15,625 кГц

Передача с частичным подавлением боковой полосы

Для передачи телевизионного сигнала применяется амплитудная модуляция. При обычной амплитудной модуляции по обе стороны от несущей образуются две дополнительные боковые полосы частот. Поскольку обе боковые полосы содержат одну и ту же информацию, передавать можно только одну из них. При этом занимаемый диапазон частот становится вдвое уже. Однако, как показала практика, при полном подавлении одной из боковых полос невозможно достичь высокого качества передачи. Поэтому производится лишь частичное подавление (рис. 18.3). Уменьшение количества информации путем плавного усечения верхней боковой полосы (ВБП) частот между частотой несущей f_c и частотой f_2 компенсируется передачей оставшейся части нижней боковой полосы (НБП) между f_1 и f_c . Такая передача называется передачей с частичным подавлением боковой полосы.

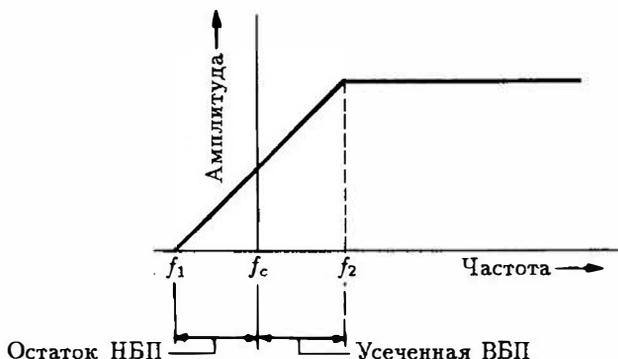


Рис. 18.3. Частичное подавление боковых полос.

Телевизионный приемник (телевизор)

На приемном конце изображение воспроизводится с помощью электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Отклонение электронного луча осуществляется в точном соответствии с тем, как это делалось при сканировании изображения в телестудии. Этот процесс контролируется при помощи синхроимпульсов, входящих в состав принимаемого телевизионного сигнала. В отличие от ЭЛТ осциллографов в телевизионных трубках применяется электромагнитное отклонение луча при помощи катушек, что позволяет уменьшить длину трубки.

Блок-схема телевизора для ТВ-системы 625 (рис. 18.4)

На приемном конце сигнал из эфира принимается антенной. Настройка на нужную станцию осуществляется усилителем радиочастоты УРЧ каскад 1). Здесь же происходит предварительное усиление сигнала несущей. Затем частота несущей заменяется в смесителе на промежуточную частоту 39,5 МГц (каскады 2 и 3). После усилителя промежуточной частоты (УПЧ, каскад 4) сигнал поступает на амплитудный детектор (каскад 5) для демодуляции. Детектированный сигнал содержит информацию об изображении и звуке вместе с синхроимпульсами. Эти три составляющие нужно разделить и направить каждую из них по своему каналу.

На выходе амплитудного детектора частотно-модулированный звуковой сигнал отделяется и направляется в звуковой канал (см. также рис. 18.5). Оставшиеся видеосигнал и синхроимпульсы усиливаются видеоусилителем; и на его выходе происходит их окончательное разделение. После этого сигнал, несущий информацию об изображении, поступает непосредственно на катод ЭЛТ, а синхроимпульсы — в канал развертки.

Звуковой канал

Звуковой сигнал передается в виде частотно-модулированного сигнала с промежуточной частотой 6 МГц. Он усиливается (каскад 12), детектируется частотным детектором (каскад 13) и передается на громкоговоритель через выходной каскад звуковой частоты (каскад 14).

Канал развертки

Отделение синхроимпульсов от сигнала, несущего информацию об изображении, производится на выходе видеоусилителя (рис. 18.4 и 18.5). Сначала они поступают на схему выделения сигналов синхронизации — селектор синхроимпульсов (каскад 7), которая производит разделение синхроимпульсов строк и синхроимпульсов кадров (полей). После этого ка-

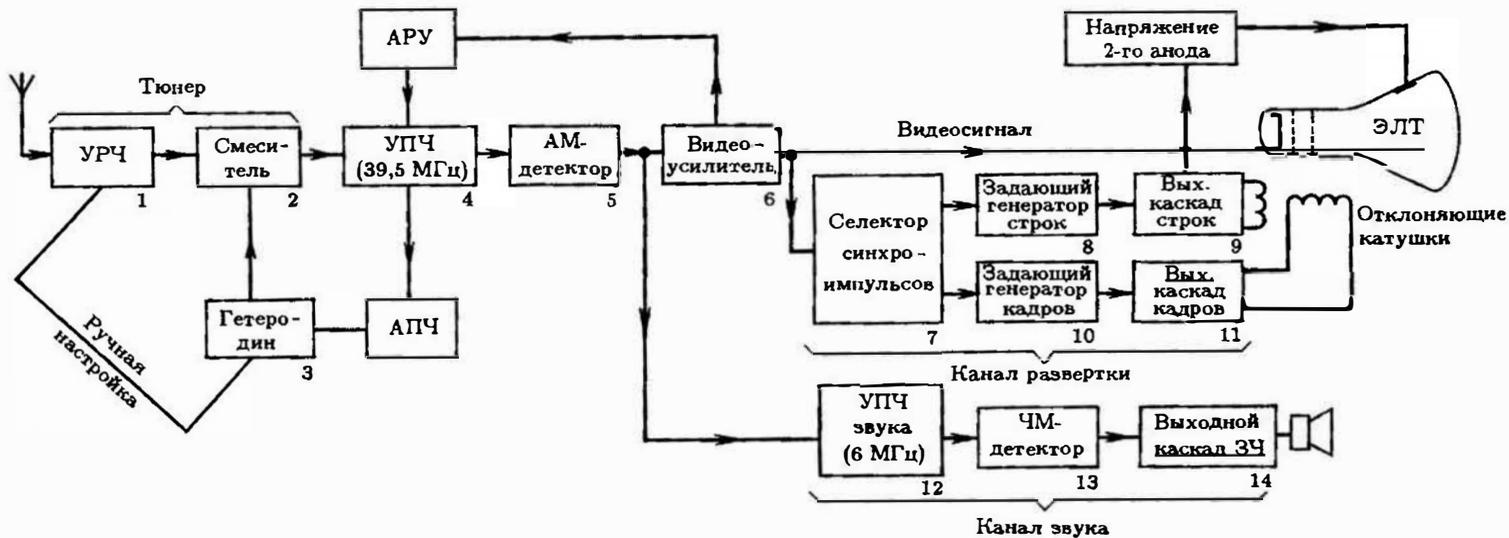


Рис. 18.4. Полная блок-схема телевизора для ТВ-системы 625.

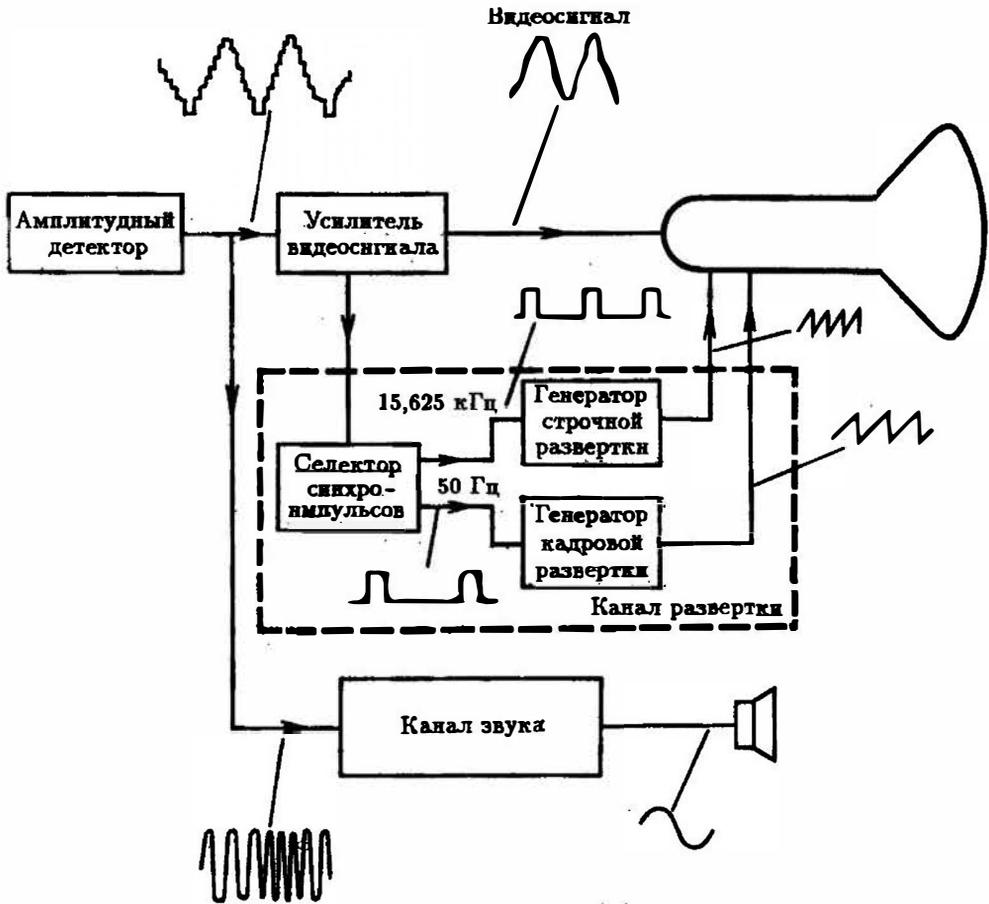


Рис. 18.5. Упрощенная блок-схема телевизора для ТВ-системы 625.

ждый синхроимпульс используется для запуска своего генератора пилообразного сигнала развертки (каскады 8 и 10), который затем подается на соответствующий каскад. Синхроимпульсы строк, кроме того, подаются на вход высоковольтного выпрямителя, который выдает напряжение 10–20 кВ для питания второго анода кинескопа.

Цветное телевидение

Как уже говорилось в гл. 13, видимый свет занимает в спектре электромагнитных волн определенную полосу частот. Цвета, которые мы видим, формируются электромагнитными волнами различных частот видимого спектра (рис. 18.6). Ниже перечислены в порядке возрастания частот цвета видимого спектра.

Красный Оранжевый Желтый Зеленый Голубой Синий Фиолетовый



Рис. 18.6. Спектры электромагнитных волн.

Для более легкого запоминания полезно запомнить следующее предложение, начальные буквы слов в котором соответствуют начальным буквам цветов, идущих по порядку:

Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан.

Эти цвета идут в том же порядке, что и в цветовой маркировке резисторов, за исключением синего цвета (индиго), который не используется. Красный цвет — 2, оранжевый — 3, и так далее.

Основные цвета

Новые цвета получаются смешением разных цветов. В цветном телевидении цвета получаются смешением красного, зеленого и синего цвета (К, З, С) в различных соотношениях. Эти три цвета носят название основных цветов. Смешивая К, З и С в различных пропорциях, можно получить неограниченное количество цветов, но следует помнить следующие основные правила:

- К + З = желтый
- К + С = пурпурный
- З + С = зеленовато-голубой
- К + З + С = белый

Передача цвета

Основным требованием к цветным телепередачам является то, что черно-белый телевизор также должен их принимать и формировать нормальное черно-белое изображение, не требуя для этого никакого усовершенствования. Это называется совместимостью систем цветного и черно-белого телевидения.

Чтобы выполнить это требование, цветная телепередача ведется с одновременной передачей информации для черно-белых телевизоров (сигнал яркости) в обычном порядке. Составляющая сигнала, несущая цветовую информацию (сигнал цветности), модулирует поднесущую с частотой 4.43 МГц и, как показано на рис. 18.7, добавляется к монохроматическому сигналу.

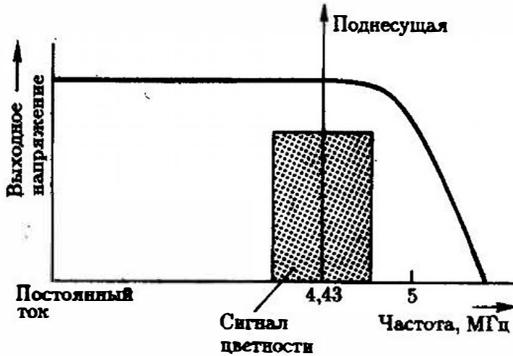


Рис. 18.7. Передача цветной телеинформации. Поднесущая используется для передачи сигнала цветности.

В студиях для формирования цветного изображения используются три камеры. Перед каждой камерой ставится соответствующий фильтр, пропускающий лишь один из трех основных цветов: красный фильтр — перед «красной» камерой, синий — перед «синей» и зеленый — перед «зеленой».

Цветной телевизор

На рис. 18.8 приведена блок-схема цветного телевизора. Чтобы не загромождать схему, канал развертки и звуковой канал на ней не показаны, поскольку их устройство полностью совпадает с устройством аналогичных каналов черно-белого телевизора. Модулированная несущая принимается и обрабатывается амплитудным детектором. Видеосигнал, восстановленный амплитудным детектором, состоит из двух составляющих: монохроматической (сигнал яркости Y) и цветовой (сигнал цветности). Сигнал яркости усиливается отдельно и подается на декодер. Декодер состоит из усилителя сигнала цветности, детектора и декодирующей матрицы. На него поступают как сигнал яркости, так и сигнал цветности, и он преобразует эти сигналы в сигналы красного, зеленого и синего цвета, которые затем усиливаются порознь и подаются на ЭЛТ.



Рис. 18.8. Блок-схема цветного телевизора.

Масочный кинескоп с дельтавидным расположением электронных пушек (рис. 18.9)

Это одна из разновидностей электронно-лучевых трубок, применяемых в Великобритании изготовителями цветных телевизоров. В трубке имеются три электронные пушки, на которые подаются сигналы красного, зеленого и синего цвета. Электронные пушки устанавливаются в горловине баллона ЭЛТ под углом 120° друг к другу и облучают экран одновременно. Каждая пушка фокусируется на покрытый специальным покрытием участок (точку), который при попадании на него быстрого электрона начинает излучать один из основных цветов. Пушка должна облучать только те точки, которые соответствуют ее цвету.

Эти точки располагаются по три и образуют треугольники, называемые триадами (КЗС). Чтобы гарантировать, что каждая электронная пушка облучает только точку своего цвета, а не «чужие», применяется «теньевая маска». Невооруженным глазом точки по отдельности неразличимы, поэтому глаз видит смешанные цвета, благодаря чему воспроизводится первоначальное цветное изображение. Катодка сведения лучей, которая расположена в горловине ЭЛТ и на которую подаются синхросигналы строк и полей (кадров), обеспечивает облучение всеми тремя пушками одной и той же строки.

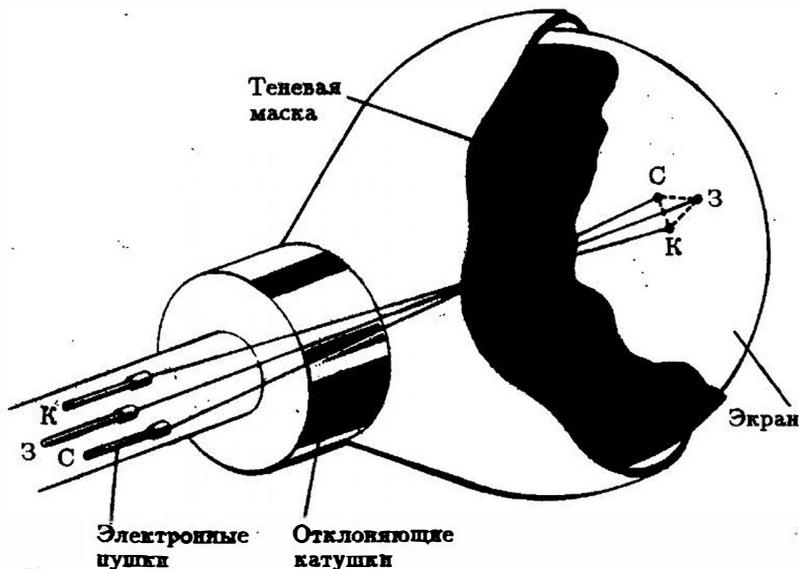


Рис. 18.9. Масочный дельта-кинескоп.

Масочный кинескоп с копланарным расположением электронных пушек

В ЭЛТ копланарного кинескопа все три электронные пушки расположены в ряд, а светящееся покрытие экрана состоит из триад, расположенных «бок о бок», полосами. Каждая трехцветная триада сделана таким образом, что она совпадает с продольной прорезью в теневой маске.

Первый копланарный масочный кинескоп был разработан фирмой Sony и получил название тринитрон. Затем был выпущен копланарный прецизионный (precision-in-line — PIL) кинескоп Малларда, кинескоп с автоматической фокусировкой (рис. 18.10).

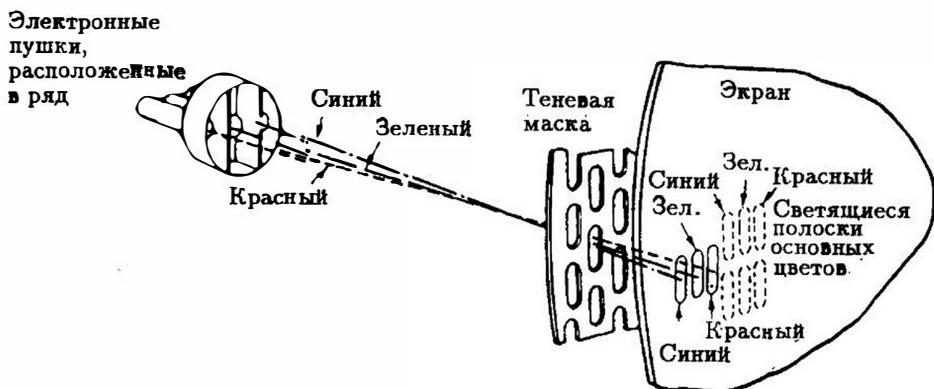


Рис. 18.10. Прецизионный копланарный кинескоп.

Цифровая стереосистема NICAM

Как уже говорилось ранее, звуковой сигнал передается на несущей частоте 6 МГц, которая лежит за пределами полосы частот видеосигнала, что исключает всякое взаимное влияние. Используя этот метод, можно достигнуть высокого качества звука, установив в телеприемнике качественный усилитель звуковой частоты. Тем не менее этот метод не обеспечивает высокую верность воспроизведения (hi-fi), а также введение стереофонической передачи, поскольку при добавлении второй несущей для передачи звукового сигнала невозможно избежать взаимного влияния видео- и звукового сигналов, а также звуковых сигналов между собой. Для получения стереофонического звучания (с качеством hi-fi) пришлось искать новые пути.

После нескольких лет исследований и разработок специалисты Би-би-си предложили совершенно новую звуковую систему для телевидения, которую они назвали NICAM 728, или просто NICAM. NICAM можно расшифровать как «система одновременной передачи компандированных

объединенных сигналов близких частот», а 728 — это скорость передачи информации, составляющая 728 Кбит/с. Эта система имеет два совершенно независимых звуковых канала, поэтому по ним может передаваться как стереозвук, так и передача на двух языках. Передача может вестись как по одному, так и по двум каналам, причем частоты этих каналов совершенно отделены от частотно-модулированного монофонического канала частотой 6 МГц.

Телевидение высокой четкости

Созданием системы телевидения высокой четкости (HDTV) предпринята попытка достигнуть качества изображения, подобного тому, которое получается на 16-миллиметровой пленке. Чтобы достигнуть такого уровня качества, необходимо значительно большее количество строк развертки. Предлагается использовать 1250 строк развертки в сочетании с новым удлинненным изображением, снабженным текстовым блоком. При этом полоса частот расширяется до 34,7 МГц.

Для сужения полосы частот передаваемого сигнала до приемлемой величины вводятся передовые методы цифровой обработки. Поскольку полоса частот значительно расширилась, необходимо использовать спутниковую связь с применением частот от 1000 МГц (1 ГГц).

Передача текстовой информации

Передача текстовой информации представляет собой передачу информации в определенном коде в дополнение к обычному сигналу изображения. В ТВ-системах 625 лишь примерно 575 строк используются для формирования изображения. Остальные строки резервируются для синхронизации и вертикальной развертки. Текстовая информация размещается в некоторых из этих неиспользованных строк и передается в обычном порядке. Непосредственно в телевизоре текстовая информация отделяется от видеосигнала, разбивается на «страницы» и обрабатывается для непосредственной выдачи на экран. На рис. 18.11 показана упрощенная схема устройства для приема и обработки текстовой информации. Сначала видеосигнал при помощи электронного переключателя направляется на декодер текстовой информации. Декодер, который состоит из набора кремниевых микросхем, «сортирует» эту информацию на группы строк и страницы в соответствии с пожеланиями владельца, записывает ее в блоки памяти, а затем при помощи знакогенератора выводит на экран в виде комбинации букв и цифр.

Телевизор с цифровой обработкой информации

Цифровой обработке может подвергаться не только текстовая информация и информация, передаваемая в системе NICAM, но и собственно видеосигнал. На рис. 18.12 показаны основные элементы телевизора с ци-



Рис. 18.11.



Рис. 18.12.

фровой обработкой информации. Комбинированный видеосигнал с каскада промежуточной частоты подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для преобразования в последовательность кодированных цифровых импульсов. Затем видеосигнал в таком цифровом виде подается на входы процессора обработки видеосигнала и отклоняющей системы. Процессор обработки видеоинформации выполняет все необходимые действия по обработке сигналов яркости и цветности. Сигнал, получаемый на выходе этого процессора, в дальнейшем расшифровывается декодером для получения сигналов красного, зеленого и синего (КЗС) цвета в форме цифрового сигнала. С декодера сигналы цветов поступают на цифро-

аналоговый преобразователь (ЦАП) для восстановления исходных аналоговых сигналов основных цветов КЭС, с которого они уже подаются на ЭЛТ.

Процессор, управляющий отклонением лучей, обеспечивает синхронизацию развертки, а также выдает управляющие сигналы строк и полей (кадров), которые затем подаются на катушки отклонения лучей через соответствующие выходы. Работой телевизоров с цифровой обработкой информации, как правило, управляют встроенные микрокомпьютеры, которые обеспечивают очень точное соответствие частот для синхронизации строк и кадров, в результате чего получается очень устойчивое изображение, которое к тому же отличается более высоким качеством.

19

Упражнения I

По материалам глав 1–18. Ответы см. в приложении 7 в конце книги.

1. Число периодов синусоидального сигнала, показанных на рис. 19.1, равно
 - а) $1\frac{1}{4}$, б) $1\frac{1}{2}$, в) $2\frac{1}{2}$, г) 3.
2. Частота сигнала, изображенного на рис. 19.2, равна
 - а) 2 Гц, б) 2,5 Гц, в) 4 Гц, г) 5 Гц.
3. Синусоидальный сигнал имеет амплитуду 10 В. Его среднеквадратическое значение приблизительно равно
 - а) 5 В, б) 7 В, в) 10 В, г) 20 В.
4. При широтно-импульсной модуляции изменяемым параметром несущей является
 - а) длительность,
 - б) амплитуда,
 - в) положение,
 - г) частота.
5. Какая из следующих частот относится к ультравысокому диапазону частот (УВЧ)?
 - а) 100 МГц, б) 1000 МГц, в) 10 000 МГц, г) 100 000 МГц.

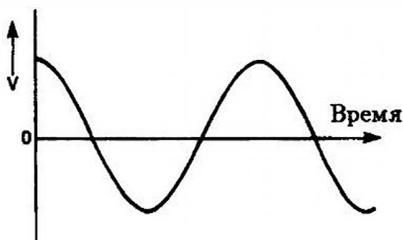


Рис. 19.1.

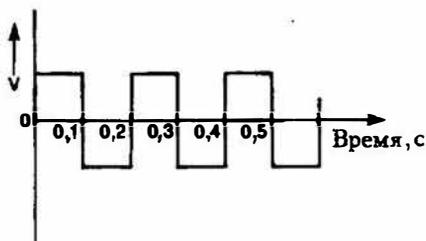


Рис. 19.2.

6. ЧМ-передачи Би-би-си ведутся при максимальной девиации частоты
- ± 9 кГц,
 - ± 30 кГц,
 - ± 75 кГц,
 - ± 250 кГц.
7. В радиосвязи амплитудная модуляция применяется чаще, чем частотная, потому что
- требует меньшую полосу частот,
 - обеспечивает лучшее качество звука,
 - имеет меньший шум,
 - передает больший объем информации.
8. Если синусоидальный сигнал подать на вход дифференцирующего элемента, то на выходе получаются
- короткие импульсы,
 - прямоугольные импульсы,
 - треугольные импульсы,
 - синусоидальный сигнал.
9. Схема, заключенная в прямоугольнике на рис. 19.3, является
- интегратором,
 - ограничителем,
 - схемой восстановления постоянной составляющей,
 - межкаскадным элементом связи.
10. Какое из условных обозначений на рис. 19.4 относится к *pnp*-транзистору?

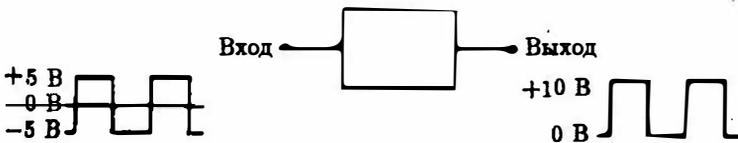


Рис. 19.3.

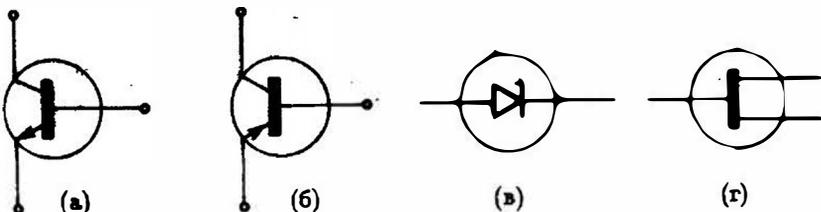


Рис. 19.4.

11. В звуковом канале 625-строчной ТВ-системы используется модуляция
- амплитудная,
 - фазовая,
 - импульсно-кодовая,
 - частотная.
12. На рис. 19.5 блок 2 представляет собой
- усилитель промежуточной частоты,
 - гетеродин,
 - смеситель,
 - детектор.
13. С помощью какого логического элемента или комбинации логических элементов можно получить на выходе только логическую 1, если на вход подаются четыре логических 0?
- элемент ИЛИ-НЕ с двумя входами плюс элемент И с двумя входами,
 - элемент И-НЕ с двумя входами плюс элемент ИЛИ-НЕ с двумя входами,
 - элемент ИЛИ-НЕ с четырьмя входами,
 - элемент И-НЕ с четырьмя входами.
14. Обратимся к рис. 19.6. Если ток в проводнике направлен от наблюдателя, то проводник будет
- перемещаться вверх,
 - перемещаться вниз,
 - оставаться неподвижным,
 - перемещаться вправо.

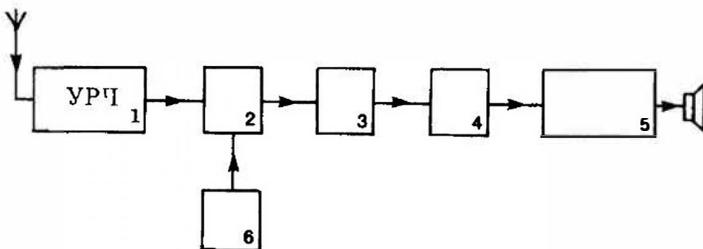


Рис. 19.5.

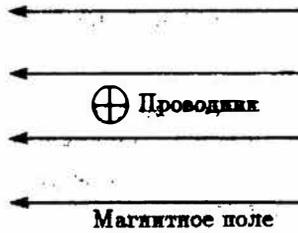


Рис. 19.6.



Рис. 19.7.

15. Частота пульсаций напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя равна 120 Гц. Какова частота напряжения на входе?

- а) 50 Гц, б) 60 Гц, в) 120 Гц, г) 200 Гц.

16. Усилитель включает в себя два каскада. Первый каскад имеет коэффициент усиления по напряжению 30, а второй — 40. Каков общий коэффициент усиления усилителя?

- а) 70, б) 120, в) 1200, г) 7000.

17. Основным назначением стабилизатора на рис. 19.7 является компенсация

- а) потерь в трансформаторе,
 б) колебаний нагрузки,
 в) неэффективности выпрямителя,
 г) изменений частоты.

18. Блок на рис. 19.8 представляет собой

- а) ограничитель,
 б) элемент связи по переменному току,
 в) схему восстановления постоянной составляющей,
 г) выпрямитель.

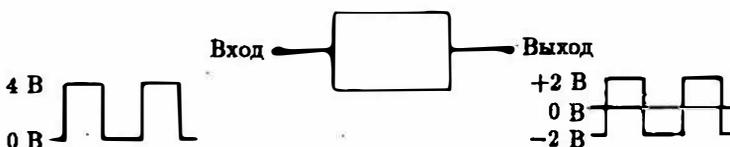


Рис. 19.8.

19. Для уменьшения искажения сигнала на выходе усилителя применяется
- отрицательная обратная связь, подаваемая с выхода на вход,
 - положительная обратная связь, подаваемая с выхода на вход,
 - отрицательная обратная связь, подаваемая со входа на выход,
 - положительная обратная связь, подаваемая со входа на выход.
20. Схема, вырабатывающая переменный сигнал при питании от источника постоянного тока, называется
- модулятором,
 - детектором,
 - выпрямителем,
 - генератором (инвертором).
21. Сигнал на выходе логического элемента, показанного на рис. 19.9, будет присутствовать при условии, что сигналы поданы
- только на входы А и С,
 - только на входы В и С,
 - на входы А, В и С,
 - на любые два входа.
22. При проверке неразрывности цепи прибора его сопротивление составило 500 кОм, а при обратном включении — 50 Ом. Проверяемый прибор является
- термистором,
 - конденсатором,
 - варистором,
 - германиевым диодом.

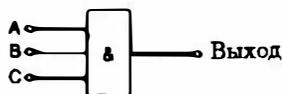


Рис. 19.9.

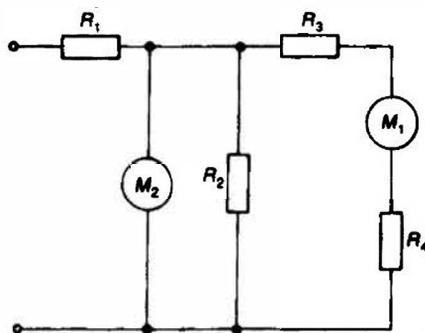


Рис. 19.10.

23. Измерительные приборы M_1 и M_2 , включенные как показано на рис. 19.10, измеряют:

- а) M_1 — силу тока, M_2 — напряжение,
- б) M_1 — силу тока, M_2 — силу тока,
- в) M_1 — напряжение, M_2 — силу тока,
- г) M_1 — напряжение, M_2 — напряжение.

24. В результате отключения АРУ в радиоприемнике на выходе

- а) уменьшится мощность,
- б) появятся шум и искажения,
- в) будут значительные изменения,
- г) будет поврежден выходной каскад.

25. Резистор, показанный на рис. 19.11, может иметь отклонения от закодированного номинала на величину

- а) ± 2 кОм, б) ± 5 кОм, в) ± 10 кОм, г) ± 20 кОм.

26. Четыре равных резистора соединены последовательно, и их полное сопротивление равно 800 Ом. Каково будет полное сопротивление цепи при их параллельном соединении?

- а) 10 Ом, б) 50 Ом, в) 400 Ом, г) 1600 Ом.

27. Две полоски А и В из идентичного металла имеют одинаковые длину и толщину. Если ширина полоски А равна половине ширины полоски В, то отношение их сопротивлений будет равно

- а) 1 : 2, б) 1 : 4, в) 2 : 1, г) 4 : 1.

28. В какой из перечисленных последовательностей сигналы записаны в порядке увеличения частоты?

- а) звуковые волны, радиоволны, световые волны, X-лучи,
- б) звуковые волны, световые волны, X-лучи, радиоволны,
- в) X-лучи, радиоволны, звуковые волны, световые волны,
- г) световые волны, X-лучи, звуковые волны, радиоволны.



Рис. 19.11.

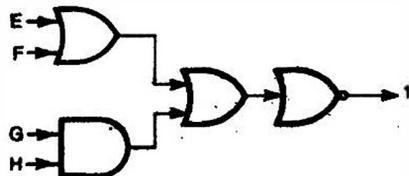


Рис. 19.12.

29. При амплитудной модуляции несущей сигналом, имеющим диапазон частот 100–5000 Гц, результирующая полоса частот равна

а) 100 Гц, б) 400 Гц, в) 5000 Гц, г) 10 000 Гц.

30. В ЧМ-приемнике усилитель промежуточной частоты требует полосы частот

а) ± 9 кГц, б) ± 100 кГц, в) $\pm 10,7$ МГц, г) ± 470 кГц.

31. Рассмотрим логическую схему на рис. 19.12. Чтобы получить на ее выходе 1, на вход должна быть подана комбинация

	Е	Ф	Г	Н
а)	0	0	1	1
б)	1	1	0	0
в)	1	1	1	0
г)	0	0	0	1

32. В АМ-системе в результате изменения напряжения модулирующего сигнала изменяется

- а) ширина полосы частот,
- б) глубина модуляции,
- в) боковые частоты,
- г) девиация частоты.

33. 10-омный резистор рассеивает мощность 90 Вт, когда подключен к источнику переменного тока напряжением 30 В. Указанное напряжение есть

- а) среднеквадратическое значение,
- б) среднее значение,
- в) максимальное значение,
- г) размах (удвоенная амплитуда) напряжения.

34. Какой из следующих двоичных кодов представляет число 7?

а) 0110, б) 0111, в) 1001, г) 1110.

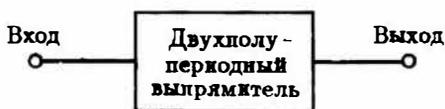


Рис. 19.13.

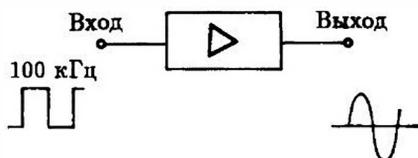
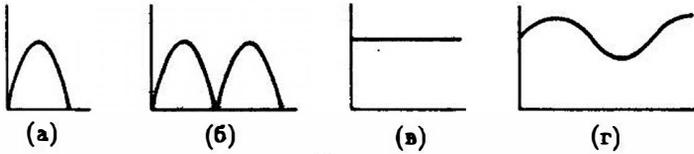


Рис. 19.14.

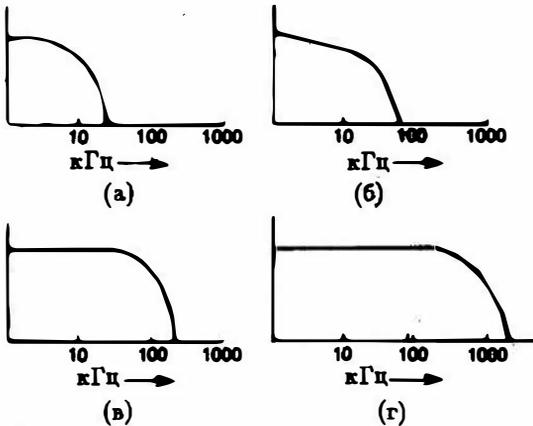
35. Обратимся к рис. 19.13. Если на вход двухполупериодного выпрямителя подается синусоидальный сигнал, то форма сигнала на выходе будет



36. При увеличении амплитуды модулирующего сигнала в ЧМ-системе происходит

- а) увеличение амплитуды несущей,
- б) увеличение глубины модуляции,
- в) увеличение девиации частоты,
- г) уменьшение в среднем частоты несущей.

37. Рассмотрим рис. 19.14. Амплитудно-частотная характеристика усилителя имеет вид



38. На рис. 19.15 изображена блок-схема электронно-лучевого осциллографа. Блоки А и В представляют собой

А

В

- | | |
|------------------------|---------------------|
| а) схему синхронизации | аттенюатор |
| б) схему синхронизации | генератор развертки |
| в) генератор развертки | схему синхронизации |
| г) аттенюатор | генератор развертки |

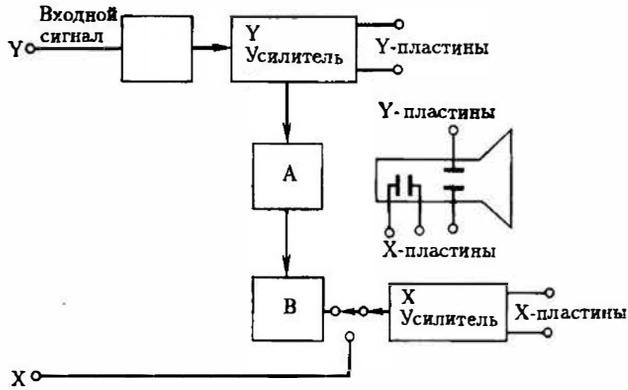


Рис. 19.15.

39. Y-усилитель осциллографа имеет чувствительность 10 мВ/см. Какую максимальную амплитуду синусоидального сигнала можно отобразить на экране осциллографа, если полное Y-отклонение равно 6 см?
- а) 30 мВ, б) 60 мВ, в) 120 мВ, г) 600 мВ.
40. В ЧМ-приемнике автоматическая подстройка частоты может быть использована для
- а) выходного каскада ЗЧ,
 б) частотного детектора,
 в) гетеродина,
 г) усилителя радиочастоты.
41. В электромагнитах обычно используют сердечник, сделанный из
- а) мягкого железа,
 б) твердого железа,
 в) никеля,
 г) стали.
42. Какой из логических элементов, показанных на рис. 19.16, будет иметь на выходе логическую 1?

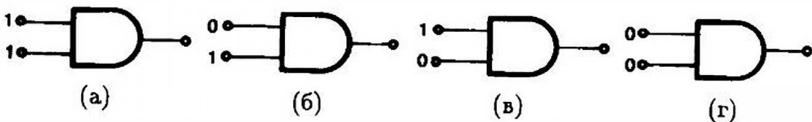


Рис. 19.16.

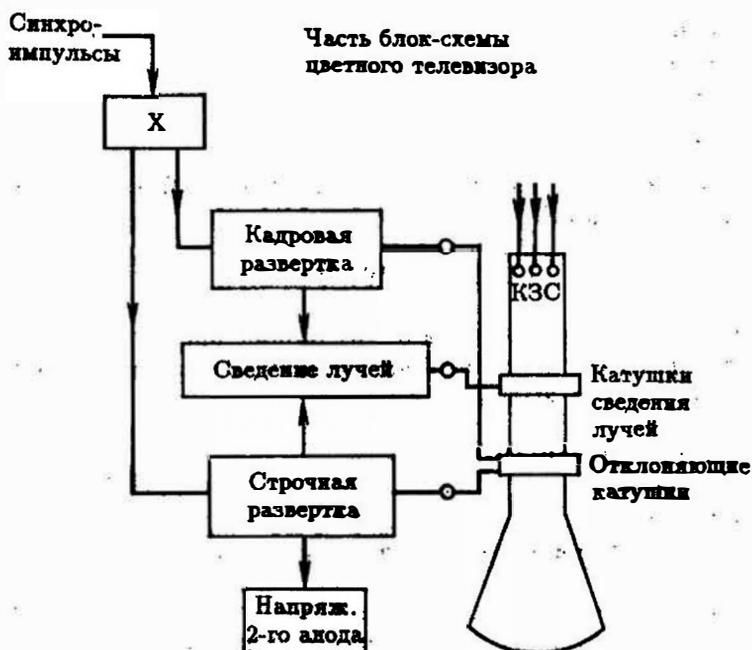


Рис. 19.17.

43. На схеме, изображенной на рис. 19.17, блок X —

- а) видеомонитор,
- б) декодер системы цветного телевизора,
- в) схема выделения сигналов синхронизации,
- г) усилитель сигналов цветности.

44. Прямоугольный сигнал содержит кроме основной следующие гармоники:

- а) только четные гармоники,
- б) только нечетные гармоники,
- в) четные и нечетные гармоники,
- г) других гармоник нет.

45. Полоса частот видеоусилителя равна

- а) 20 Гц – 20 кГц,
- б) постоянный ток – 5 МГц,
- в) 470 кГц – 10,7 МГц,
- г) 10 МГц – 40 МГц.

46. Какой из перечисленных материалов является изолятором?

- а) германий,
 б) серебро,
 в) сухая древесина,
 г) сталь.
47. Если конденсатор емкостью 1 Ф имеет заряд 10 Кл , каково напряжение на его выводах?
- а) $0,1 \text{ В}$, б) 1 В , в) 10 В , г) 100 В .
48. Если при питании нагрузки от нестабилизированного источника ток нагрузки сначала имеет небольшое значение, а затем увеличивается, то напряжение на выходе
- а) остается неизменным,
 б) уменьшается,
 в) увеличивается,
 г) сначала увеличивается, а затем уменьшается.
49. При частотной модуляции несущей простым синусоидальным сигналом число образующихся при этом боковых частот
- а) равно нулю,
 б) равно 2,
 в) зависит от частоты несущей,
 г) очень велико.
50. Если сложить двоичные числа 0101 и 1010 , каков будет результат в десятичной системе счисления?
- а) 4, б) 10, в) 15, г) 1111.
51. Чему равен коэффициент заполнения импульсной последовательности на рис. 19.18 ?
- а) $3 : 1$, б) $2 : 1$, в) $1 : 2$, г) $1 : 3$.

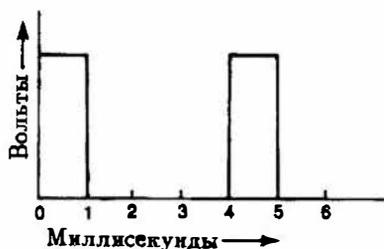


Рис. 19.18.

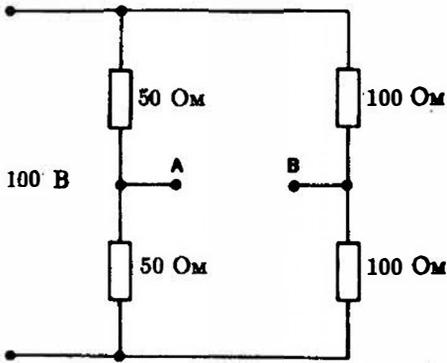


Рис. 19.19.

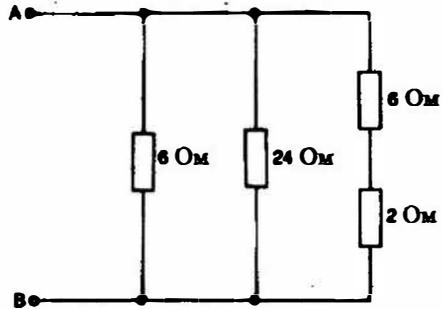


Рис. 19.20.

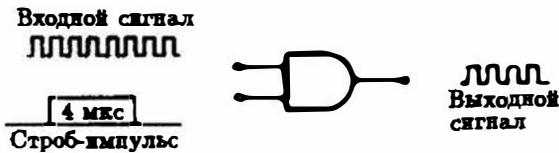


Рис. 19.21.

52. Разность потенциалов между точками A и B в схеме на рис. 19.19 равна

- а) 0 В, б) 10 В, в) 50 В, г) 100 В.

53. Сопротивление, измеренное между точками A и B в схеме на рис. 19.20, равно

- а) 2 Ом, б) 3,1 Ом, в) 8 Ом, г) 38 Ом.

54. Рассмотрим рис. 19.21. Частота повторения импульсов на входе равна

- а) 1 кГц, б) 4 кГц, в) 1 МГц, г) 4 МГц.

55. Канал генератора развертки должен вырабатывать

- а) синусоидальный сигнал,
 б) постоянный ток,
 в) пилообразный сигнал,
 г) импульсы малой длительности.

56. Блок 1 на рис. 19.22 — это

- а) смеситель,
 б) радиочастотный блок настройки,

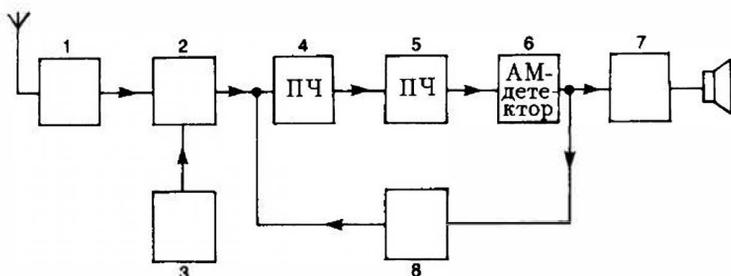


Рис. 19.22.

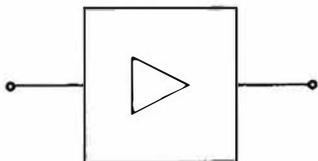


Рис. 19.23.

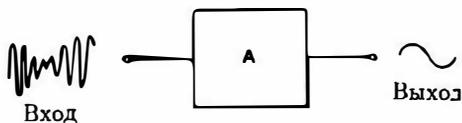


Рис. 19.24.

- в) каскад звуковой частоты,
- г) частотный дискриминатор.

57. Блок 3 на рис. 19.22 — это

- а) гетеродин,
- б) смеситель,
- в) блок автоматической подстройки частоты (АПЧ),
- г) ограничитель сигнала.

58. Блок 8 на схеме рис. 19.22 — это

- а) выходной каскад звуковой частоты,
- б) схема выделения сигналов синхронизации,
- в) блок автоматической регулировки усиления (АРУ),
- г) блок автоматической подстройки частоты (АПЧ).

59. Символ, показанный на рис. 19.23, означает

- а) усилитель,
- б) генератор,
- в) фильтр верхних частот (ФВЧ),
- г) фильтр нижних частот (ФНЧ).

60. Интегратор — это

- а) ФНЧ,
- б) ФВЧ,



Рис. 19.25.

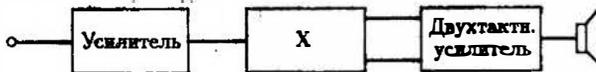


Рис. 19.26.

- в) преобразователь постоянного тока в переменный,
- г) ЧМ-детектор.

61. Блок А на рис. 19.24 — это

- а) ЧМ-демодулятор,
- б) АМ-детектор,
- в) усилитель звуковой частоты (УЗЧ),
- г) цепь коррекции предуслажений.

62. Ток через сопротивление на схеме рис. 19.25 равен

- а) 0,5 А, б) 1 А, в) 2 А, г) 5 А.

63. Блок X на блок-схеме рис. 19.26 — это

- а) буферный каскад,
- б) цепь обратной связи,
- в) расщепитель фаз,
- г) усилитель напряжения.

64. Блок А на рис. 19.27 — это

- а) усилитель звуковой частоты (УЗЧ),
- б) ЧМ-декодер,
- в) импульсный генератор,
- г) АМ-детектор.

65. Блок С на рис. 19.27 — это

- а) декодер,
- б) генератор кадровой развертки,
- в) генератор строчной развертки,
- г) схема выделения сигналов синхронизации.

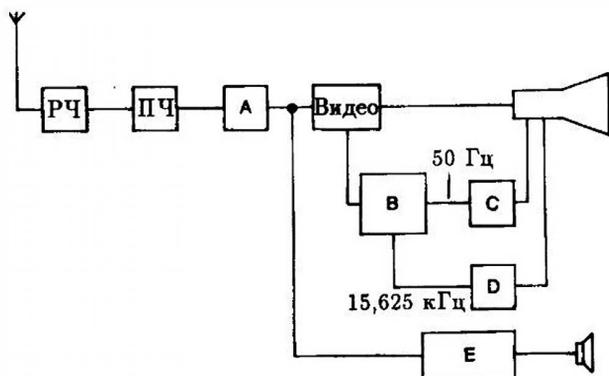


Рис. 19.27.

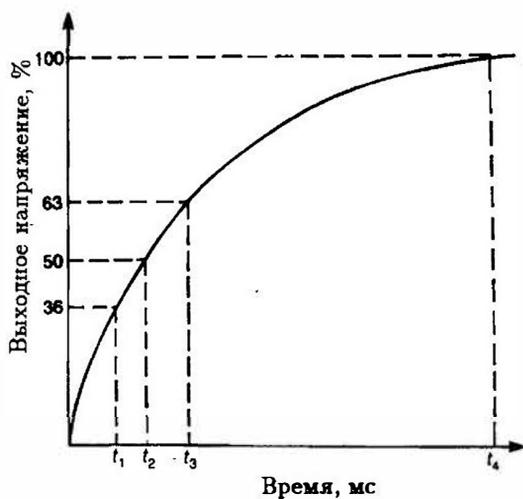


Рис. 19.28.

66. Блок Е на рис. 19.27 — это

- а) канал звукового сопровождения,
- б) канал генератора развертки,
- в) цепь отрицательной обратной связи,
- г) селектор (дискриминатор) цвета.

67. Постоянная времени сигнала, изображенного на рис. 19.28, равна

- а) t_1 , б) t_2 , в) t_3 , г) t_4 .

68. Преимущество 625-строчной телевизионной системы над 405-строчной состоит в том, что она

- а) упрощает антенну,
- б) использует более дешевые приемники,
- в) воспроизводит более качественное изображение,
- г) может использоваться в цветном телевидении.

69. При увеличении девиации частоты на входе дискриминатора на выходе

- а) повышается уровень звука,
- б) повышается частота звука,
- в) понижается уровень звука,
- г) понижается частота звука.

70. Блок А на рис. 19.29 — это

- а) канал генератора развертки,
- б) канал звукового сопровождения,
- в) декодер,
- г) усилитель яркости.

71. Блок В на рис. 19.29 — это

- а) матричный декодер,
- б) схема выделения сигналов синхронизации,
- в) усилитель звуковой частоты (УЗЧ),
- г) расщепитель фаз.

72. Среднее напряжение сигнала, изображенного на рис. 19.36, равно

- а) 2 В, б) 3,5 В, в) 5 В, г) 7 В.

73. Два последовательно соединенных конденсатора емкостью 1 мкФ каждый имеют общую емкость

- а) 0,25 мкФ, б) 0,5 мкФ, в) 1 мкФ, г) 2 мкФ.

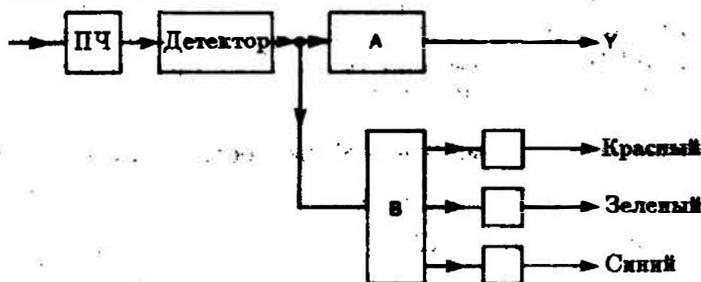


Рис. 19.29.

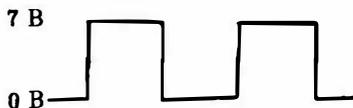


Рис. 19.30.

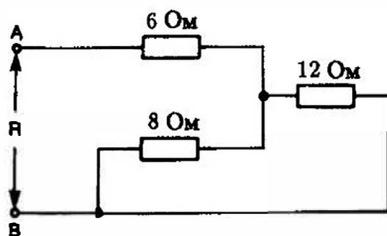


Рис. 19.31.

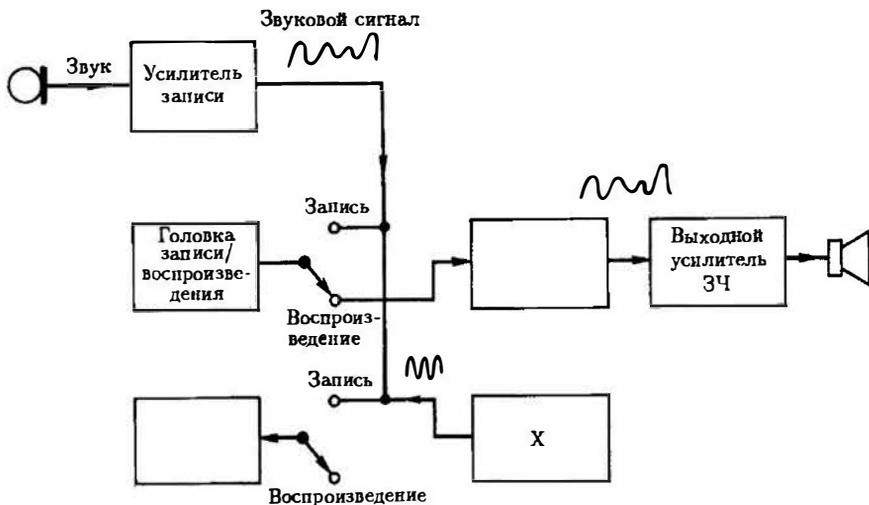


Рис. 19.32.

74. Сопротивление между точками А и В в цепи, показанной на рис. 19.31, равно

- а) 3,86 Ом, б) 10,8 Ом, в) 12 Ом, г) 26 Ом.

75. Блок X на рис. 19.32 — это

- а) стирающая головка,
 б) усилитель воспроизведения,
 в) генератор ВЧ-смещения,
 г) генератор сигналов синхронизации.

76. В телевизионной системе высокой четкости число строк развертки равно

- а) 50, б) 425, в) 625, г) 1250.

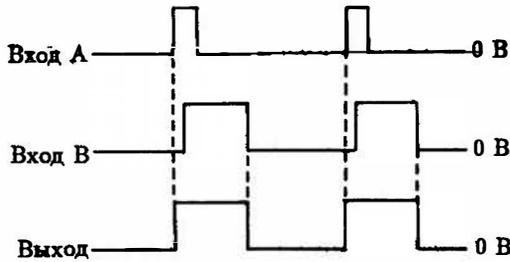


Рис. 19.33.

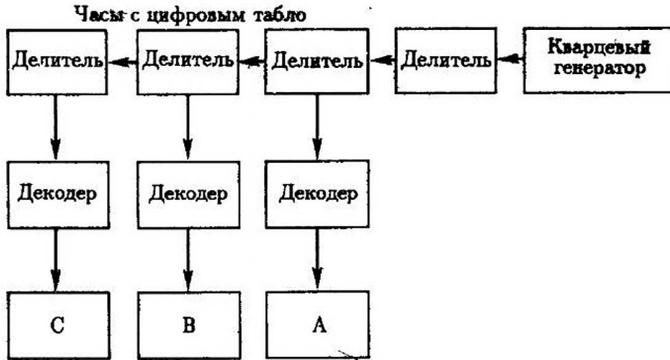


Рис. 19.34.

77. На рис. 19.33 изображены сигналы на входах и выходе логического элемента с двумя входами. Данный элемент представляет собой схему

- а) И, б) ИЛИ, в) Исключающее ИЛИ, г) ИЛИ-НЕ.

78. В какой строке правильно описаны блоки А, В и С, изображенные на схеме рис. 19.34?

	А	В	С
а)	индикатор секунд	индикатор минут	индикатор часов
б)	индикатор минут	индикатор секунд	индикатор часов
в)	индикатор часов	индикатор минут	индикатор секунд
г)	индикатор секунд	индикатор часов	индикатор минут

79. Блок X на рис. 19.35 — это

- а) аналого-цифровой преобразователь,
 б) цифро-аналоговый преобразователь,
 в) цифровой декодер,
 г) мультиплексор.

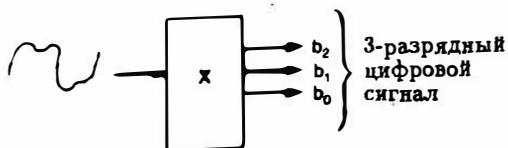


Рис. 19.35.

80. Система NICAM обеспечивает

- а) высокое качество воспроизведения монофонического звука,
- б) высокое качество воспроизведения стереозвуча,
- в) высокое качество изображения,
- г) улучшение выделения сигналов синхронизации.

Полупроводниковый диод

Проводники и изоляторы

Все вещества состоят из одного или более химических элементов, таких, как кислород, сера и т. д. Мельчайшей составной частью вещества является атом. Атомы различных элементов могут, соединяясь, образовывать молекулы вещества: например, молекула воды включает в себя два атома водорода и один атом кислорода. Таким образом получаются различные вещества.

Атом, в свою очередь, состоит из более мелких частиц, электронов, вращающихся вокруг ядра, которое находится в центре атома и содержит один или более протонов (рис. 20.1). Отрицательно заряженные электроны притягиваются положительно заряженными протонами и непрерывно вращаются по орбитам, или оболочкам, вокруг ядра. Количество электронов в точности равно количеству протонов.

Атомы различных элементов отличаются друг от друга количеством электронов: например, у атома водорода один электрон, тогда как атом углерода имеет шесть электронов. Под действием электрического потенциала электроны, слабо связанные с ядром (так называемые свободные электроны), покидают свои орбиты и начинают упорядоченное движение, образуя поток электронов, или электрический ток. Возникает электрическая проводимость.

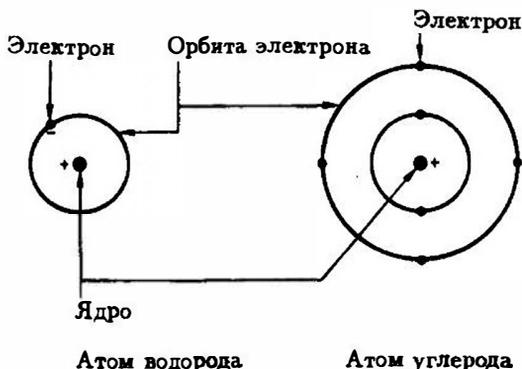


Рис. 20.1. Атомы состоят из отрицательно заряженных электронов, вращающихся вокруг положительного ядра.



Рис. 20.2. Проводники, полупроводники и изоляторы.

Хороший проводник имеет большое число «несвязанных», или свободных, электронов, которые способствуют возникновению электрического тока. Хороший проводник обладает столь малым сопротивлением, что им можно пренебречь. Примерами могут служить серебро, медь или алюминий (рис. 20.2).

Изолятор — это материал, имеющий очень малое количество свободных электронов. Изоляторы препятствуют протеканию электрического тока и, следовательно, обладают очень большим сопротивлением, приближающимся к сопротивлению разомкнутой цепи. Примерами могут служить стекло, сухое дерево, резина, поливинилхлорид, слюда и полистирол.

Полупроводники

Атомы полупроводников сгруппированы в правильную структуру, называемую «кристаллической решеткой». Они не являются хорошими проводниками (откуда и их название), поскольку содержат очень мало свободных электронов. Количество свободных электронов возрастает при повышении температуры, что приводит к увеличению проводимости. Эти свободные электроны называют неосновными носителями.

Проводимость также может быть улучшена посредством добавления определенного количества примесей. Такие примеси, как атомы мышьяка, вносят в решетку дополнительные электроны, в результате чего получается полупроводник *n*-типа. Эти атомы называются *атомами-донорами*. Добавление атомов, называемых *атомами-акцепторами* (на-

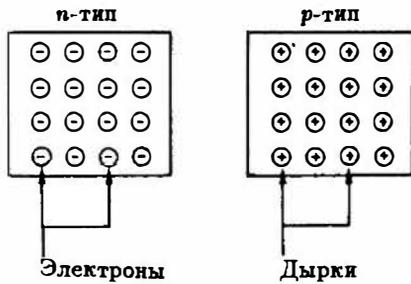


Рис. 20.3. Полупроводники n - и p -типа.

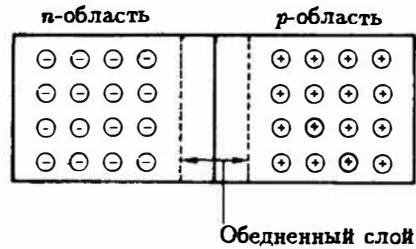


Рис. 20.4. Плоскостной диод с pn -переходом.

пример, атомов алюминия) приводит к недостатку электронов, или к образованию так называемых дырок, при этом получается полупроводник p -типа (рис. 20.3). Электроны и дырки, полученные при внедрении примесей, называют основными носителями.

Плоскостной диод

Если полупроводник p -типа соединить с полупроводником n -типа (рис. 20.4), то под действием *диффузии* электроны из области с проводимостью n -типа начнут перетекать в область с проводимостью p -типа, чтобы заполнить дырки в этой области. Перетекание электронов продолжается до тех пор, пока по обе стороны pn -перехода не образуется нейтральная зона, или так называемый *обедненный слой*. Этот обедненный слой приводит к возникновению потенциального барьера, препятствующего дальнейшему движению электронов через границу раздела.

Чтобы пересечь границу раздела, электроны должны теперь обладать энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера. Источником этой энергии может служить внешняя электродвижущая сила (ЭДС). Высота потенциального барьера зависит от типа применяемого полупроводника. Например, для германия (Ge) она составляет 0,3 В, а для кремния (Si) — 0,6 В.

Характеристики диода

При обратном включении диода (рис. 20.5) электроны области с проводимостью n -типа (n -области) притягиваются положительным полюсом источника напряжения смещения, а дырки p -области притягиваются отрицательным полюсом. В результате обедненный слой расширяется и увеличившийся потенциальный барьер еще сильнее препятствует проникновению электронов через границу раздела.

При прямом включении диода (рис. 20.6) обедненный слой исчезает и электроны получают возможность перетекать через границу раздела, т. е. ток, создаваемый основными носителями, свободно протекает через

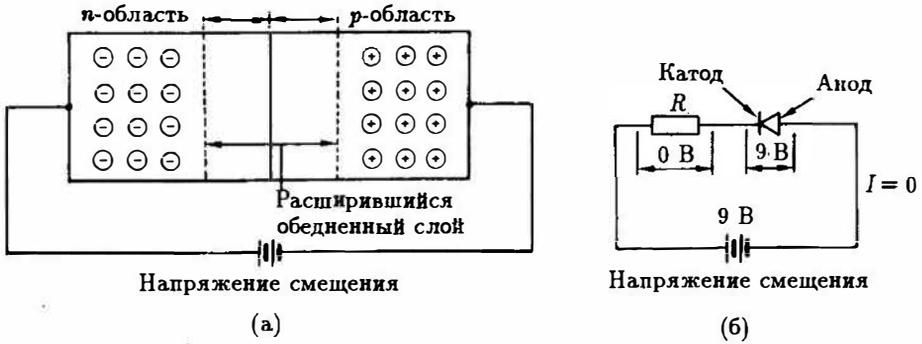


Рис. 20.5. Обратное включение диода. На рис. (а) видно, что обедненный слой расширился.

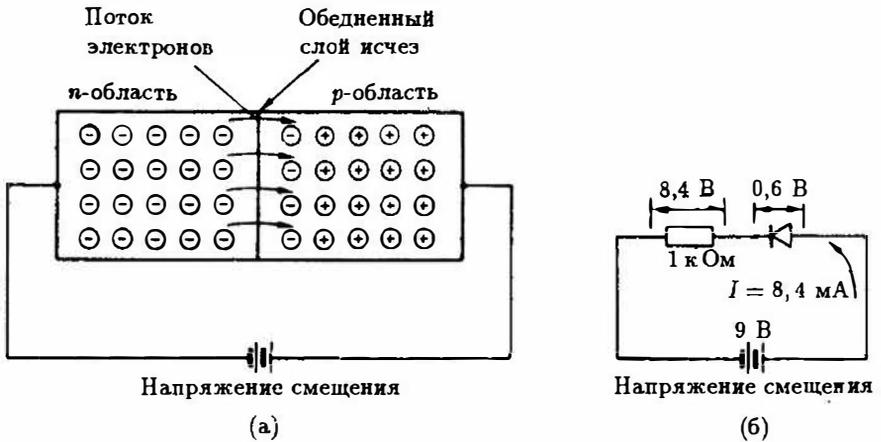


Рис. 20.6. Прямое включение диода. На рис. (а) показано исчезновение обедненного слоя.

диод. Но следует отметить, что на диоде существует постоянное падение напряжения, называемое падением напряжения при прямом включении или прямым напряжением диода (0,3 В для диодов из германия и 0,6 В для кремниевых диодов).

Характеристики плоскостного диода в случае прямого включения показаны на рис. 20.7. Заметим, что, как только напряжение смещения превысит потенциальный барьер диода, через него начинает протекать большой ток. При этом очень малое увеличение напряжения смещения приводит к сильному увеличению тока, протекающего через диод. При напряжениях ниже прямого напряжения через диод протекает малый ток утечки (несколько микроампер), которым обычно пренебрегают.

Характеристики диода в случае обратного включения показаны на рис. 20.8. При обратном включении через диод протекает очень малый

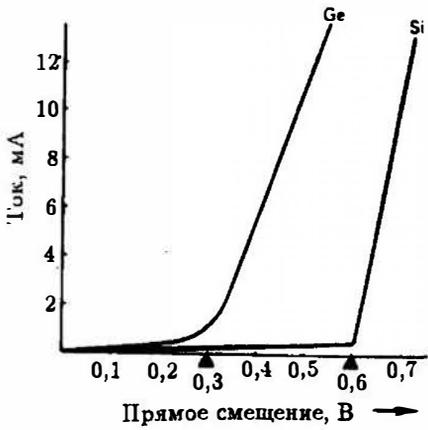


Рис. 20.7. Характеристики германиевого и кремниевого диодов при прямом включении.

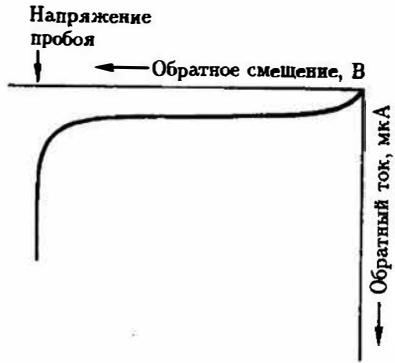


Рис. 20.8. Характеристики плоскостного диода в случае обратного включения.

ток, вызванный неосновными носителями. Величина этого обратного тока практически постоянна вплоть до достижения максимального напряжения, называемого напряжением пробоя *pn*-перехода или обратным пиковым напряжением. Если приложить еще большее напряжение, то наступает пробой и обратный ток резко возрастает, что приводит к разрушению диода. Поэтому при включении диода в схему следует убедиться, что обратное напряжение на нем не превысит напряжение пробоя, указанное изготовителем. Германиевые диоды имеют больший ток утечки и, следовательно, более низкое сопротивление при обратном включении, чем кремниевые диоды.

Транзисторы

Транзистор — это полупроводниковый прибор, составленный из двух *pn*-переходов, как показано на рис. 21.1. У транзистора три вывода: эмиттер, база и коллектор. Существуют два типа транзисторов: *pnp*-транзисторы (рис. 21.1(а)) и *npn*-транзисторы (рис. 21.1(б)). По принципу работы они ничем не отличаются друг от друга, за исключением полярности подаваемого постоянного напряжения смещения.

Рассмотрим транзистор *pnp*-типа (рис. 21.2). Переход база — эмиттер (или просто эмиттерный переход) этого транзистора смещен в прямом направлении напряжением V_{BE} , поэтому электроны из области эмиттера будут перетекать через этот переход в область базы, создавая ток I_e . Это обычный прямой ток *pn*-перехода, смещенного в прямом направлении. Как только электроны попадают в область базы, они начинают испытывать притяжение положительного потенциала коллектора. Если область базы сделать очень тонкой, то почти все эти электроны проскочат через нее к коллектору. Только очень малая часть электронов собирается базой, формируя базовый ток I_b . Фактически более 95% всех электронов эмиттерного тока I_e собираются коллектором и формируют коллекторный ток I_c транзистора. Таким образом,

$$I_e = I_c + I_b.$$

Так как базовый ток I_b очень мал (чаще всего он измеряется микроамперами), то им обычно пренебрегают. Тем самым предполагается, что токи I_c и I_e равны, и каждый из них принято называть током транзистора.

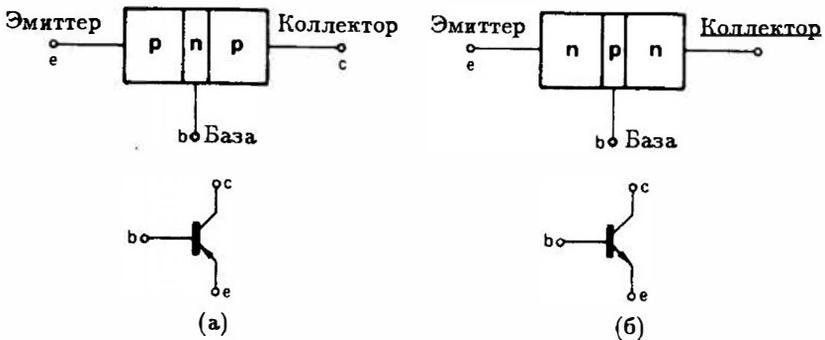


Рис. 21.1. Транзисторы и их условные обозначения: (а) *pnp*-тип, (б) *npn*-тип.

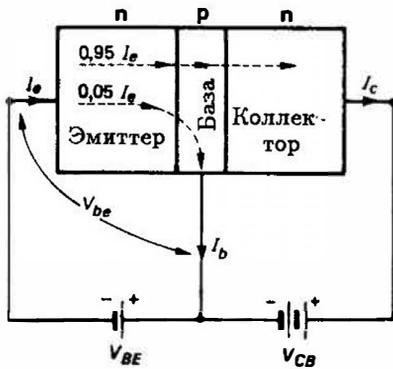


Рис. 21.2. Подача напряжений смещения *npn*-транзистора.

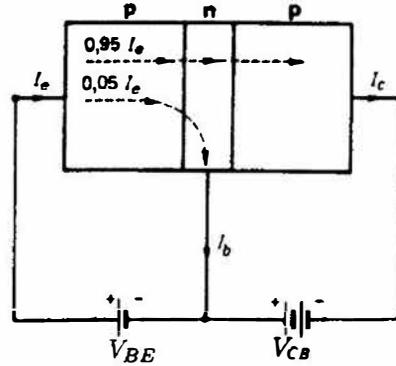


Рис. 21.3. Подача напряжений смещения *pnp*-транзистора.

Обратите внимание, что переход база — коллектор (или просто коллекторный переход) смещен в обратном направлении напряжением V_{CB} . Это необходимое условие работы транзистора, поскольку в противном случае электроны не притягивались бы к коллектору. При этом в соответствии с правилом выбора направления тока (от положительного потенциала к отрицательному) считается, что ток транзистора течет от коллектора к эмиттеру.

Для *pnp*-транзистора полярности подачи постоянных напряжений смещения должны быть изменены на обратные, как показано на рис. 21.3. В этом случае ток транзистора представляет собой перемещение дырок от эмиттера к коллектору или электронов от коллектора к эмиттеру.

Схемы включения транзистора

Имеются три основные схемы включения транзистора в электронные цепи.

1. Схема с *общим эмиттером* (ОЭ). Общим выводом здесь является эмиттер: входной сигнал подается между базой и эмиттером, а выходной сигнал снимается между коллектором и эмиттером (рис. 21.4). Эта схема получила наиболее широкое распространение из-за своей гибкости и высокого коэффициента усиления.
2. Схема с *общей базой* (ОБ). Базовый вывод транзистора является общим выводом для входного и выходного сигналов (рис. 21.5).
3. Схема с *общим коллектором* (ОК). В этой схеме общим выводом для входного и выходного сигналов является коллектор. Ее называют также эмиттерным повторителем (рис. 21.6).

Интересно, что на внутреннем уровне транзистор работает во всех схемах включения совершенно одинаково, тогда как внешнее поведение его

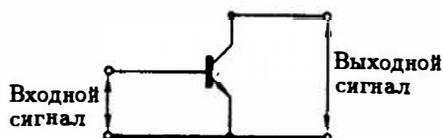


Рис. 21.4. Схема с общим эмиттером (ОЭ).



Рис. 21.5. Схема с общей базой (ОБ).

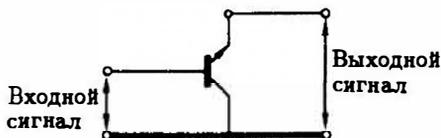


Рис. 21.6. Схема с общим коллектором (ОК). Обратите внимание, что выходной сигнал снимается с эмиттера.

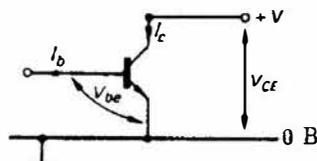


Рис. 21.7.

в каждом случае различно. Каждая схема включения характеризуется своим собственным набором основных параметров, в который входят коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления и АЧХ.

Характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером

Поведение транзистора в статических условиях, то есть в отсутствие входного сигнала, определяют характеристики трех типов.

1. *Входные характеристики*, или зависимости *входного* тока от *входного* напряжения.
2. *Выходные характеристики*, или зависимости *выходного* тока от *выходного* напряжения.
3. *Передаточные характеристики*, или зависимости *выходного* тока от *входного* тока.

Описываемые ниже характеристики относятся к *npn*-транзистору (рис. 21.7). Для *pnp*-транзистора нужно изменить полярность напряжения постоянного тока на отрицательную.

Входные характеристики

На рис. 21.8 представлены входные характеристики для *npn*-транзистора. Они ничем не отличаются от характеристик *pn*-перехода диода, смещенного в прямом направлении, поскольку вход (переход база — эмиттер)

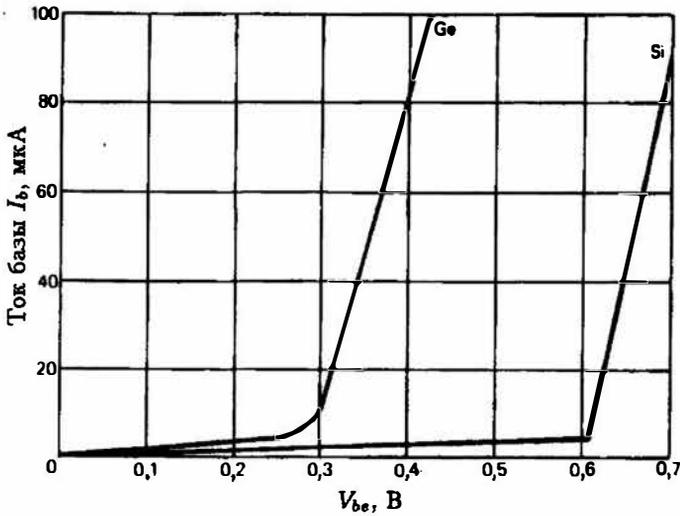


Рис. 21.8. Входные характеристики транзистора.

как раз и является таким переходом. Заметим, что, как и в диоде, входной ток I_b начинает протекать через эмиттерный переход только тогда, когда на этом переходе устанавливается требуемое значение прямого напряжения. Если это напряжение (0,3 В для Ge и 0,6 В для Si) установлено, то в дальнейшем напряжение V_{be} между базой и эмиттером практически не изменяется даже при сильном увеличении тока базы. Таким образом, транзистор можно рассматривать как токовый элемент, допускающий изменение входного тока при постоянном входном напряжении.

Выходные характеристики

На рис. 21.9 приведено семейство кривых, называемых выходными характеристиками транзистора, которые устанавливают связь тока коллектора (выходного тока) I_c с напряжением на коллекторе (выходным напряжением) V_{CE} для определенных значений тока базы (входного тока) I_b . Эти кривые устанавливают также взаимосвязь между входным током, с одной стороны, и выходным током и выходным напряжением — с другой. Например, для транзистора с выходными характеристиками, приведенными на рис. 21.9, при $I_b = 40$ мкА и $V_{CE} = 6$ В ток коллектора $I_c = 4$ мА. Это значение легко определяется из выходной характеристики, соответствующей выбранному току базы.

Характеристика для $I_b = 0$ соответствует транзистору в непроводящем состоянии, т. е. в состоянии отсечки, когда величина напряжения V_{BE} меньше требуемой величины прямого падения напряжения на эмит-



Рис. 21.9. Семейство выходных характеристик транзистора.

терном переходе. Теоретически ток транзистора равен нулю при $I_b = 0$; однако реально очень слабый ток утечки всегда протекает через коллекторный переход.

Статический коэффициент усиления тока β

Очень важным параметром любого транзистора является его коэффициент усиления по постоянному току, называемый статическим коэффициентом усиления тока. Это коэффициент усиления тока для транзистора, находящегося в статическом режиме, то есть в отсутствие входного сигнала. Статический коэффициент усиления тока является безразмерной величиной (отношение величин двух токов) и определяется по формуле

$$\beta = \frac{\text{Выходной ток}}{\text{Входной ток}} = \frac{I_c}{I_b}.$$

Величину β можно рассчитать с помощью выходных характеристик транзистора. Например, если транзистор работает в режиме, определяемом точкой Q (рабочая точка), при $I_b = 40$ мкА и $I_c = 4$ мА, то

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{4 \cdot 1000}{40} = 100.$$

Передаточные характеристики

Эти характеристики устанавливают взаимосвязь между входным и выходным токами транзистора (рис. 21.10). С помощью такой характеристики можно рассчитать статический коэффициент усиления тока. Например, если точка Q — рабочая точка транзистора, то

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{4 \cdot 1000}{40} = 100.$$

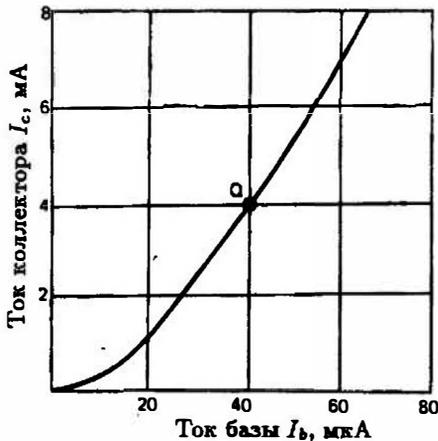


Рис. 21.10. Передаточная характеристика транзистора.

Усилитель с общим эмиттером

Прежде чем использовать транзистор в качестве усилителя, на него нужно подать правильные напряжения смещения (задать режим работы по постоянному току), как показано на рис. 22.1(а) для *npn*-транзистора. Два напряжения смещения — V_{BE} (обеспечивающее прямое смещение эмиттерного перехода) и V_{CB} (обеспечивающее обратное смещение коллекторного перехода) — подаются от последовательно соединенных источников. Эти источники можно заменить делителем напряжения $R_1 - R_2$, как показано на рис. 22.1(б). Теперь можно обойтись одним источником питания постоянного тока с напряжением V_{CC} . Отношение сопротивлений резисторов R_1 и R_2 выбирается таким, чтобы на базе транзистора устанавливалось требуемое значение напряжения смещения.

Протекание тока покоя $I_s = V_{CC}/(R_1 + R_2)$ через цепь смещения $R_1 - R_2$ связано с потреблением дополнительной мощности от источника питания. Для уменьшения тока покоя применяются высокоомные резисторы $R_1 - R_2$. Однако, как будет показано далее, очень большое сопротивление R_1 приводит к снижению стабильности транзистора по постоянному току.

Потенциал базы транзистора отсчитывается относительно провода с нулевым потенциалом или шасси (поэтому допустимо говорить «напря-

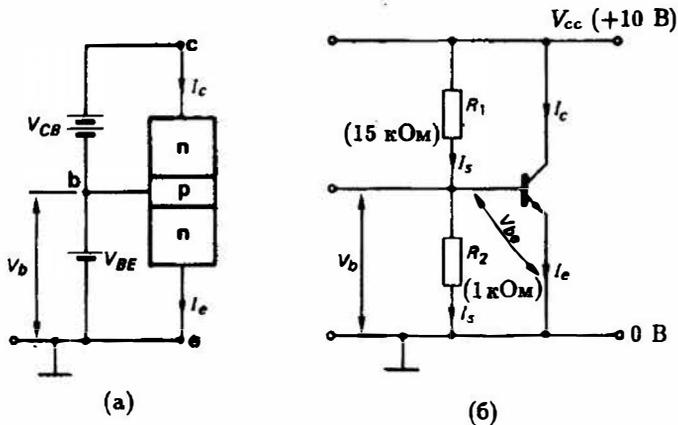
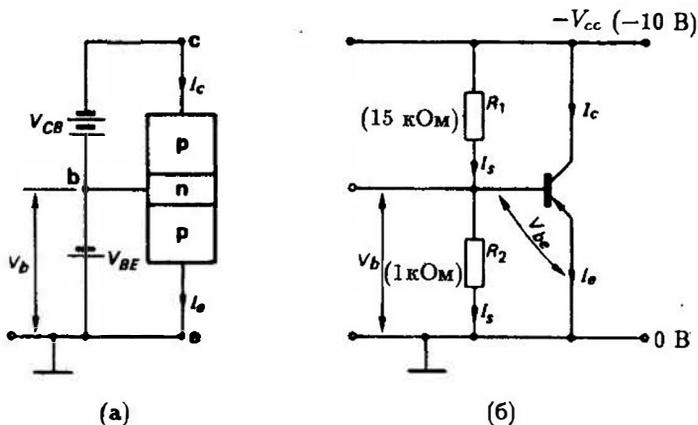


Рис. 22.1. Базовое смещение *npn*-транзистора.

Рис. 22.2. Базовое смещение *pnp*-транзистора.

жение на базе») и, следовательно, равен падению напряжения на резисторе R_2 .

$$\text{Потенциал базы } V_b = V_{R_2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2.$$

Например, при $V_{CC} = 10 \text{ В}$, $R_1 = 15 \text{ кОм}$, $R_2 = 1 \text{ кОм}$ получаем

$$V_b = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{10 \text{ В}}{15 \text{ кОм} + 1 \text{ кОм}} \cdot 1 \text{ кОм} = \frac{10}{16} \cdot 1 = 0,625 \text{ В}.$$

Изменяя номиналы резисторов R_1 и R_2 , можно изменять напряжение на базе.

Тот же самый способ смещения применяется и для *pnp*-транзистора (рис. 22.2). В этом случае используется источник питания с напряжением отрицательной полярности ($-V_{CC}$). Делитель напряжения $R_1 - R_2$ выполняет ту же функцию, что и в случае *pnp*-транзистора. Тот факт, что питающее напряжение отрицательно, нужно обязательно принимать во внимание, но в расчетах можно не учитывать. Таким образом,

$$V_b = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{10}{15 + 1} \cdot 1 = \frac{10}{16} = 0,625 \text{ В}.$$

Напряжение на базе равно $-0,625 \text{ В}$.

Для получения прямого смещения эмиттерного перехода потенциал базы должен быть «выше» потенциала эмиттера т. е. быть более положительным, чем эмиттер в *pnp*-транзисторе, и более отрицательным в *pnp*-транзисторе. Вообще, независимо от типа используемого транзистора потенциал базы всегда выше потенциала эмиттера, но ниже потенциала коллектора.

Как объяснялось в предыдущем разделе, величина тока, протекающего через транзистор, определяется напряжением прямого смещения

эмиттерного перехода, т. е. разностью потенциалов базы и эмиттера $V_{BE} = V_b - V_e$. Изменение потенциалов базы или эмиттера приводит к изменению тока транзистора. В рассматриваемой транзисторной схеме эмиттер имеет потенциал шасси, следовательно, изменяться может только потенциал базы. При этом

$$V_{BE} = 0,62 - 0 = 0,62 \text{ В.}$$

Например, если потенциал базы V_b возрастает относительно потенциала эмиттера (становится более положительным для *nnp*-транзистора или более отрицательным для *pnp*-транзистора), то разность потенциалов V_{BE} увеличивается, что приводит к увеличению тока транзистора. Уменьшение потенциала базы V_b относительно потенциала эмиттера сопровождается уменьшением величины V_{BE} и, следовательно, уменьшением тока транзистора.

Коллекторный (нагрузочный) резистор

Чтобы снять выходное напряжение с коллектора, в цепь коллектора включается нагрузочный резистор R_3 , называемый также коллекторным резистором (рис. 22.3). Коллекторный ток I_c , протекая через коллекторный резистор R_3 , создает на нем падение напряжения. Следовательно,

$$V_{R_3} = I_c \cdot R_3.$$

Так как все напряжения измеряются относительно шасси или потенциала земли, то коллекторное напряжение V_{CE} есть разность потенциалов между коллектором и шасси. Как видно из схемы,

$$V_{CC} = V_{R_3} + V_{CE},$$

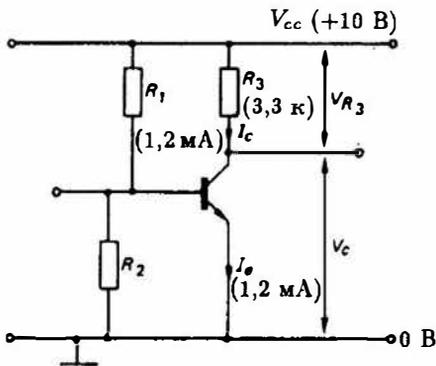
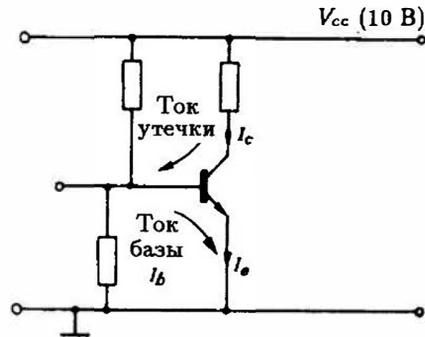
где V_{CC} — напряжение источника питания, следовательно, $V_{CE} = V_{CC} - V_{R_3}$. Для типичных величин, указанных на схеме, получаем

$$V_{R_3} = I_c \cdot R_3 = 1,2 \text{ мА} \cdot 3,3 \text{ кОм} = 4 \text{ В (приблизительно)},$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{R_3} = 10 - 4 = 6 \text{ В.}$$

Тепловой пробой

Как уже отмечалось, неосновные носители образуют так называемый ток утечки обратносмещенного перехода. Ток утечки I_{CBO} (часто называемый обратным коллекторным током) протекает через обратносмещенный коллекторный переход транзистора так, как показано на рис. 22.4. Этот ток усиливается точно так же, как входной (базовый) ток, с коэффициентом усиления β . При увеличении температуры транзистора ток утечки возрастает. Он усиливается транзистором и увеличивает коллекторный ток, что приводит к дальнейшему повышению температуры транзистора и, следовательно, тока утечки и т. д. Описанный процесс, называемый

Рис. 22.3. Нагрузочный резистор R_3 .Рис. 22.4. Ток утечки I_{CBO} .

тепловым пробоем, носит лавинообразный характер, и если его оставить без контроля, может привести к разрушению транзистора.

Стабилизация рабочего режима по постоянному току

В усилителе с ОЭ наличие тока утечки коллекторного перехода приводит к нестабильности режима работы транзистора по постоянному току (статического режима). Эту нестабильность можно преодолеть, включив резистор R_4 в эмиттерную цепь транзистора, как показано на рис. 22.5. Потенциал эмиттера в этом случае становится равным падению напряжения на резисторе R_4 , которое создается при протекании эмиттерного тока I_e через этот резистор. Таким образом, $V_e = I_e \cdot R_4$. Стабилизация режима по постоянному току осуществляется следующим образом.

Предположим, что из-за возрастания тока утечки увеличились токи I_c и I_e . Тогда вместе с ними увеличивается и потенциал эмиттера V_e . Поскольку $V_{BE} = V_b - V_e$, то увеличение V_e приводит к уменьшению V_{BE} . В результате уменьшается базовый ток, и величины токов I_c и I_e возвращаются к своим первоначальным значениям. С помощью эмиттерного резистора R_4 вводится отрицательная обратная связь, обеспечивающая стабилизацию статического режима усилителя. Используя типичные номиналы резисторов, указанные на рис. 22.5, и принимая ток эмиттера $I_e = 1,2$ мА, получаем

$$V_e = I_e \cdot R_4 = 1,2 \text{ мА} \cdot 1 \text{ кОм} = 1,2 \text{ В},$$

$$V_b = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{10 \text{ В}}{15 \text{ кОм} + 3,3 \text{ кОм}} \cdot 3,3 \text{ кОм} = \frac{10}{18,3} \cdot 3,3 = 1,8 \text{ В},$$

$$V_{BE} = V_b - V_e = 1,8 - 1,2 = 0,6 \text{ В}.$$

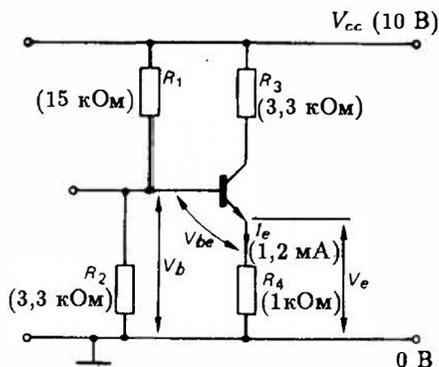


Рис. 22.5. Стабилизация усилителя с общим эмиттером на *pnp*-транзисторе с помощью резистора R_4 в цепи эмиттера.

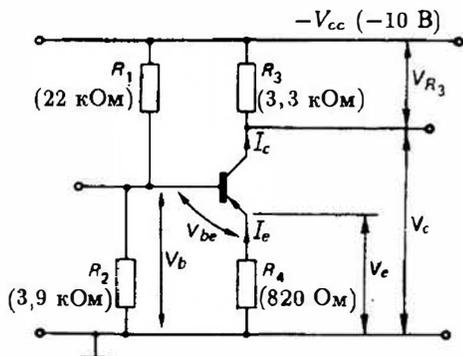


Рис. 22.6. Усилитель с общим эмиттером на *pnp*-транзисторе.

Применение *pnp*-транзисторов

На рис. 22.6 приведена схема усилителя на *pnp*-транзисторе. Пусть это будет кремниевый транзистор. Тогда его ток и напряжения на эмиттере, базе и коллекторе можно рассчитать следующим образом:

$$V_b = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{10 \text{ В}}{22 \text{ кОм} + 3,9 \text{ кОм}} \cdot 3,9 \text{ кОм} = \frac{10}{25,9} \cdot 3,9 = 1,5 \text{ В.}$$

Из соотношения $V_{BE} = V_b - V_e$ следует $V_e = V_b - V_{BE}$. Поскольку $V_{BE} = 0,6 \text{ В}$ (кремниевый транзистор) и $V_b = 1,5 \text{ В}$, то

$$V_e = 1,5 - 0,6 = 0,9 \text{ В.}$$

Учитывая, что $V_e = I_e \cdot R_4$, получаем

$$I_e = \frac{V_e}{R_4} = \frac{0,9 \text{ В}}{820 \text{ Ом}} = 1,1 \text{ мА,}$$

$$I_c \approx I_e = 1,1 \text{ мА,}$$

$$V_{R_3} = I_c \cdot R_3 = 1,1 \text{ мА} \cdot 3,3 \text{ кОм} = 3,6 \text{ В,}$$

$$V_c = V_{CC} - V_{R_3} = 10 - 3,6 = 6,4 \text{ В.}$$

Таким образом, статический режим работы транзистора определяется следующими условиями:

$$V_e = -0,9 \text{ В, } V_b = -1,5 \text{ В, } V_c = -6,4 \text{ В, } I_e = 1,1 \text{ мА.}$$

Приведенные значения напряжений на эмиттере, базе и коллекторе типичны для однокаскадных усилителей — УПЧ или предоконечных каскадов. Напряжение на базе равно примерно $0,1V_{CC}$, а на коллекторе — примерно $0,6V_{CC}$. Видно, что для транзисторов того и другого типа наименьшим по абсолютной величине является напряжение на эмиттере,

наибольшим — напряжение на коллекторе, а напряжение на базе примерно на 0,6 В (для кремниевого транзистора) «выше» напряжения на эмиттере.

Транзистор *npn*-типа в схеме усилителя с отрицательным напряжением питания

Можно использовать *npn*-транзистор в схеме усилителя, питаемого от источника с отрицательным напряжением $-V_{CC}$, как показано на рис. 22.7. В этом случае шасси играет роль положительной шины питания, и все напряжения в схеме отрицательны, поскольку они измеряются относительно положительного шасси. Используя типичные величины, указанные на схеме, и учитывая, что напряжение на базе V_b равно падению напряжения на резисторе R_1 , а напряжение на коллекторе — падению напряжения на резисторе R_3 , получаем

$$V_b = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = \frac{10}{15 + 3,3} \cdot 15 = \frac{10}{18,3} \cdot 15 = 8,2 \text{ В,}$$

$$V_c = I_c \cdot R_3 = 1,2 \text{ мА} \cdot 3,3 \text{ кОм} \approx 4 \text{ В,}$$

$$V_e = V_{CC} - V_{R_4} = V_{CC} - I_e \cdot R_4 = 10 - 1,2 \cdot 1 = 8,8 \text{ В.}$$

Таким образом, статический режим работы транзистора определяется следующими условиями: $V_e = -8,8 \text{ В}$, $V_b = -8,2 \text{ В}$, $V_c = -4 \text{ В}$.

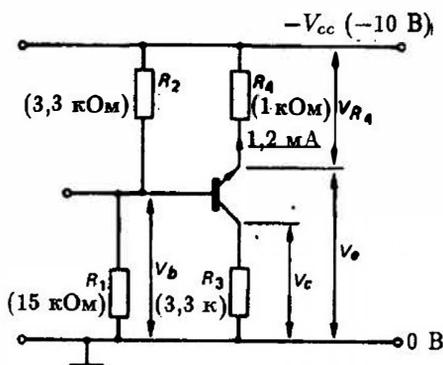


Рис. 22.7. Усилитель на *npn*-транзисторе с отрицательным напряжением питания $-V_{CC}$.

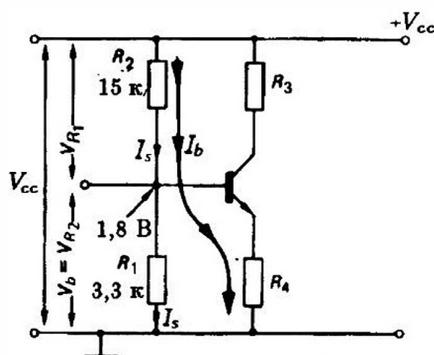


Рис. 22.8. Влияние базового тока I_b .

Базовый ток

Базовый ток I_b (рис. 22.8) течет от положительной шины источника питания через резистор R_1 и эмиттерный переход транзистора к эмиттеру. Таким образом, через резистор смещения R_1 протекают два тока: ток покоя

I_b (протекающий также через резистор R_2) и базовый ток (не протекающий через R_2). За счет базового тока падение напряжения на резисторе R_1 возрастает на величину $I_b R_1$. Поскольку $V_{R_1} + V_{R_2} = V_{CC}$, то увеличение V_{R_1} приводит к уменьшению V_{R_2} , т. е. к уменьшению напряжения на базе. В нормальных условиях ток I_b очень мал, и им можно пренебречь, считая, что V_b полностью определяется резистивным делителем $R_1 - R_2$.

Однако при большой величине базового тока (например, когда транзистор работает в сильноточном режиме) или при очень большом сопротивлении резистора R_1 изменение напряжения на базе, связанное с током I_b , начинает влиять на статические условия работы транзистора, и это изменение нужно принимать во внимание.

Рассмотрим схему на рис. 22.8. При нормальных условиях базовый ток, например 10 мкА, создает на резисторе R_1 падение напряжения $I_b \cdot R_1 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3 = 150 \cdot 10^{-3} = 0,15$ В. Как видим, это мало по сравнению с напряжением на базе 1,8 В, определяемым цепью смещения $R_1 - R_2$. Если теперь перевести транзистор в состояние высокой проводимости с большим пропускаемым током, то базовый ток также возрастет. Предположим, что он увеличится до 80 мкА. Тогда падение напряжения на резисторе R_1 , создаваемое таким базовым током, составит $80 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3 = 80 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 1,2$ В. На эту величину, т. е. от 1,8 В до 0,6 В, уменьшится напряжение на базе транзистора.

Смещение базовым током

Базовый ток можно использовать для задания нормального смещения транзистора, как показано на рис. 22.9. В этой схеме резистор R_2 исключен и используется только резистор R_1 с очень большим сопротивлением. Ток I_b теперь полностью определяет падение напряжения на этом резисторе (ток покоя отсутствует). Величина этого падения напряжения достаточна для создания нормального смещения.

Для базового тока величиной 10 мкА (рис. 22.9) напряжение на базе рассчитывается следующим образом:

$$V_{R_1} = I_b \cdot R_1 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 390 \cdot 10^3 = 3,9 \text{ В.}$$

Напряжение на базе — это напряжение между базой и шасси, т. е.

$$V_b = V_{CC} - V_{R_1} = 6 - 3,9 = 2,1 \text{ В.}$$

Преимущество схемы на рис. 22.9 — высокое входное сопротивление, обусловленное отсутствием резистора R_2 , шунтирующего вход, недостаток — полное отсутствие стабильности по постоянному току.

Отсечка и насыщение

Говорят, что транзистор находится в состоянии отсечки, когда он перестает проводить, т. е. когда его ток равен нулю. При $I_e = 0$ падение

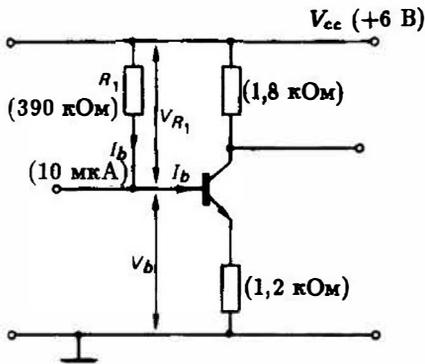


Рис. 22.9. Смещение базовым током.

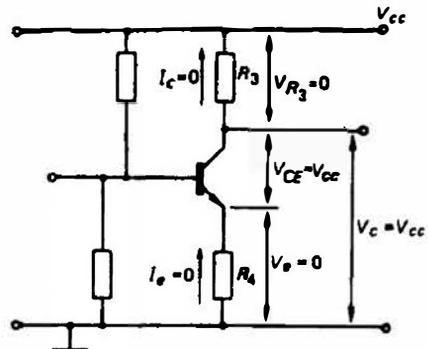


Рис. 22.10. Условие отсечки транзистора: $V_e = 0$ В, $V_c = V_{CC}$.

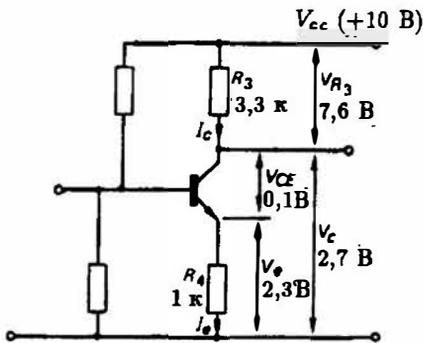


Рис. 22.11. Условие насыщения транзистора: $V_e \approx V_c$.

напряжения на резисторе R_4 отсутствует (рис. 22.10). Следовательно, напряжение на эмиттере ($V_e = I_e R_4$) также равно нулю. Поскольку $I_c = 0$, то падение напряжения на резисторе R_3 ($V_{R_3} = I_c R_3$) отсутствует и напряжение на коллекторе равно напряжению питания V_{CC} . Таким образом, напряжение между коллектором и эмиттером $V_{CE} = V_c - V_e$ также равно напряжению питания V_{CC} .

Говорят также, что транзистор находится в состоянии насыщения, когда пропускаемый им ток настолько велик, что дальнейшее увеличение этого тока невозможно, т. е. когда I_e и I_c достигают своих максимальных значений. При увеличении I_e увеличивается также V_e (рис. 22.11). При увеличении I_c возрастает падение напряжения на резисторе R_3 , что приводит к уменьшению напряжения на коллекторе относительно V_{CC} и приближению его к напряжению на эмиттере ($V_c = V_{CC} - V_{R_3}$). Таким образом, при увеличении тока транзистора напряжения на эмиттере и коллекторе приближаются друг к другу. В состоянии насыщения, когда ток транзистора максимален, напряжения V_e и V_c становятся практиче-

ски одинаковыми, т. е. V_{CE} практически равно нулю. На рис. 22.11 указаны типичные значения напряжений в схеме, когда транзистор находится в состоянии насыщения.

Таким образом, транзистор можно использовать в качестве *ключа* (рис. 22.12):

ключ ЗАМКНУТ — транзистор в состоянии насыщения,
 ключ РАЗОМКНУТ — транзистор в состоянии отсечки.

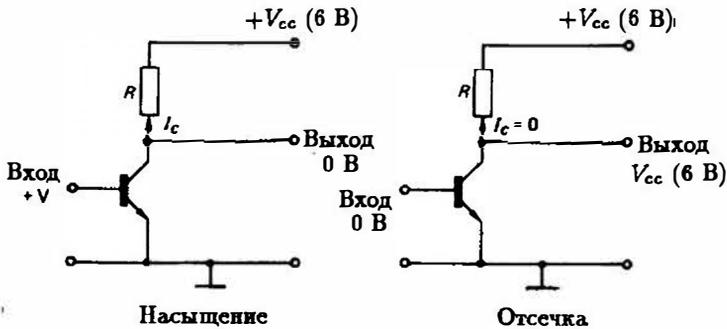


Рис. 22.12. Транзисторный ключ.

Усилитель с общим эмиттером — режим усиления переменного тока

Разделительный конденсатор

Создание связи по переменному току необходимо, чтобы запретить протекание постоянного тока между определенными точками схемы и обеспечить при этом свободное прохождение переменного тока. Электронные компоненты, обеспечивающие связь по переменному току, например конденсаторы или трансформаторы, обычно устанавливаются на входе и выходе усилителя. Таким образом, заданный режим покоя (статический режим) транзистора не влияет на статические режимы предыдущего и последующего каскадов.

В схеме, приведенной на рис. 23.1, конденсатор связывает точки А и В по переменному току, а R — нагрузочный резистор. Для постоянного тока конденсатор действует как разрыв цепи, полностью блокируя протекание постоянного тока между точками А и В. По этой причине конденсатор связи называют *блокировочным* или *разделительным* конденсатором.

Удовлетворительное качество связи по переменному току достигается только в том случае, когда реактивное сопротивление X_c конденсатора на рабочей частоте много меньше сопротивления нагрузочного резистора R . Тогда на этом конденсаторе падает (и теряется) очень малая часть напряжения входного сигнала. Например, если $V_{вх} = 100$ мВ, то связь по переменному току можно считать удовлетворительной, когда выходное напряжение $V_{вых} = 95$ мВ и на разделительном конденсаторе падает 5 мВ (5%). Требуемую емкость разделительного конденсатора определяют два фактора.

1. *Сопротивление нагрузочного резистора R* . Считая, что удовлетворительная связь по переменному току достигается, когда $X_c = R/20$, для $R = 1$ кОм получаем

$$X_c = \frac{R}{20} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ Ом.}$$

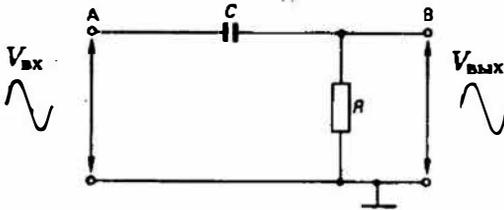


Рис. 23.1. Установка разделительного конденсатора.

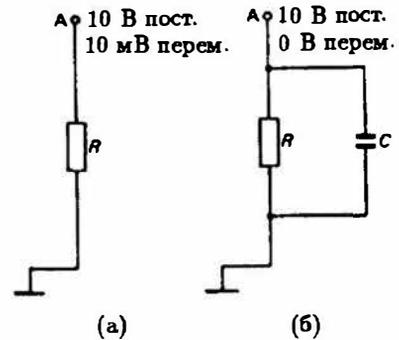


Рис. 23.2. Влияние развязывающего конденсатора. Указаны потенциалы точки А без развязывающего конденсатора (а) и с развязывающим конденсатором (б).

Предположим, что рабочая частота $f = 300$ Гц. Поскольку $X_c = 1/2\pi f C_1$, то

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 50} \approx 10 \text{ мкФ.}$$

Если сопротивление нагрузочного резистора увеличить до 100 кОм, то

$$X_c = \frac{R}{20} = \frac{1}{20} \cdot 100 \text{ кОм} = 5 \text{ кОм,}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 5 \cdot 10^3} \approx 0,1 \text{ мкФ.}$$

Таким образом, если сопротивление нагрузочного резистора увеличить в 100 раз (с 1 кОм до 100 кОм), то емкость разделительного конденсатора можно уменьшить в той же пропорции (с 10 мкФ до 0,1 мкФ).

Вообще, чем больше сопротивление нагрузочного резистора, тем меньше требуется емкость разделительного конденсатора.

2. *Рабочая частота.* Возьмем в качестве исходного вышеприведенный пример, где удовлетворительная связь по переменному току достигалась при $C = 10$ мкФ и $R = 1$ кОм для $f = 300$ Гц.

Если теперь рабочую частоту увеличить до 300 кГц, то с учетом условия $X_c = R/20 = 50$ Ом получаем

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 300 \cdot 10^3 \cdot 50} \approx 0,01 \text{ мкФ.}$$

Таким образом, если рабочую частоту увеличить в 1000 раз (с 300 Гц до 300 кГц), то емкость разделительного конденсатора можно уменьшить в 1000 раз (с 10 мкФ до 0,01 мкФ).

Вообще, при заданном сопротивлении нагрузочного резистора для низких рабочих частот необходимо использовать разделительные конденсаторы большой емкости, и наоборот.

Когда речь идет о рабочем диапазоне частот, емкость разделительного конденсатора определяется наименьшей частотой из этого диапазона. Обращаясь к рассмотренным выше примерам, мы видим, что конденсатор емкостью 10 мкФ в соответствии с расчетами обеспечивает адекватную связь по переменному току при частоте 300 Гц и тем более при частоте 300 кГц. С другой стороны, конденсатор емкостью 0,1 мкФ обеспечивает адекватную связь при частоте 300 кГц, но непригоден для реализации связи по переменному току при частоте 300 Гц.

Развязка

На рис. 23.2(б) показан конденсатор C , обеспечивающий развязку резистора R . В отсутствие конденсатора (рис. 23.2(а)) в точке А постоянный потенциал равен 10 В, а переменный потенциал сигнала — 10 мВ. Конденсатор, представляющий собой разрыв цепи для постоянного тока, не оказывает никакого влияния на постоянный потенциал точки А. Однако если емкость этого конденсатора такова, что на рабочей частоте его реактивное сопротивление существенно меньше сопротивления резистора R , то конденсатор будет эффективно осуществлять короткое замыкание сигнала переменного тока на землю. Таким образом, потенциал точки А по переменному току будет равен нулю. Емкость конденсатора C , обеспечивающая удовлетворительную развязку, определяется сопротивлением резистора R и рабочей частотой — по тем же самым формулам, которые использовались для расчета емкости разделительного конденсатора.

Усилитель с RC -связью

На рис. 23.3 приведена схема усилителя с RC -связью, где C_1 — входной разделительный конденсатор. Емкость этого конденсатора должна быть сравнительно велика в силу низкого входного сопротивления транзистора в схеме с ОЭ (это сопротивление становится еще меньше за счет шунтирования входа усилителя резистором R_2). Конденсатор C_2 связывает выход усилителя с нагрузкой или следующим каскадом, его емкость сравнима с емкостью конденсатора C_1 . Типичные значения емкостей разделительных конденсаторов следующие:

для звуковых частот: 10–50 мкФ,
для радиочастот: 0,01–0,1 мкФ.

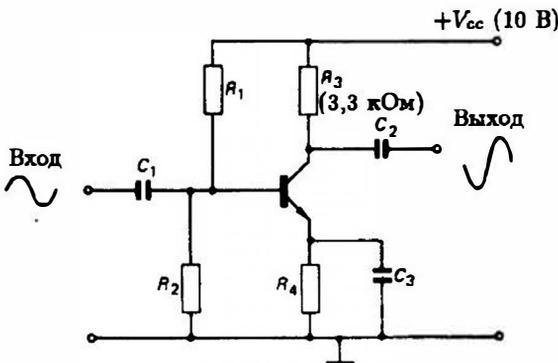


Рис. 23.3. Усилитель с RC -связью с развязывающим конденсатором C_3 в цепи эмиттера.

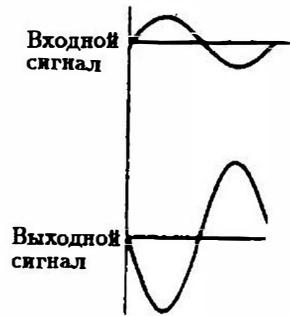


Рис. 23.4. Инвертирование (изменение на 180°) фазы сигнала в усилителе с ОЭ.

Развязывающий конденсатор

Отрицательная обратная связь через резистор R_4 в усилителе на рис. 23.3, с одной стороны, обеспечивает необходимую стабильность усилителя по постоянному току, а с другой стороны, снижает его коэффициент усиления до очень малой величины (2–3). Снижение коэффициента усиления связано с действием отрицательной обратной связи по переменному току, обусловленной падением напряжения сигнала на резисторе R_4 . Для устранения этой отрицательной обратной связи по переменному току и одновременного сохранения стабильности по постоянному току применяется эмиттерный развязывающий конденсатор C_3 .

Типичные значения емкости эмиттерного развязывающего конденсатора того же порядка, что и для разделительного конденсатора.

Усиление

Схема, приведенная на рис. 23.3, является законченной схемой однокаскадного усилителя с ОЭ. При подаче сигнала (например, синусоидальной формы) на вход усилителя этот сигнал передается через конденсатор C_1 на базу транзистора. В начале положительного полупериода входного сигнала потенциал базы возрастает относительно потенциала эмиттера, напряжение V_{BE} увеличивается, ток эмиттера I_e , а с ним и ток коллектора I_c возрастают, в результате уменьшается напряжение на коллекторе V_c . Это означает, что положительному полупериоду входного сигнала соответствует отрицательный полупериод выходного сигнала. С другой стороны, отрицательному полупериоду входного сигнала соответствует положительный полупериод изменения коллекторного напряжения. Таким образом, сигналы на входе и выходе усилителя противофазны, как показано на рис. 23.4. Усиление сигнала происходит в силу того, что очень малый размах напряжения V_{BE} приводит к большому размаху тока тран-

зистора, который, проходя через резистор R_3 , вызывает большой размах коллекторного напряжения.

Линия нагрузки

Выходные характеристики транзистора дают общее представление о работе транзистора. Для того чтобы получить представление о работе транзистора в конкретной схеме, нужно начертить линию нагрузки. На рис. 23.5 изображены семейство выходных характеристик транзистора, работающего в схеме усилителя на рис. 23.3, и линия нагрузки ХУ.

Прежде чем проводить линию нагрузки, нужно сначала зафиксировать две точки, попадающие на эту линию. Лучше всего использовать точку Х на оси x , где ток $I_c = 0$, и точку У на оси y , где $V_c = 0$. Через эти две точки проводится прямая линия — линия нагрузки. Предполагается, что $V_c = V_{CE}$.

Точка Х. В этой точке ток транзистора $I_c = 0$. Транзистор находится в состоянии отсечки. Следовательно, напряжение на коллекторе $V_c = V_{CC}$.

Точка У. Здесь коллекторное напряжение $V_c = 0$. Подставляя $V_c = 0$ в уравнение $V_{CC} = V_c + V_{R_3}$, получаем $V_{CC} = V_{R_3}$. Но $V_{R_3} = I_c R_3$, поэтому $V_{CC} = I_c R_3$. Следовательно,

$$I_c = V_{CC} / R_3.$$

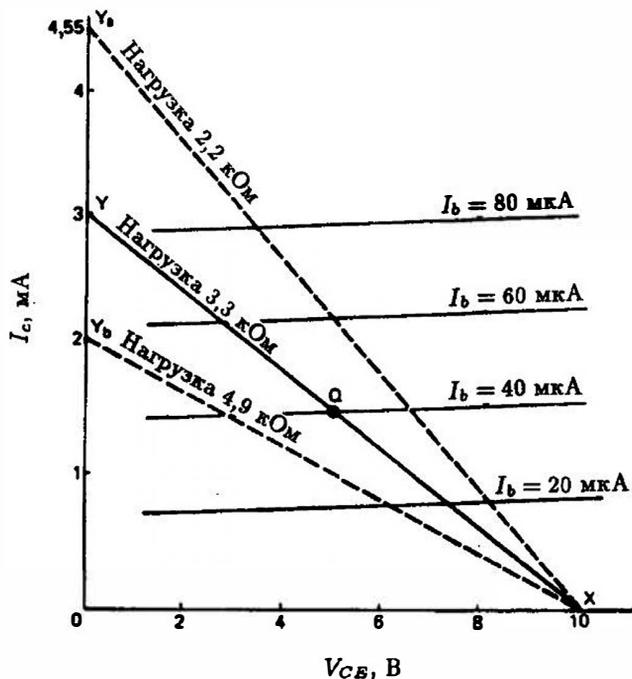


Рис. 23.5. Линия нагрузки.

Для величин, указанных на рис. 23.3, положение точек X и Y будет определяться следующими параметрами:

$$\text{Точка X } I_c = 0, \quad V_c = V_{CC} = 10 \text{ В.}$$

$$\text{Точка Y } V_c = 0, \quad I_c = V_{CC}/R_3 = 10/3,3 = 3 \text{ мА.}$$

Таким образом, XY — это линия нагрузки для нагрузочного резистора с сопротивлением $R_3 = 3,3 \text{ кОм}$.

При использовании нагрузочного резистора меньшего номинала (2,2 кОм) получаем линию нагрузки XY_a. Положение точки X не изменяется по сравнению с предыдущим случаем, поскольку напряжение V_{CC} остается тем же самым — 10 В. Для точки Y_a получаем $I_c = V_{CC}/R_3 = 10 \text{ В}/2,2 \text{ кОм} = 4,55 \text{ мА}$.

Нагрузочному резистору более высокого номинала, например 4,9 кОм, соответствует линия нагрузки XY_b с точкой Y_b при $I_c = 10 \text{ В}/4,9 \text{ кОм} \approx 2 \text{ мА}$.

Графический анализ

Процесс усиления сигнала осуществляется вдоль линии нагрузки и может быть представлен графически, как показано на рис. 23.6. Точка Q есть

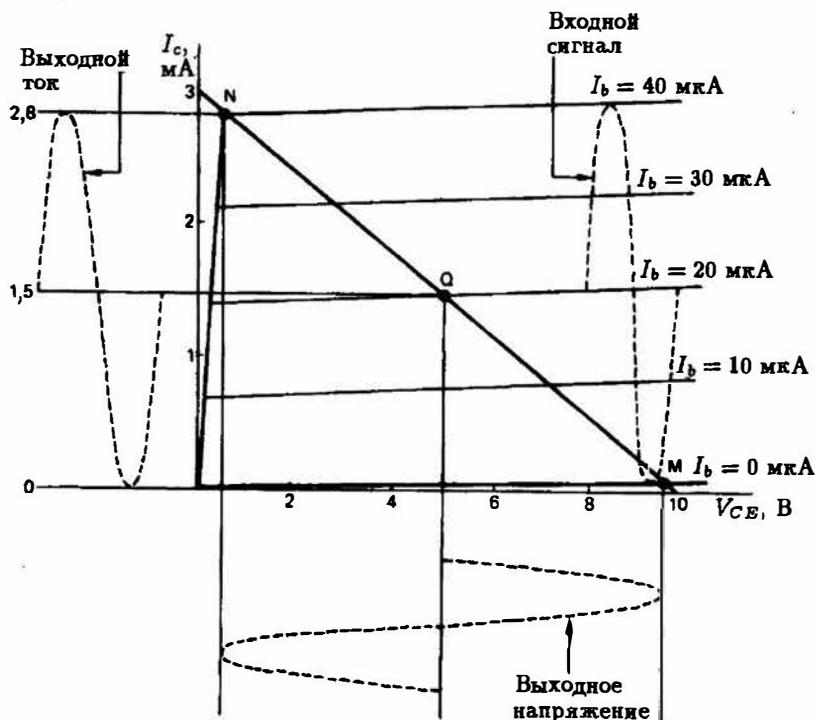


Рис. 23.6. Графическое представление работы усилителя.

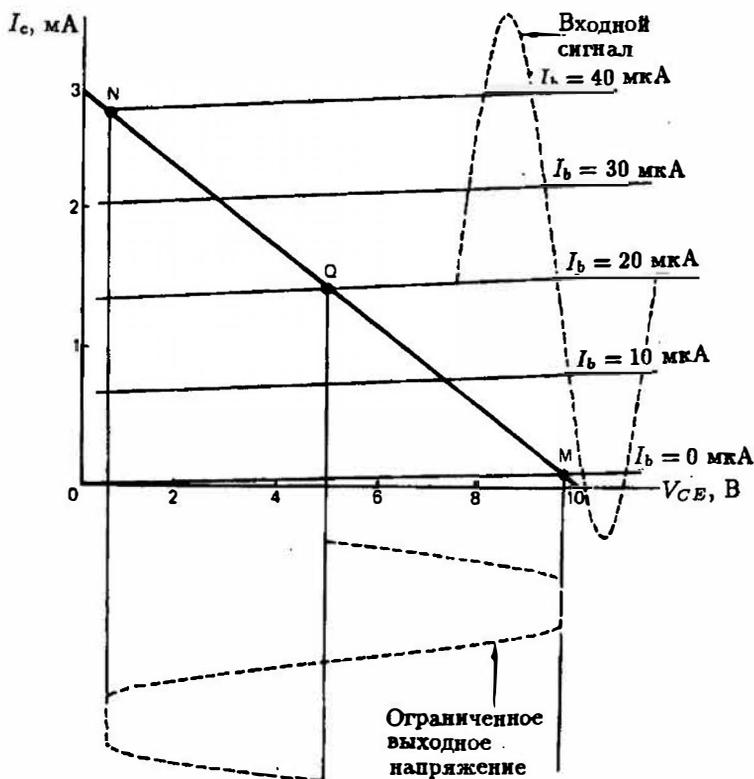


Рис. 23.7. Перегрузка усилителя, приводящая к ограничению выходного сигнала.

статическая рабочая точка, представляющая режим работы усилителя по постоянному току, т. е. в отсутствие сигнала. Рабочая точка задает смещение транзистора в статическом режиме. В рассматриваемом случае смещение определяется следующими величинами:

$$I_b = 20 \text{ мкА}, \quad I_c = 1,5 \text{ мА}, \quad V_c = 5 \text{ В}.$$

При подаче сигнала базовый ток изменяется по синусоиде с амплитудой 20 мкА (от 0 до 40 мкА). Это приводит к изменению коллекторного тока I_c с размахом 2,8 мА и изменению коллекторного напряжения с размахом около 9 В.

С одной стороны размах входного сигнала ограничен линией $I_b = 0$, соответствующей отсечке транзистора (точка M на линии нагрузки), а с другой стороны — линией $I_b = 40$ мкА, соответствующей насыщению транзистора (точка N на линии нагрузки). Для рассматриваемого усилителя рабочая точка Q выбирается в середине линии нагрузки. В этом случае при подаче сигнала с амплитудой 20 мкА на базу транзистора базовый ток изменяется в пределах от 0 до 40 мкА, обеспечивая мак-

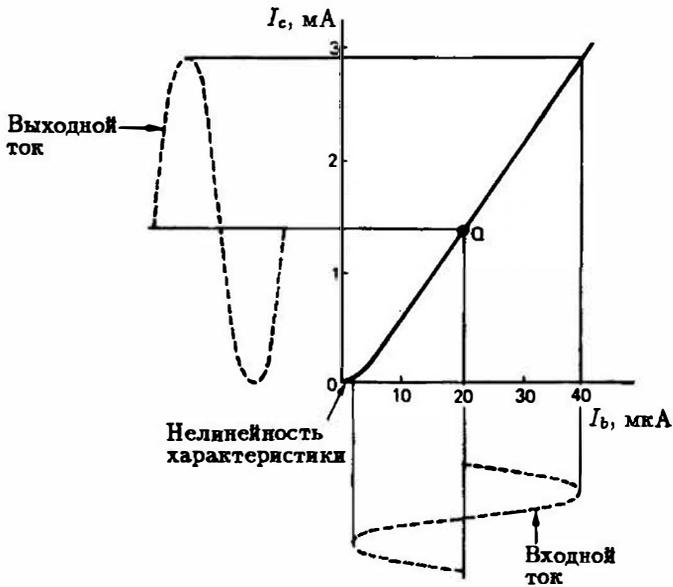


Рис. 23.8. Графическое представление работы усилителя с использованием передаточной характеристики.

симальную величину неискаженного выходного сигнала. Любая попытка превышения этой величины входного сигнала приводит к искажению формы выходного сигнала. Это хорошо видно на рис. 23.7, где иллюстрируется случай перегрузки усилителя с результирующим ограничением синусоидального сигнала. Входной и выходной сигналы могут быть также представлены графически с помощью передаточной характеристики транзистора (рис. 23.8). Рабочий диапазон усилителя ограничен линейным участком характеристики передачи, выход за границы этого участка приводит к искажениям.

Усилитель с трансформаторной связью

Межкаскадная связь в усилителе может осуществляться с помощью трансформатора, как показано на рис. 23.9. Резисторы R_1 и R_2 образуют цепь смещения транзистора T_2 (цепь смещения транзистора T_1 не показана). Конденсатор C_1 выполняет функцию развязывающего конденсатора в цепи смещения, предотвращая возникновение падения напряжения любого переменного сигнала на резисторе смещения R_2 . R_3 — эмиттерный резистор и C_2 — эмиттерный развязывающий конденсатор. Первичные обмотки L_1 и L_3 двух трансформаторов являются коллекторными нагрузками для транзисторов T_1 и T_2 соответственно. Так как обмотки трансформатора имеют очень малое сопротивление для постоянного тока, то постоянное напряжение на коллекторе практически равно на-

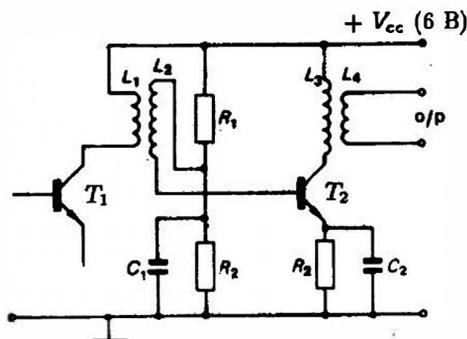


Рис. 23.9. Усилитель с трансформаторной связью.

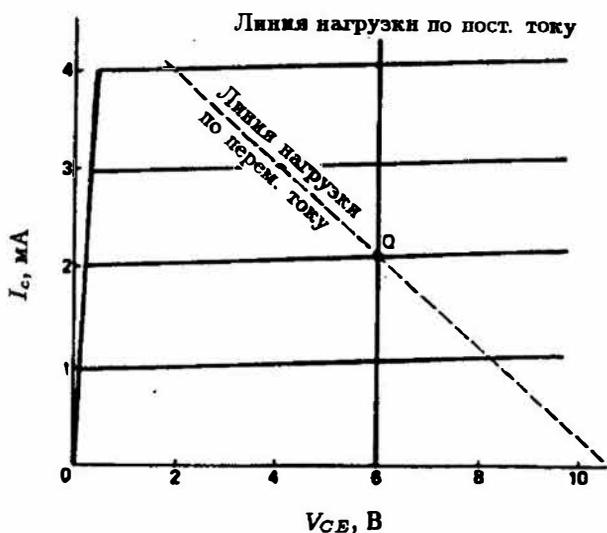


Рис. 23.10. Линии нагрузки по постоянному и переменному току для усилителя с трансформаторной связью.

пряжению питания V_{CC} . Переменный сигнал создает на обмотке падение напряжения, обусловленное ее сопротивлением по переменному току, т. е. ее реактивным сопротивлением. Таким образом, в данном случае можно провести две линии нагрузки — одну по постоянному току и другую по переменному, как показано на рис. 23.10. Если напряжение питания равно 6 В, то линия нагрузки по постоянному току является вертикальной линией, представляющей постоянное напряжение на коллекторе величиной 6 В. Линия нагрузки по переменному току представляет работу усилителя при подаче сигнала. Эти линии пересекаются в статической рабочей точке Q.

Сравнение усилителей с RC -связью и с трансформаторной связью

RC -связь широко используется в электронике, поскольку она обеспечивает высокое усиление, лучшие частотные характеристики, дешевизну и компактность используемых компонентов. Трансформаторы, напротив, имеют большие габариты и дороги. Однако трансформаторная связь имеет два главных преимущества:

1. При использовании трансформаторной связи не нужен коллекторный резистор. Поэтому рассеяние мощности, т. е. потери энергии в форме тепла, мало по сравнению с усилителями с RC -связью. Другими словами, усилители с трансформаторной связью — более экономичны.
2. Трансформаторная связь упрощает согласование между каскадами (см. гл. 8). Если r_1 — выходное сопротивление транзистора T_1 и r_2 — входное сопротивление транзистора T_2 (рис. 23.11), то, как объяснялось в гл. 8,

$$\frac{T_1}{r_2} = n^2,$$

где $n = T_1/T_2$ — коэффициент трансформации. Не путать: в этой формуле T_1 и T_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно.

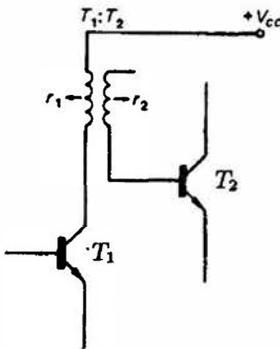


Рис. 23.11. Согласование каскадов с помощью трансформатора.

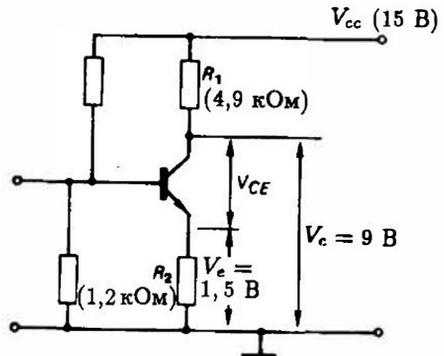


Рис. 23.12.

Мощность рассеяния

Транзисторы, как и все другие компоненты электронных схем, характеризуются некоторой номинальной (паспортной) рабочей мощностью, превышение которой может привести к разрушению транзистора.

Мощность, рассеиваемая транзистором, определяется произведением $I_c \cdot V_{CE}$ и измеряется в ваттах.

Рассмотрим, например, схему на рис. 23.12, где $V_c = 9$ В, $V_e = 1,5$ В. Имеем

$$V_{CE} = V_c - V_e = 9 - 1,5 = 7,5 \text{ В},$$

$$I_c = I_e = \frac{V_e}{R_2} = \frac{1,5 \text{ В}}{1,2 \text{ кОм}} = 1,25 \text{ мА}.$$

Отсюда мощность, рассеиваемая в транзисторе, равна

$$I_c \cdot V_{CE} = 1,25 \text{ мА} \cdot 7,5 \text{ В} = 9,4 \text{ мВт}.$$

Заметим, в нагрузочном резисторе рассеивается мощность

$$I_c^2 \cdot R_1 = (1,25 \text{ мА})^2 \cdot 4,9 \text{ кОм} = 7 \text{ мВт}.$$

Допустимая величина мощности, рассеиваемой транзистором, может быть представлена на выходных характеристиках гиперболой или кривой постоянной паспортной мощности рассеяния, как показано на рис. 23.13. Каждая точка этой кривой соответствует одной и той же мощности рассеяния. Рабочая точка транзистора Q должна выбираться или на самой кривой паспортной мощности рассеяния, или ниже этой кривой. Для обеспечения максимальной выходной мощности усиливаемого сигнала рабочая точка обычно выбирается на этой кривой.

Как видно из рис. 23.13, так называемая область безопасных режимов работы транзистора ограничена линией насыщения, линией отсечки ($I_b = 0$) и кривой паспортной мощности рассеяния транзистора. Эта область на рис. 23.13 отмечена штриховкой.



Рис. 23.13. Область безопасных режимов работы транзистора (заштрихована по краям).

Усилители с общей базой и общим коллектором

Усилитель с общей базой

На рис. 24.1 показан усилитель, где транзистор включен по схеме с общей базой (ОБ). Необходимое смещение создают два отдельных источника питания. Разделительный конденсатор C_1 обеспечивает передачу переменного входного сигнала на эмиттер транзистора (входное напряжение прикладывается между эмиттером и базой). Выходной сигнал снимается с нагрузочного резистора R_4 .

На рис. 24.2 приведена практическая схема усилителя промежуточной частоты с одним источником питания. Нагрузкой усилителя является резонансный контур C_3L_1 с трансформаторной связью. C_1 — входной разделительный конденсатор, резисторы R_1 и R_2 образуют цепь смещения по постоянному току, R_3 — эмиттерный резистор. Развязывающий конденсатор C_2 обеспечивает сохранение на базе транзистора нулевого потенциала по переменному току. В данном случае развязывающий конденсатор присоединен к положительной шине источника питания, а не к шасси. Это допустимо, поскольку по переменному току (то есть для переменного сигнала) потенциал этой шины равен нулю. Потенциалы положительной шины источника питания и шасси отличаются только по постоянному току.

Усилитель с ОБ имеет низкое входное сопротивление (50–100 Ом) и низкий коэффициент усиления по сравнению с усилителем по схеме с ОЭ. Преимущество этого усилителя — хорошие частотные характеристики (широкая полоса пропускания). Поэтому усилители с ОБ используются при очень высоких частотах, например в качестве усилителей РЧ в радиоприемниках и телевизорах, усилителей ПЧ в ЧМ-приемниках и т. д.

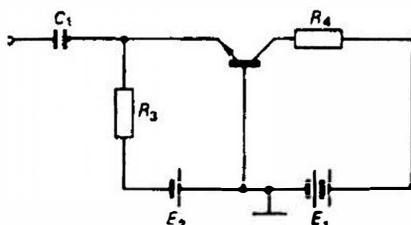


Рис. 24.1. Усилитель с ОБ. Источники питания E_1 и E_2 задают режим усилителя по постоянному току.

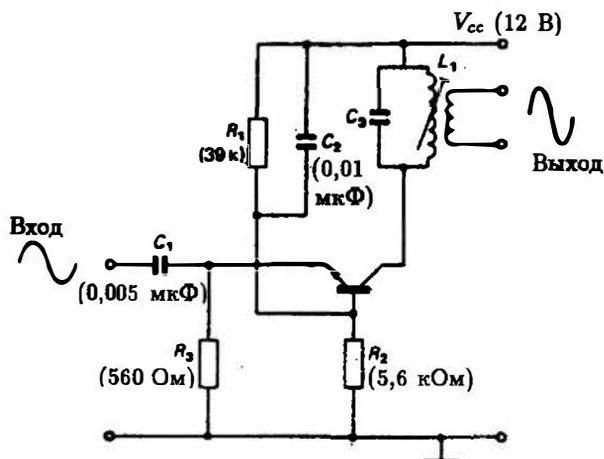


Рис. 24.2. Типичный УПЧ по схеме с ОБ.

Фазовые соотношения

При уменьшении входного сигнала потенциал эмиттера уменьшается относительно потенциала базы, ток I_c увеличивается и увеличивает падение напряжения на коллекторном резисторе. В результате уменьшается выходное напряжение. Таким образом, усилитель с ОБ не изменяет фазу входного сигнала при его усилении.

Усилитель с общим коллектором

На рис. 24.3(а) показан усилитель, где транзистор включен по схеме с общим коллектором. Здесь C_1 и C_2 — входной и выходной разделительные конденсаторы, резисторы R_1 и R_2 образуют цепь смещения по постоянному току. Коллекторный резистор отсутствует, так как выходной сигнал снимается с эмиттера. На рис. 24.3(б) представлен обычный способ изображения схемы усилителя с ОК. Выходной сигнал действует на эмиттерном резисторе R_3 , и поэтому данная схема называется *эмиттерным повторителем*. Эмиттерный повторитель имеет высокий коэффициент усиления по току и меньший единицы коэффициент усиления по напряжению. Такое значение коэффициента усиления по напряжению связано с действием 100%-ной отрицательной обратной связи через резистор R_3 .

Фазовые соотношения

При увеличении входного сигнала потенциал базы увеличивается относительно потенциала эмиттера, т. е. увеличивается напряжение V_{BE} , и соответственно увеличивается падение напряжения на эмиттерном резисторе, являющегося выходным напряжением. Таким образом, усилитель с ОК не изменяет фазу входного сигнала при его усилении.

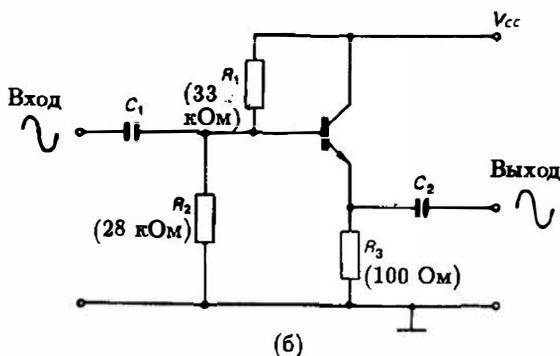
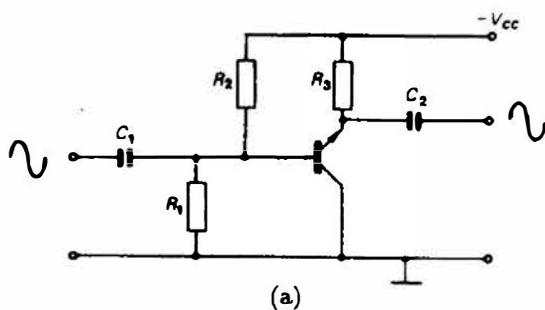


Рис. 24.3. Эмиттерный повторитель, или усилитель с ОК, (а) и стандартное изображение его схемы (б).

Таблица 24.1. Сравнение усилителей с ОЭ, ОБ и ОК

Конфигурация	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Инvertирование фазы	Преимущества
ОЭ	1-2 кОм	10-50 кОм	Да	Высокое усиление по току и мощности
ОБ	Очень низкое	Очень высокое	Нет	Хорошие частотные характеристики
ОК	Очень высокое	Очень низкое	Нет	Низкое выходное сопротивление, высокий коэффициент усиления по току

Фотоэлектрические приборы

Типы фотоэлектрических приборов

Электровакуумный фотоэлемент работает на принципе эмиссии электронов из катода при падении света на его поверхность.

Фоторезистор изменяет свое сопротивление в зависимости от интенсивности падающего на него света.

Фотогальванический элемент генерирует ЭДС, величина которой определяется интенсивностью света, падающего на поверхность элемента. Для фотогальванических элементов можно, например, использовать такой полупроводниковый материал, как селен. Элементы на основе селена вырабатывают ЭДС, достаточную для отклонения стрелки вольтметра, и могут применяться в качестве фотометров. Фотогальванические ячейки используются также в качестве источников питания для телефонных ретрансляторов и спутников связи. На их основе строятся солнечные батареи, преобразующие солнечный свет в электрическую энергию.

Фотодиоды и фототранзисторы. В фотодиоде *pn*-переход смещен в обратном направлении. Единственным током, протекающим через такой переход, является малый ток утечки, который рассматривается как помеха при обычном использовании диода. В фотодиоде этот ток становится рабочим током. Установлено, что ток утечки возрастает не только при увеличении температуры перехода, но и при освещении области перехода. Именно поэтому диоды и транзисторы помещают в непрозрачные корпуса. В отличие от обычных диодов в корпусе фотодиодов делают небольшое «окно», через которое свет может попадать на *pn*-переход, увеличивая ток утечки.

Фототранзисторы работают на том же принципе, что и фотодиоды. Облучаемым переходом в этом случае является обратносмещенный переход база — коллектор. Преимущество фототранзистора заключается в том, что дополнительный ток утечки, вызываемый светом, усиливается транзистором и становится достаточным для отклонения стрелки вольтметра, как и в случае фотометра. На рис. 25.1 показана схема включения фототранзистора. Несколько совместно работающих фототранзисторов могут быть использованы для управления электродвигателем.

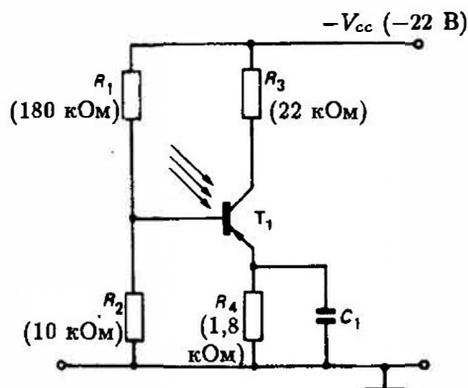


Рис. 25.1. Схема включения фототранзистора.

Светоизлучающий диод

В прямосмещенном pn -переходе электроны, приходящие из n -области, инжектируются в p -область. Некоторые из этих электронов рекомбинируют с дырками в p -области. Такая рекомбинация приводит к выделению энергии в форме видимого света. Эффективность генерации света и большая интенсивность светового пучка достигаются за счет использования вместо кремния и германия полупроводниковых материалов на основе галлия и мышьяка. Приборы, работающие на принципе генерации света при протекании тока через pn -переход, называются светоизлучающими диодами (СИД) и обозначаются на схемах так, как показано на рис. 25.2. Длина волны излучаемого света, то есть цвет излучения, зависит от используемого материала. Наиболее распространены СИД красного и зеленого свечения.



Рис. 25.2.

Оптроны, или оптические вентили

Одним из важных применений светоизлучающих диодов и фоточувствительных элементов, таких, как фотодиоды или фототранзисторы, является оптическая связь. В своем простейшем виде оптрон, или оптический вентиль, состоит из СИД, испускающего излучение инфракрасного диапазона, и фоточувствительного элемента, регистрирующего это излучение. Как СИД, так и фоточувствительный элемент размещаются в одном корпусе (рис. 25.3).

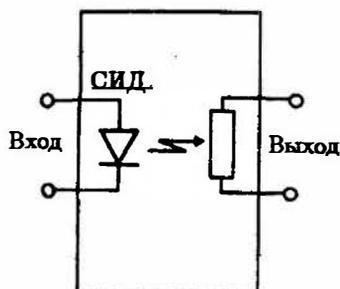


Рис. 25.3.

Оптическая связь имеет большие преимущества по сравнению с трансформаторной связью в тех применениях, где решаются задачи эффективной коммутации и прерывания сигналов. Оптическая связь обладает высокой помехоустойчивостью, невосприимчива к наводкам переменного тока, переходным процессам, выбросам. Передача сигнала осуществляется в одном направлении, в результате любые изменения нагрузочных условий не оказывают никакого влияния на входные параметры (полная развязка выхода и входа). Кроме того, оптроны превосходят развязывающие трансформаторы и реле по быстродействию.

Полевые транзисторы

Полевые транзисторы — это полупроводниковые приборы, которые становятся все более популярными в современной электронике. Их работа основана на использовании полупроводникового токонесущего канала, сопротивление которого управляется электрическим полем. Тем самым обеспечивается управление величиной тока, протекающего по каналу.

Полевые транзисторы называют также *униполярными* транзисторами, поскольку перенос заряда в них осуществляется только основными носителями. Ток этих носителей протекает в полупроводнике только одного типа — или *n*-типа, или *p*-типа. В отличие от полевого транзистора работа обычного транзистора основана на переносе как неосновных, так и основных носителей заряда. Это связано с тем, что ток в них протекает через прямосмещенный переход база–эмиттер (основные носители) и обратносмещенный переход база–коллектор (неосновные носители). Поэтому обычные транзисторы называют *биполярными* транзисторами.

У полевого транзистора три электрода: исток *s* (*source*), затвор *g* (*gate*) и сток *d* (*drain*). Эти электроды соответствуют эмиттеру, базе и коллектору биполярного транзистора.

Полевые транзисторы малы по размерам и имеют очень высокое входное сопротивление. Они менее чувствительны к изменениям температуры по сравнению с биполярными транзисторами и поэтому менее склонны к тепловому пробоему. Следует также отметить простоту разработки схем на основе полевых транзисторов, в которых используется меньше компонентов, чем в аналогичных схемах на биполярных транзисторах.

Полевые транзисторы просты в изготовлении и лучше подходят для использования в интегральных схемах, чем их собратья — биполярные транзисторы.

Существуют два типа полевых транзисторов: транзисторы с управляющим *pn*-переходом и транзисторы со структурой металл–оксид–полупроводник (МОП-транзистор).

Транзистор с управляющим *pn*-переходом

Рассмотрим канал из полупроводника *n*-типа (канал *n*-типа), к которому приложено постоянное напряжение V_{DD} (рис. 26.1(а)). По каналу от стока к истоку будет протекать ток, называемый током стока I_d . Если теперь внутри *n*-канала путем диффузии создать область *p*-типа, называемую затвором (рис. 26.1(б)), то образуется *pn*-переход. Точно так же, как и в случае обычного *pn*-перехода, в области перехода формируется слой,

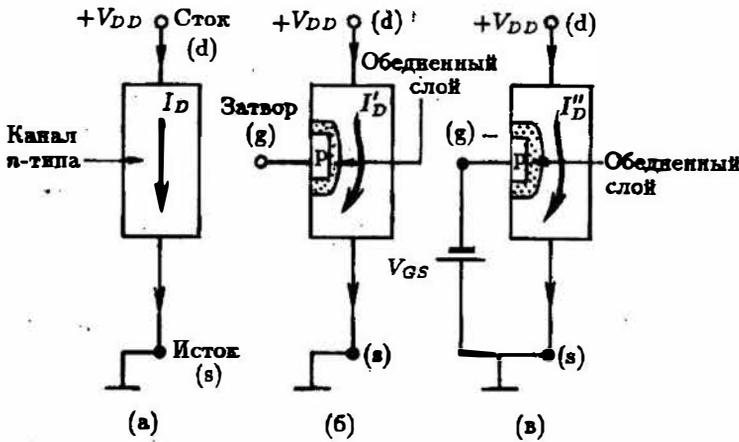


Рис. 26.1. Принцип работы полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом.

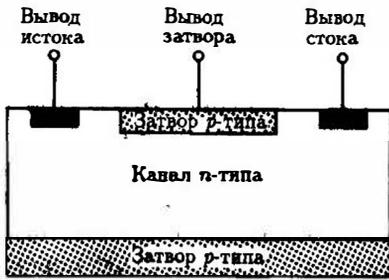


Рис. 26.2. Поперечное сечение структуры полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом.

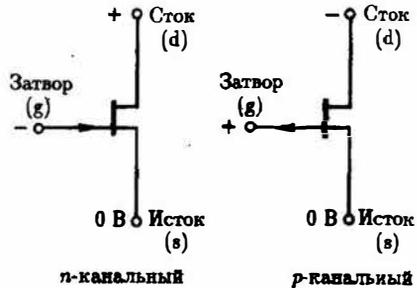


Рис. 26.3. Условные обозначения транзисторов с управляющим *pn*-переходом.

обедненный основными носителями заряда. Видно, что обедненный слой ограничивает протекание тока по каналу, уменьшая эффективную ширину последнего. Другими словами, он увеличивает сопротивление канала. Ширину обедненного слоя можно увеличить, т. е. еще больше ограничить протекание тока, если подать на переход напряжение V_{GS} , которое сместит переход в обратном направлении (рис. 26.1(в)). Изменяя величину напряжения обратного смещения на затворе, можно управлять величиной тока стока I_D . На рис. 26.2 показано поперечное сечение структуры полевого транзистора рассматриваемого типа.

Применяются также полевые транзисторы с каналом *p*-типа, питаемые от источника отрицательного напряжения $-V_{DD}$. Условные обозначения обоих типов транзисторов с управляющим *pn*-переходом приведены на рис. 26.3.

Выходные характеристики

Семейство выходных характеристик транзистора с управляющим *pn*-переходом в схеме с общим истоком показано на рис. 26.4. Они аналогичны выходным характеристикам биполярного транзистора. Эти характеристики показывают зависимость выходного тока I_D от выходного напряжения V_{DS} (напряжения между стоком и истоком) для заданных значений напряжения на затворе V_{GS} (напряжения между затвором и истоком).

Диапазон изменения смещающего напряжения затвор–исток довольно велик (несколько вольт) в отличие от биполярного транзистора, где напряжение база–эмиттер практически постоянно.

Видно, что при увеличении (по абсолютной величине) напряжения на затворе ток стока уменьшается. Это уменьшение происходит до тех пор, пока расширяющийся обедненный слой перехода затвор–канал не перекрывает весь канал, останавливая протекание тока. В этом случае говорят, что полевой транзистор находится в состоянии отсечки.

Напряжение отсечки ¹⁾

Рассмотрим выходную характеристику для $V_{GS} = 0$ (рис. 26.4). При увеличении напряжения V_{DS} (от нулевого значения) ток стока постепенно увеличивается, пока не достигает точки Р, после которой величина тока практически не изменяется. Напряжение в точке Р называется напряжением отсечки. При этом напряжении обедненный слой, связанный с обратнорасположенным переходом затвор–канал, почти полностью перекрывает канал. Однако протекание тока I_D в этой точке не прекращается, поскольку благодаря этому току как раз и создается обедненный слой. Все кривые семейства выходных характеристик имеют свои точки отсечки: P_1 , P_2 и т. д. Если соединить эти точки друг с другом линией, то правее ее лежит область отсечки, являющаяся рабочей областью полевого транзистора.

Усилитель на полевом транзисторе с общим истоком

Схема типичного усилителя ЗЧ на полевом транзисторе показана на рис. 26.5. В этой схеме через резистор утечки R_1 отводится на шасси очень малый ток утечки затвора. Резистор R_3 обеспечивает необходимое

¹⁾ Следует сказать, что отсечка в полевом транзисторе отличается от отсечки в биполярном, поскольку при отсечке полевого транзистора ток в нем протекает и формирует обедненную область. В отечественной литературе обычно это напряжение отсечки называют напряжением насыщения (т. е. ток при заданных напряжениях сток–исток и затвор–исток рассматривается как максимальный, а не как ток, ограниченный этими напряжениями), а область, обозначенную здесь как область отсечки, называют областью насыщения. — Прим. перев.

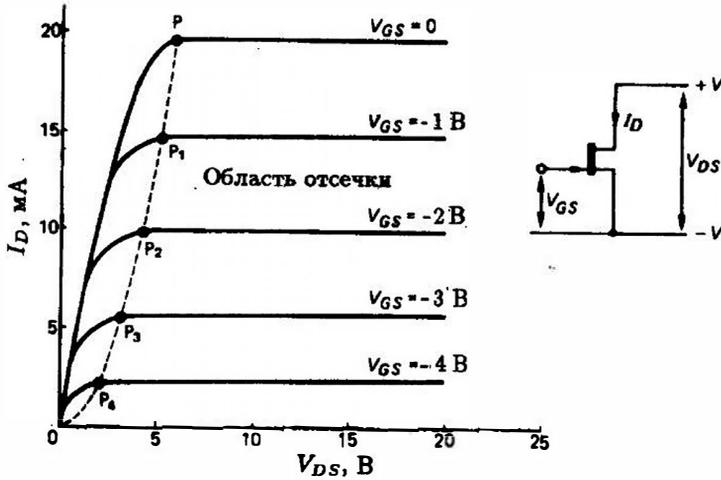


Рис. 26.4. Семейство выходных характеристик транзистора с управляющим p -переходом.

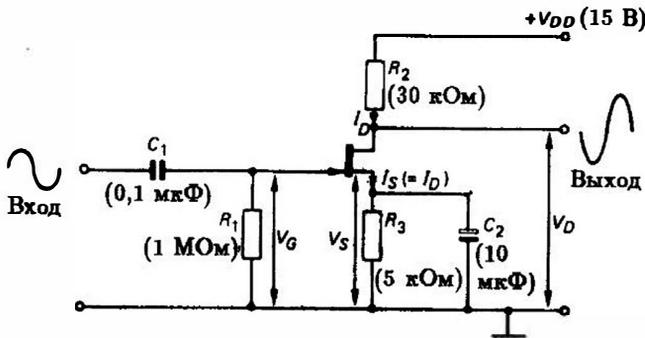


Рис. 26.5. УЗЧ на n -канальном полевом транзисторе с управляющим p -переходом.

обратное смещение, поднимая потенциал истока выше потенциала затвора. Кроме того, этот резистор обеспечивает также стабильность режима усилителя по постоянному току. R_2 — нагрузочный резистор, который может иметь очень большое сопротивление (до 1,5 МОм). Развязывающий конденсатор C_2 в цепи истока устраняет отрицательную обратную связь по переменному току через резистор R_3 . Следует отметить, что разделительный конденсатор C_1 может иметь небольшую емкость (0,1 мкФ) благодаря высокому входному сопротивлению полевого транзистора.

При подаче сигнала на вход усилителя изменяется ток стока, вызывая, в свою очередь, изменение выходного напряжения на стоке транзистора. Во время положительного полупериода входного сигнала напряжение на затворе увеличивается в положительном направлении, обрат-

ное напряжение смещения перехода затвор–исток уменьшается и, следовательно, увеличивается ток I_D полевого транзистора. Увеличение I_D приводит к уменьшению выходного (стокового) напряжения, и на выходе воспроизводится отрицательный полупериод усиленного сигнала. И наоборот, отрицательному полупериоду входного сигнала соответствует положительный полупериод выходного сигнала. Таким образом, входной и выходной сигналы усилителя с общим истоком находятся в противофазе.

Расчет статического режима

Одно из преимуществ полевого транзистора — очень малый ток утечки затвора, величина которого не превышает нескольких пикоампер (10^{-12} А). Поэтому в схеме усилителя на рис. 26.5 затвор находится практически при нулевом потенциале. Ток полевого транзистора протекает от стока к истоку и обычно отождествляется с током стока I_D (который, очевидно, равен току истока I_S).

Рассмотрим схему на рис. 26.5. Полагая $I_D = 0,2$ мА, вычисляем потенциал истока: $V_S = 0,2$ мА \cdot 5 кОм = 1 В. Это величина напряжения обратного смещения управляющего $p\text{-}n$ -перехода.

Падение напряжения на резисторе $R_2 = 0,2$ мА \cdot 30 кОм = 6 В.

Потенциал стока $V_D = 15 - 6 = 9$ В.

Линия нагрузки

Линию нагрузки можно начертить точно так же, как для биполярного транзистора. На рис. 26.6 показана линия нагрузки для схемы на рис. 26.5.

Если $I_D = 0$, то $V_{DS} = V_{DD} = 15$ В. Это точка X на линии нагрузки.

Если $V_{DS} = 0$, то почти все напряжение V_{DD} источника питания падает на резисторе R_2 . Следовательно, $I_D = V_{DD}/R_2 = 15$ В/30 кОм = 0,5 мА. Это точка Y на линии нагрузки. Рабочая точка Q выбирается таким образом, чтобы транзистор работал в области отсечки.

Выбранная рабочая точка Q (точка покоя) на рис. 26.6 определяется величинами: $I_D = 0,2$ мА, $V_{GS} = -1$ В, $V_{DS} = 9$ В.

МОП-транзистор

В полевом транзисторе этого типа роль затвора играет металлический электрод, электрически изолированный от полупроводника тонкой пленкой диэлектрика, в данном случае оксида. Отсюда и название транзистора «МОП» — сокращение от «металл–оксид–полупроводник».

Канал n -типа в МОП-транзисторе формируется за счет притяжения электронов из подложки p -типа диэлектрическим слоем затвора (рис. 26.7). Ширину канала можно изменять, подавая на затвор электрический потенциал. Подача положительного (относительно подложки)

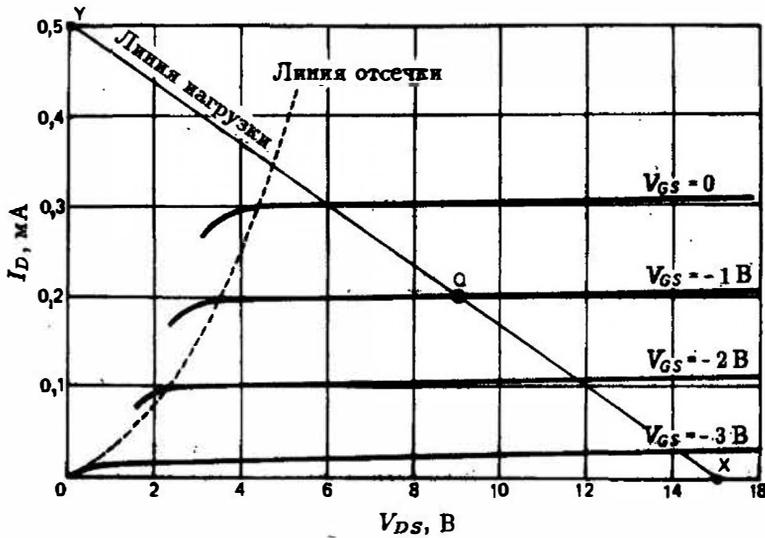


Рис. 26.6. Линия нагрузки усилителя на полевом транзисторе (рис. 26.5).

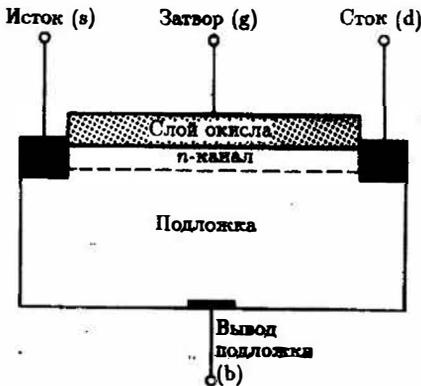


Рис. 26.7. Поперечное сечение МОП-транзистора.

потенциала приводит к расширению канала n -типа и увеличению тока через этот канал, подача отрицательного потенциала вызывает сужение канала и уменьшение тока. Для МОП-транзистора с каналом p -типа ситуация изменится на обратную.

Существует два типа МОП-транзисторов: транзисторы, работающие в режиме обогащения¹⁾, и транзисторы, работающие в режиме обеднения. Транзистор, работающий в режиме обогащения, находится в со-

¹⁾ В отечественной литературе, как правило, режим обогащения называют «МОП-транзистор с индуцированным каналом», а режим обеднения — «МОП-транзистор со встроенным каналом». — Прим. перев.

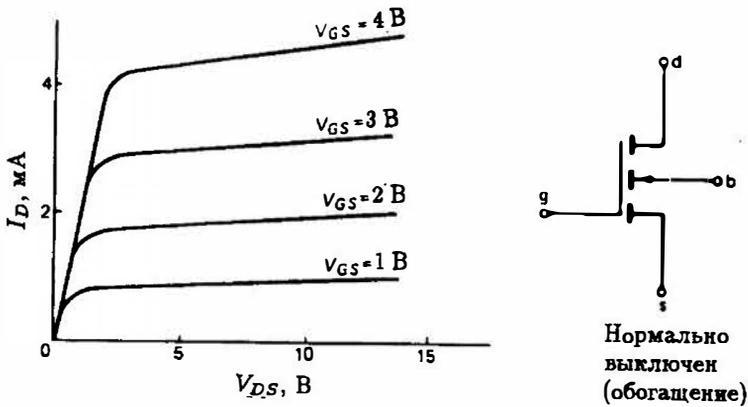


Рис. 26.8. Выходные характеристики МОП-транзистора с каналом n -типа, работающего в режиме обогащения, и условное обозначение этого транзистора.

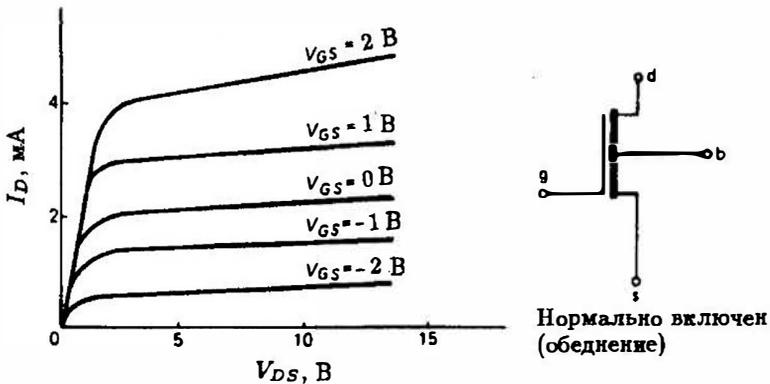


Рис. 26.9. Выходные характеристики МОП-транзистора с каналом n -типа, работающего в режиме обеднения, и условное обозначение этого транзистора.

стоянии отсечки тока (нормально выключен), когда напряжение смещения $V_{GS} = 0$. Протекание тока начинается только при подаче напряжения смещения на затвор. Выходные характеристики n -канального МОП-транзистора с каналом n -типа, работающего в режиме обогащения, и его условное обозначение показаны на рис. 26.8.

МОП-транзистор, работающий в режиме обеднения, проводит ток, когда напряжение смещения на затворе отсутствует (нормально включен). Для МОП-транзистора с каналом n -типа ток стока увеличивается при подаче на затвор положительного напряжения и уменьшается при подаче отрицательного напряжения (рис. 26.9).

Условное обозначение МОП-транзистора с каналом p -типа показано на рис. 26.10. Заметим, что прерывающаяся жирная линия указывает на МОП-транзистор, работающий в режиме обогащения (нормально выключен).

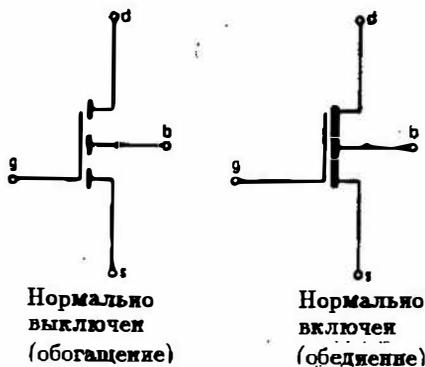


Рис. 26.10. Условное обозначение МОП-транзистора с каналом p -типа.

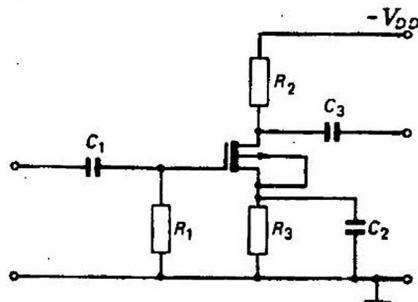


Рис. 26.11. Усилитель на МОП-транзисторе с каналом p -типа, работающий в режиме обеднения.

чен). Сплошная линия используется для обозначения МОП-транзистора, работающего в режиме обеднения (нормально включен). Вывод подложки обозначается буквой «b», обычно он соединяется с выводом истока. На рис. 26.11 схема типичного усилителя с общим истоком на МОП-транзисторе с каналом p -типа, работающего в режиме обеднения. Используется источник питания с отрицательным напряжением. Положительное напряжение смещения между затвором и истоком V_{GS} создается обычным образом с помощью резистора R_3 в цепи истока.

Другие твердотельные приборы

Стабилитрон

Стабилитрон — это диод с *pn*-переходом, который характеризуется точно определенной величиной напряжения пробоя. В отличие от обычного диода стабилитрон работает в области обратной вольт-амперной характеристики (рис. 27.1). В прямом направлении стабилитрон ведет себя как обычный диод. При обратном смещении перехода ток через стабилитрон практически отсутствует, пока величина обратного напряжения остается меньше величины напряжения туннельного пробоя V_Z , обычно называемого напряжением стабилизации. Как только обратное напряжение достигает величины напряжения туннельного пробоя, стабилитрон начинает проводить ток. В области пробоя падение напряжения на стабилитроне практически не изменяется при очень больших изменениях тока. Стабилитрон является полупроводниковым эквивалентом хорошо известного газотрона. Стабилитроны применяются для параллельной стабилизации и в качестве источников опорного напряжения (см. гл. 29).



Рис. 27.1. Прямая и обратная вольт-амперные характеристики стабилитрона.

Переключательный диод

Переключательный диод, или *динистор*, состоит из четырех чередующихся слоев полупроводниковых материалов, как показано на рис. 27.2. Когда такой диод смещен в прямом направлении, через него течет очень малый ток, пока не достигается область пробоя (рис. 27.3). При напряжениях, меньших напряжения пробоя, динистор можно рассматривать как ключ в положении **ВЫКЛЮЧЕНО**, а при напряжениях, больших напряжения пробоя, — как ключ в положении **ВКЛЮЧЕНО**.

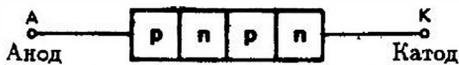


Рис. 27.2. Переключательный диод.

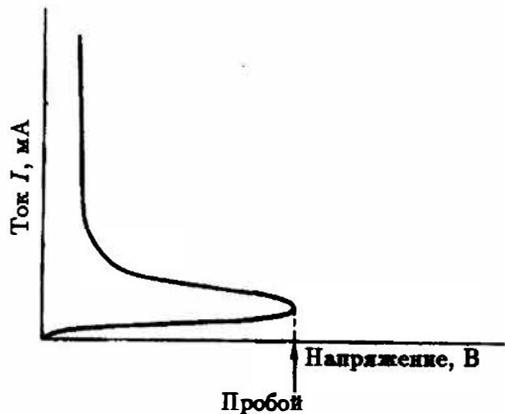


Рис. 27.3. Вольт-амперная характеристика переключательного диода.

Однооперационный триодный тиристор (SCR)

Управляемый выпрямитель, или *однооперационный триодный тиристор*, — еще один прибор с четырехслойной *рррп*-структурой. В отличие от переключательного диода тиристор имеет третий вывод, называемый управляющим электродом (рис. 27.4). Величину критического напряжения пробоя можно теперь варьировать, изменяя потенциал управляющего электрода. На рис. 27.5 показаны вольт-амперные характеристики тиристора для двух различных значений тока в цепи управляющего электрода. При нулевом токе (когда потенциал управляющего электрода равен нулю) напряжение включения тиристора равно V_1 . Если теперь на управляющий электрод подать положительный по отношению к катоду потенциал, вызывающий протекание тока I_{g1} в цепи управляющего электрода, то включение будет происходить при меньшем напряжении V_2 . После перевода тиристора в проводящее состояние потенциал управляющего электрода не оказывает уже никакого влияния на ток тиристора. Тиристор можно выключить только путем уменьшения потенциала анода ниже уровня потенциала катода.

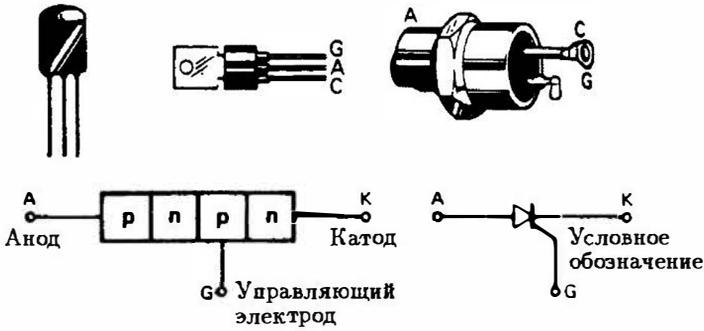


Рис. 27.4. Однооперационный триодный тиристор: условное обозначение и внешний вид прибора.

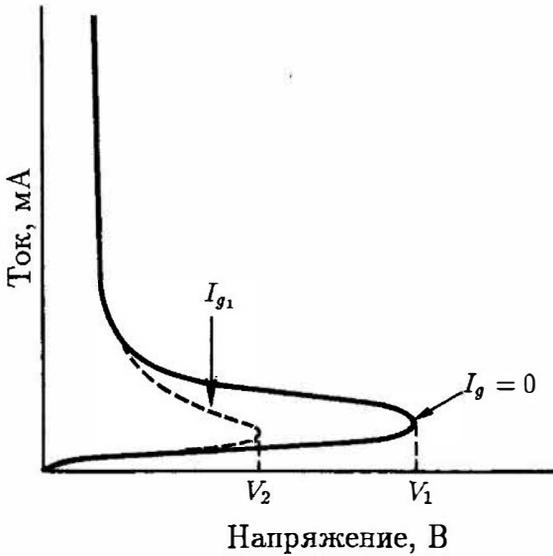


Рис. 27.5. Вольт-амперные характеристики тиристора.

Триодные тиристоры находят широкое применение, поскольку они обладают высоким быстродействием и переключаются при подаче очень малого тока (т. е. очень малой мощности) в цепь управляющего электрода, коммутируя при этом токи порядка нескольких ампер.

Они очень часто используются для выпрямления тока и управления мощностью. Тиристор включается только во время положительного (или отрицательного) полупериодов синусоидального тока, вырабатывая пульсирующий ток одного направления. Управление мощностью осуществляется путем переключения тиристора в проводящее состояние на больший или меньший промежуток времени (см. гл. 29).

На рис. 27.6 показан тиристор, переключаемый последовательностью импульсов. Тиристор включается положительным фронтом каждого им-

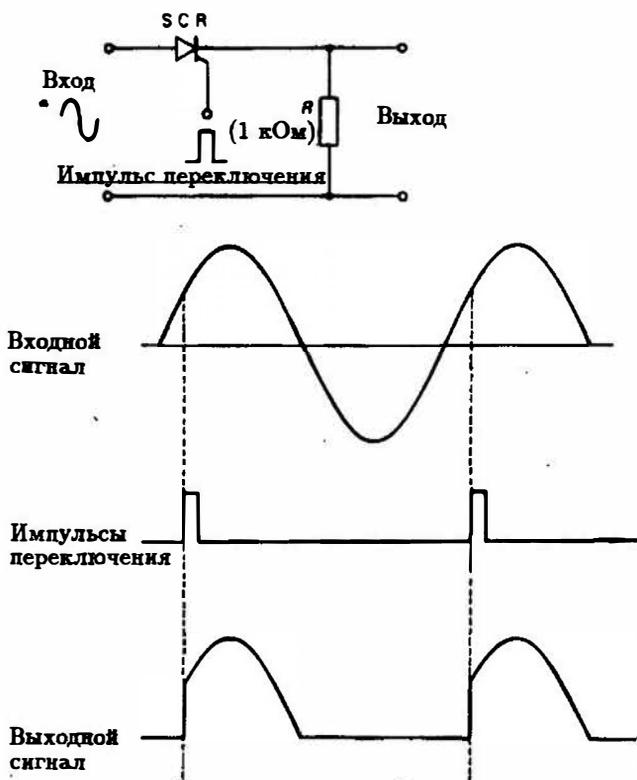


Рис. 27.6. Импульсное управление триодным тиристором (SCR).

тульса и остается в проводящем состоянии, пока входное напряжение не упадет до нуля. Форма результирующего выходного напряжения повторяет часть положительного полупериода входного сигнала.

На рис. 27.7 приведена схема переключения тиристора с помощью переменного резистора R_1 , управляющего моментом переключения. Переключение осуществляется самим входным сигналом. При установке минимального значения сопротивления резистора R_1 переключение происходит в самом начале полупериода входного напряжения, как показано на рис. 27.7(а). По мере увеличения сопротивления переключение происходит все позже и позже, поскольку амплитуда сигнала, подаваемого на управляющий электрод, становится меньше. При максимальном сопротивлении резистора R_1 тиристор переключается непосредственно перед моментом достижения входным напряжением пикового значения (рис. 27.7(б)). Заметим, что в рассматриваемой схеме тиристор можно переключить в проводящее состояние только в первой половине положительного полупериода, то есть до момента появления пикового напряжения на управляющем электроде. Если максимум пройден, переключе-

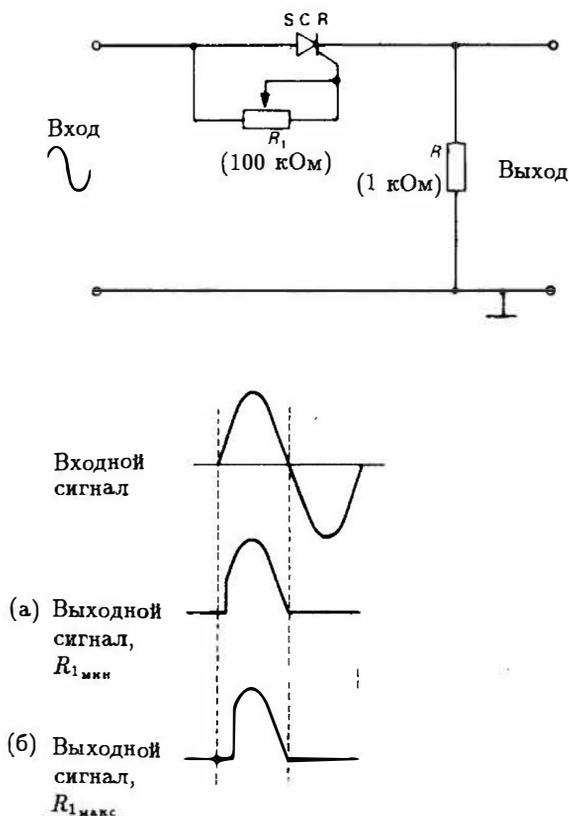


Рис. 27.7. Тиристорный выпрямитель.

ние тиристора станет невозможным и выходное напряжение будет равно нулю.

Для переключения тиристора во второй половине положительного полупериода, т. е. после прохождения положительного максимума, используется фазосдвигающая цепь. В схеме на рис. 27.8 эту функцию выполняют конденсатор C и резистор R_1 . Напряжение, подаваемое на управляющий электрод, имеет временную задержку (сдвигается по фазе относительно входного напряжения), как показано на рис. 27.8(б). Как уже говорилось, тиристор может переключиться только до момента прихода положительного максимума сигнала на управляющий электрод. Но в результате фазового сдвига к тому моменту времени, когда этот положительный максимум попадет на управляющий электрод, положительный максимум входного напряжения будет уже пройден. Таким образом, с помощью фазосдвигающей цепи тиристор можно переключить в проводящее состояние и во второй половине положительного полупериода входного напряжения (рис. 27.8(в)).

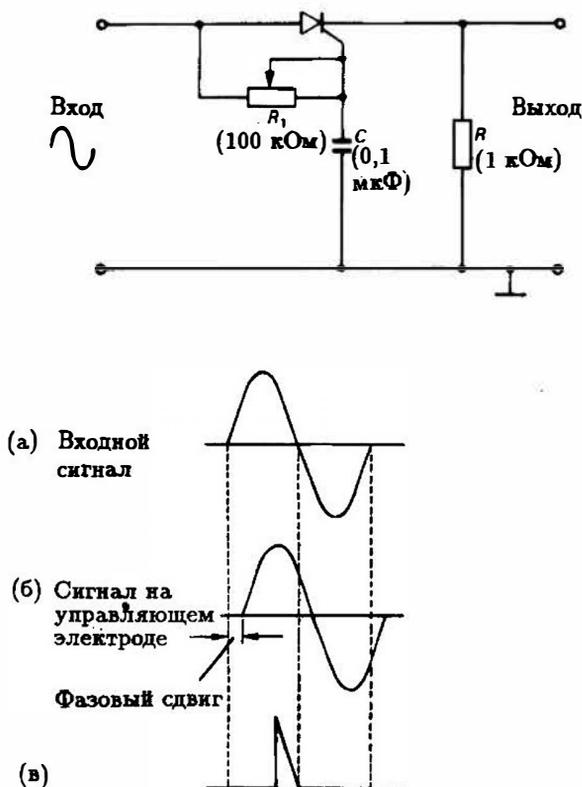


Рис. 27.8. Тиристорный выпрямитель с фазосдвигающей цепью R_1C .

Варикап

Обнаружено, что диод с обратносмещенным $p\bar{n}$ -переходом имеет небольшую емкость, которая изменяется при изменении обратного напряжения, прикладываемого к переходу. Этот факт используется в технологии интегральных схем для формирования конденсаторов внутри кремниевой пластины.

Обратносмещенные диоды, применяемые как конденсаторы переменной емкости, называются варикапами или варакторами (рис. 27.9). Помимо многих других применений варикапы используются в системах автоматической подстройки частоты и в программируемых измерительных приборах. Хорошо известный метод электронной настройки также связан с применением варикапов в качестве подстроечных конденсаторов.

По сравнению с обычными конденсаторами переменной емкости варикапы имеют меньшие размеры, большую чувствительность и очень высокую стабильность и надежность.

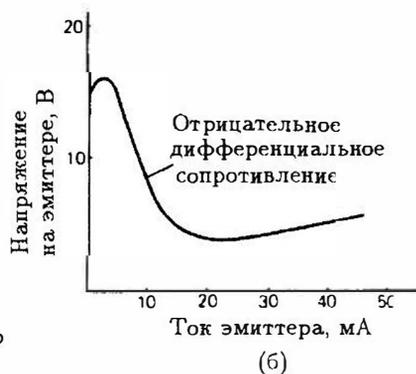
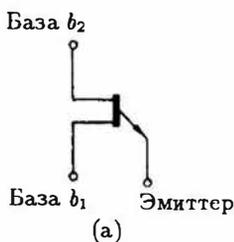


Рис. 27.9. Варикап.

Рис. 27.10. Однопереходный транзистор p -типа. (а) Условное обозначение. (б) Вольт-амперная характеристика.

Однопереходный транзистор

Однопереходный транзистор — это прибор с отрицательным сопротивлением (в определенных условиях уменьшение напряжения сопровождается увеличением тока). На рис. 27.10 показаны условное обозначение и вольт-амперная характеристика однопереходного транзистора p -типа. Как только напряжение на эмиттере достигнет величины, достаточной для прямого смещения pn -перехода между эмиттером и базой b_1 , от эмиттера начинает течь ток. При этом падение напряжения на переходе падает до малой величины (приблизительно 0,6 В). Такие однопереходные транзисторы часто используются в качестве генераторов (см. схему на рис. 33.8) и для целей коммутации.

Симметричный диодный тиристор

Симметричный диодный тиристор — это еще один переключательный прибор с двумя выводами T_1 и T_2 , как показано на рис. 27.11. При увеличении разности потенциалов между этими выводами независимо от полярности происходит пробой — включение. Симметричный диодный тиристор может проводить в обоих направлениях, и поэтому его также называют двунаправленным диодом. Когда происходит включение, напряжение на этом приборе падает до нескольких вольт. Напряжение включения находится в диапазоне 30–50 В. Симметричные диодные тиристоры используются как переключающие элементы, например для управления однопереходными триодными тиристорами.

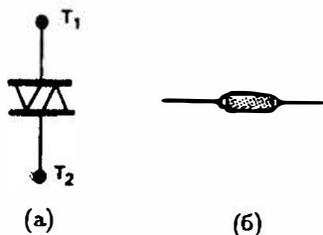


Рис. 27.11. Симметричный диодный тиристор. (а) Условное обозначение. б) Внешний вид.

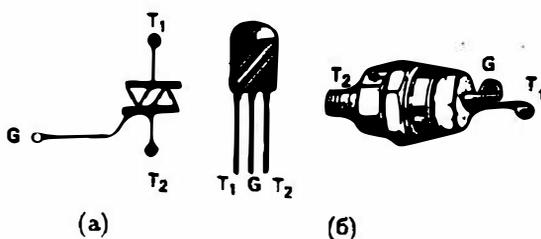


Рис. 27.12. Симметричный триодный тиристор. (а) Условное обозначение. (б) Внешний вид.

Симметричный триодный тиристор

Симметричный триодный тиристор, или симистор, (рис. 27.12) — еще один двунаправленный диод с дополнительным выводом управляющего электрода. Пробой происходит, когда напряжение между выводами T_1 и T_2 любой полярности) достигает определенного уровня.

Симистор можно переключить в проводящее состояние путем подачи на управляющий электрод сигнала, который может быть или положительным, или отрицательным по отношению к выводам T_1 или T_2 . Симисторы также используются как переключающие элементы, например для управления однооперационными триодными тиристорами.

Интегральные схемы

Прогресс технологии привел к улучшению надежности электронных устройств, а также к снижению их стоимости и размеров. Микроэлектронные схемы представляют собой миниатюрный ансамбль большого числа электронных компонентов, как пассивных, так и активных.

Существует два типа микросхем: пленочные схемы и монолитные интегральные схемы. Пленочные микросхемы подразделяются в свою очередь на тонкопленочные и толстопленочные схемы. Оба типа пленочных схем изготавливаются путем нанесения пленок специальной резистивной пасты на изолирующую подложку. Они применяются главным образом как резисторные схемы, но могут использоваться также для формирования малогабаритных конденсаторов и катушек индуктивности.

Монолитные интегральные схемы, обычно называемые просто интегральными схемами (ИС), формируются в диске из кремния p -типа, или чипе. Кремниевый чип представляет собой очень тонкую пластину (толщиной 0,02 см) с площадью поверхности, эквивалентной площади поперечного сечения очень тонкого карандаша (приблизительно 26 мм²). Чип выполняет функцию подложки, в которой формируются различные электронные компоненты с помощью процесса, называемого диффузией. Интегральные схемы могут содержать большое число активных элементов:

транзисторов, диодов и т. п., а также резисторов и конденсаторов. Технология ИС *большой степени интеграции* (больших ИС, или БИС) позволяет создать на одном чипе целую электронную систему, например дешифратор или микропроцессор.

Хотя интегральные схемы являются твердотельными, т. е. механически прочными приборами, но как электронные схемы это весьма «деликатные» устройства, требующие аккуратного обращения. Ниже перечислены меры предосторожности, которые нужно соблюдать при замене ИС.

1. ИС следует держать за корпус, избегая прикасания к выводам. В противном случае на выводах могут появиться грязь и жир, что приводит к ухудшению электрического контакта.
2. При пайке ИС исключительное внимание должно уделяться отводу тепла, чтобы избежать перегрева микросхемы. Перегрев приводит к быстрому разрушению большинства ИС.
3. Напряжение питания должно соответствовать паспортному значению для данной микросхемы. Для питания большинства ИС нужен источник питания с высокой степенью стабильности выходного напряжения. Это особенно важно для цифровых применений.
4. Мощность рассеяния для большинства ИС, исключая интегральные усилители мощности, очень мала. Поэтому необходимо исключить любые перегрузки, так как они могут вызвать превышение паспортной мощности рассеяния, перегрев и повреждение ИС.
5. При проведении измерений необходимо соблюдать меры предосторожности, чтобы не вызвать короткого замыкания соседних выводов микросхемы. Следует использовать измерительные зонды специальной формы.
6. Если ИС МОП-типа не используется, все ее выводы должны быть закорочены между собой. Это следует делать независимо от того, лежит ли ИС на полке или упаковывается для транспортировки.

RC-фильтры, ограничители и фиксаторы уровня

Фильтры — это схемы, которые пропускают без затухания (ослабления) определенную полосу частот и подавляют все остальные частоты. Частота, на которой начинается подавление, называется частотой среза f_c (рис. 28.1).

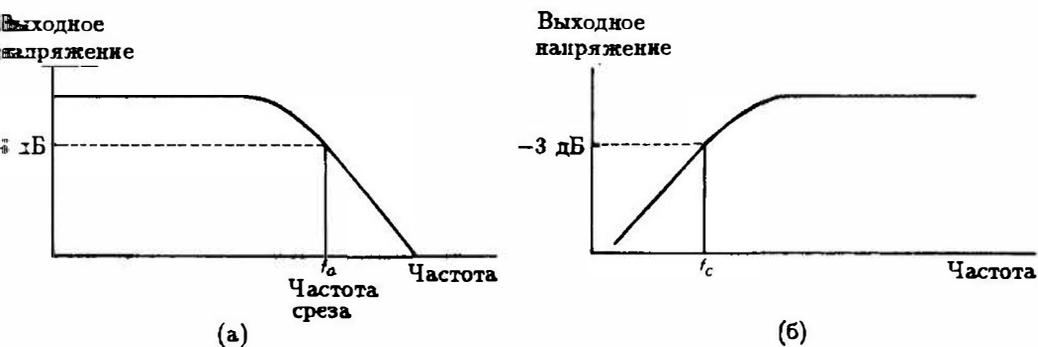


Рис. 28.1. Частотная характеристика фильтра нижних (а) и верхних (б) частот.

Влияние фильтра на прямоугольный сигнал

Как уже говорилось в гл. 3, прямоугольный сигнал представляет собой сложное колебание, состоящее из основной гармоники и бесконечного количества нечетных гармоник. Низкочастотные составляющие формируют основание и плоскую вершину импульса, а высокочастотные — его фронт и срез.

Когда прямоугольный сигнал проходит через фильтр, его форма искажается. Фильтр нижних частот (ФНЧ) будет искажать главным образом фронты и срезы, делая их менее крутыми и скругляя углы, как показано на рис. 28.7(б). ФНЧ оказывает на прямоугольный сигнал такое же действие, как усилители с недостаточной шириной полосы пропускания. Фильтр верхних частот (ФВЧ), наоборот, искажает плоскую вершину и основание прямоугольного сигнала (рис. 28.5(б)).

RC-фильтры

Простейшим среди фильтров является RC-фильтр. Принцип его работы основан на том, что при изменении частоты реактивное сопротивление конденсатора изменяется обратно пропорционально частоте, а сопротивление резистора остается неизменным. На схеме рис. 28.2 конденсатор соединен последовательно с резистором. При подаче на вход такого фильтра низкочастотного сигнала реактивное сопротивление конденсатора C будет гораздо больше, чем сопротивление резистора R . В результате падение напряжения V_c на конденсаторе будет большим, а на резисторе V_r — малым. При подаче на вход этого фильтра высокочастотного сигнала картина будет обратная: V_c будет малым, а V_r — большим. Если теперь представить эту схему, как на рис. 28.3(б), где падение напряжения на конденсаторе является выходным, то в выходном сигнале будут преобладать НЧ-составляющие, а высокочастотные будут сильно ослабляться. Другими словами, мы получили фильтр нижних частот. И наоборот, если выходное напряжение снимать с резистора (рис. 28.3(а)), то получим фильтр верхних частот. Значения R и C определяют частоту среза фильтра.

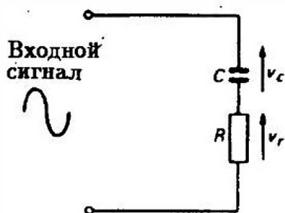


Рис. 28.2.

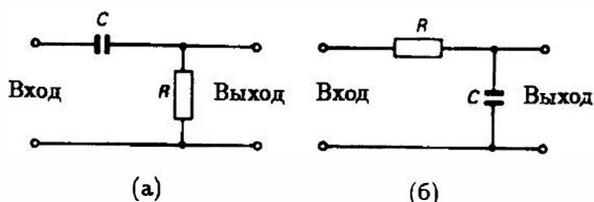


Рис. 28.3. RC-фильтр верхних (а) и нижних (б) частот.

Дифференциатор

Дифференциатор — это фильтр верхних частот. Если на вход дифференциатора подать последовательность прямоугольных импульсов, то на выходе будут получаться высокочастотные всплески, или «пички». На рис. 28.4 изображен RC-дифференциатор. Конденсатор C беспрепятственно пропускает ВЧ-составляющие входного сигнала, образующие фронт импульса АВ, а затем начинает заряжаться до 10 В.

Если постоянная времени (произведение RC) мала в сравнении с периодом входных импульсов, конденсатор успеет полностью зарядиться до 10 В, прежде чем придет следующая ВЧ-составляющая импульса — срез CD (рис. 28.5(а)). Когда конденсатор полностью зарядится, ток прекращается и падение напряжения на резисторе, т. е. на выходе, равно нулю. Срез CD представляет собой перепад напряжения 10 В и состоит из ВЧ-компонент. Поэтому он свободно пройдет через конденсатор и на-

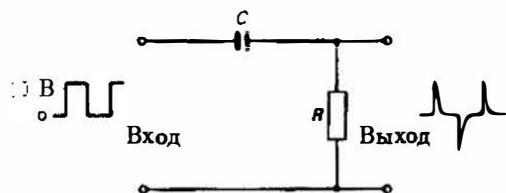


Рис. 28.4. RC-дифференциатор.

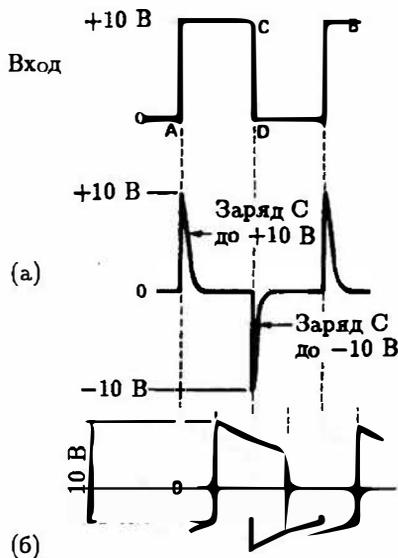


Рис. 28.5. Сигнал на выходе дифференциатора, изображенного на рис. 28.4, при малой (а) и большой (б) постоянной времени.

напряжение на выходе скачком упадет до -10 В. После этого конденсатор начнет перезаряжаться до -10 В, и, если постоянная времени мала, он успеет полностью зарядиться до этого напряжения. При этом выходное напряжение спадет до нуля и будет оставаться таким до прихода следующего фронта и т. д. Если постоянная времени больше, чем период входных импульсов, то выходной сигнал будет иметь форму, как на рис. 28.5(б).

Интегрирующая RC-цепь

Интегрирующая RC-цепь (интегратор) является фильтром нижних частот (ФНЧ) и при подаче на его вход прямоугольного сигнала выдает на выходе сигнал треугольной (пилообразной) формы. На рис. 28.6 изображен RC-интегратор. При подаче на его вход фронта прямоугольного импульса (рис. 28.7) конденсатор начинает заряжаться до напряжения $+10$ В. Если задать постоянную времени RC, большую в сравнении с периодом входного сигнала, то срез CD импульса поступит прежде, чем конденсатор успеет полностью зарядиться (рис. 28.7(а)). После этого конденсатор начинает заряжаться в обратном направлении. И опять в связи с большой постоянной времени фронт FE следующего импульса придет прежде, чем конденсатор успеет полностью зарядиться в отрицательном направлении и т. д. В результате на выходе получается сигнал треугольной формы, амплитуда которого меньше, чем амплитуда входного сигнала.

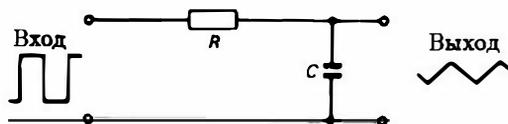
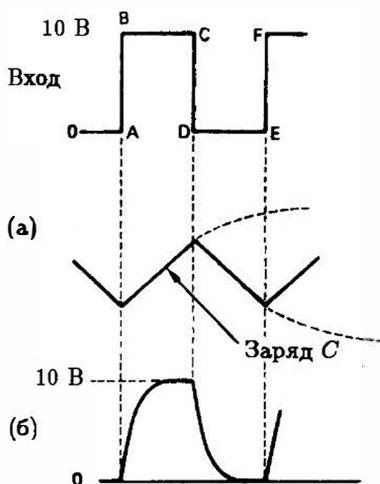
Рис. 28.6. RC -интегратор.

Рис. 28.7. Выходной сигнал на выходе интегратора, изображенного на рис. 28.6, при большой (а) и малой (б) постоянной времени.

Если постоянная времени мала в сравнении с периодом входного сигнала, то выходной сигнал будет иметь вид, как на рис. 28.7(б). Обратите внимание, что и в интеграторе, и в дифференциаторе постоянная времени всегда сравнивается с периодом входного сигнала. Например, постоянная времени 100 мкс является большой по сравнению с периодом, скажем, 5 мкс (частота входного сигнала 200 кГц), но малой в сравнении с периодом 5 мс (частота входного сигнала 200 Гц).

Влияние RC -цепи на синусоидальный сигнал

Синусоидальный сигнал является простым гармоническим колебанием и не содержит высших гармоник, поэтому при подаче такого сигнала на фильтр любого типа его форма не изменяется. Амплитуда выходного синусоидального сигнала может уменьшиться в зависимости от того, находится его частота в пределах полосы пропускания или нет. В первом случае синусоидальный сигнал претерпевает очень малое затухание, во втором случае затухание может быть очень большим.

Воздействие RC -цепи на пилообразный сигнал

Интегратор скругляет острые кромки пилообразного сигнала (рис. 28.8). Степень скругления определяется постоянной времени схемы. При очень большой постоянной времени выходной сигнал будет иметь вид, как на рис. 28.8(б).

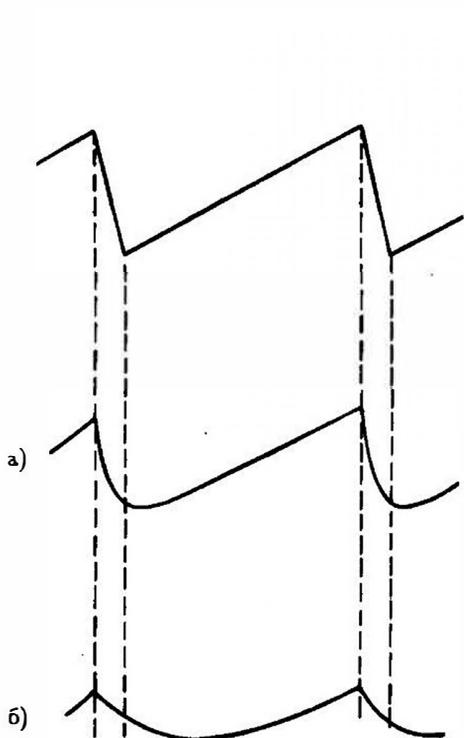


Рис. 28.8. Влияние интегрирующей цепочки на форму пилообразного напряжения.

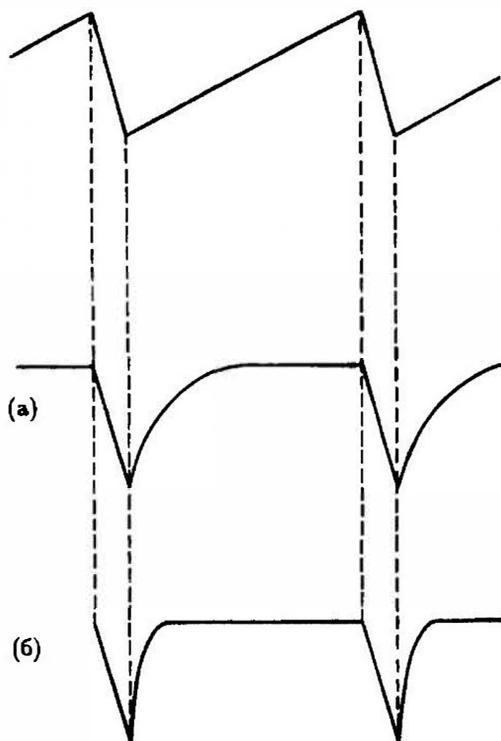


Рис. 28.9. Влияние дифференцирующей цепочки на форму пилообразного напряжения.

На рис. 28.9 показано воздействие дифференциатора на сигнал пилообразной формы. При очень малой постоянной времени выходной сигнал получается в виде импульсов (пичков) (рис. 28.9(б)).

Диодное ограничение

Ограничитель срезает вершину сигнала и делает ее плоской. Ограничение может быть односторонним и двусторонним. Так, схема на рис. 28.10 ограничивает только отрицательную полуволну напряжения. Падение напряжения на диоде при прямом включении будет создавать уровень отрицательного напряжения $-0,6$ В, показанный пунктиром. Обычно диоды считают идеальными и этим напряжением пренебрегают.

Чтобы получить ограничение напряжения на других уровнях, последовательно с диодом включают батарею. При этом диод может быть смещен в прямом (рис. 28.11(а)) или обратном (рис. 28.11(б)) направлении. В схеме на рис. 28.11(б) диод проводит ток только тогда, когда напряжение на его катоде равно или ниже -2 В. При этом выходное напряжение рав-

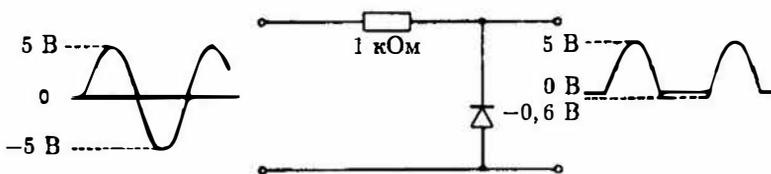


Рис. 28.10.

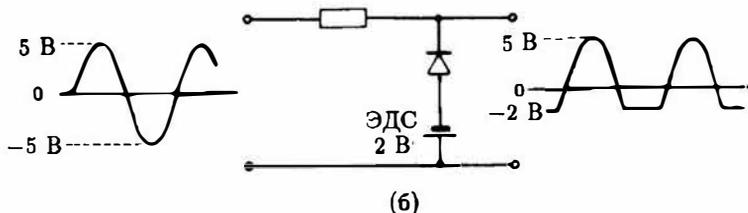
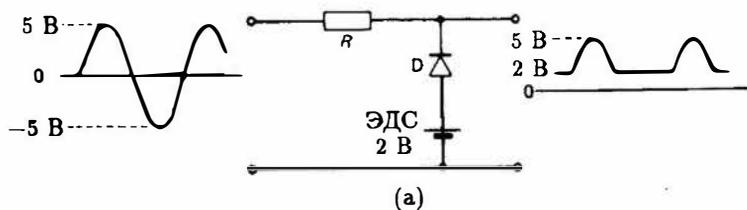


Рис. 28.11. Ограничение входного напряжения на уровне +2 В (а) и -2 В (б).

но ЭДС батареи (если считать диод идеальным). При напряжении выше -2 В диод смещен в обратном направлении, т. е. закрыт, и часть входного напряжения поступает на выход схемы.

Вот простой способ построения ограничителя с дополнительным смещением:

1. Проведите на графике входного напряжения линию, соответствующую величине ЭДС батареи.
2. Если ЭДС включена так, что смещает диод в прямом направлении, то большая часть входного сигнала будет ограничена, т. е. отсечена, и наоборот.

Схема на рис. 28.12 ограничивает положительную и отрицательную полуволны входного напряжения. На рис. 28.12(а) диод D_1 ограничивает положительную полуволну, а диод D_2 — отрицательную. В случае идеальных диодов выходное напряжение этой схемы всегда будет равно нулю. Однако если учесть падение напряжения на диоде (для кремниевого диода оно равно $0,6$ В), то получите ограничение на уровнях $+0,6$ В и $-0,6$ В. Схема на рис. 28.12(б) тоже обеспечивает двустороннее ограничение и имеет дополнительное смещение. Диод D_1 ограничивает по-

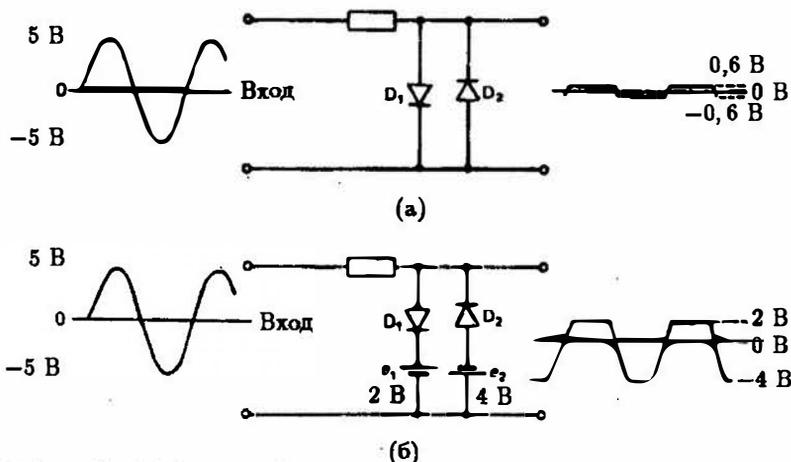


Рис. 28.12. Двустороннее ограничение.

положительную полуволну входного сигнала на уровне $+2\text{ V}$, а диод D_2 ограничивает отрицательную полуволну на уровне -4 V .

Ограничение с помощью стабилитрона

Стабилитрон (или зенеровский диод) тоже можно использовать для ограничения сигнала (рис. 28.13). Стабилитрон Z_2 в схеме (б) проводит ток только при положительной полуволне сигнала. Однако стабилитрон Z_1 остается выключенным до тех пор, пока входное напряжение не превысит его напряжения пробоя (в данном случае 6 V), ограничивающего входное напряжение. В отрицательный полупериод стабилитрон Z_1 всегда смещен

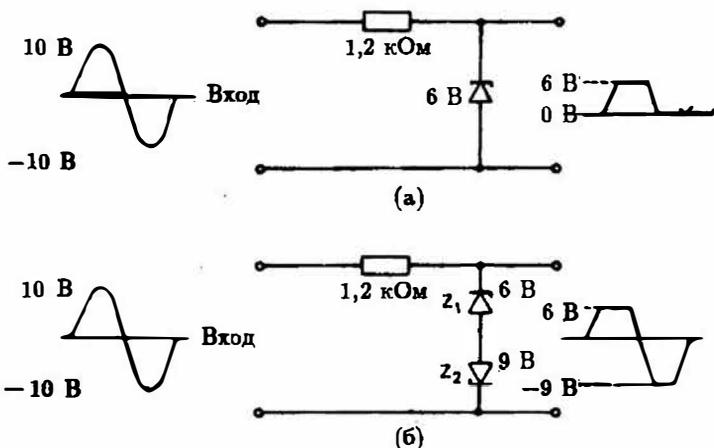


Рис. 28.13. Схемы ограничения на стабилитроне.

в прямом направлении и проводит ток, но стабилитрон Z_2 ограничивает входной сигнал на уровне -9 В.

Схемы ограничения на транзисторе

Как уже говорилось в гл. 9, при перегрузке усилителя тоже возникает ограничение сигнала. Схема на рис. 28.14 вырабатывает практически прямоугольное напряжение. Транзистор не имеет напряжения смещения, поэтому при отсутствии напряжения на входе он закрыт. В течение положительного полупериода входного сигнала транзистор открыт (переход эмиттер–база смещен в прямом направлении) и при достаточной величине напряжения на входе входит в насыщение. При этом напряжение на выходе равно нулю. В течение отрицательного полупериода входного сигнала транзистор закрыт и напряжение на выходе равно $+V_{CC}$. Выходной сигнал представляет собой прямоугольные импульсы, и поэтому схема называется формирователем прямоугольных импульсов.

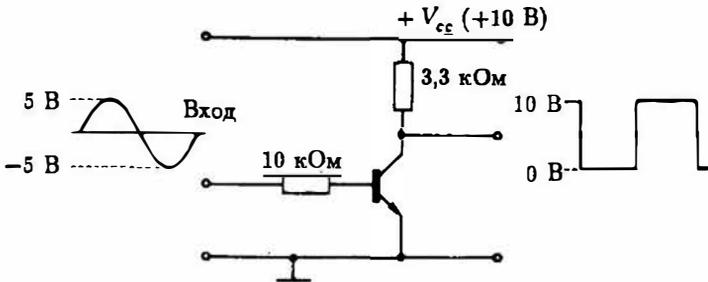


Рис. 28.14. Схема ограничения на транзисторе.

Триггер Шмитта

Очень распространенной схемой для формирования и ограничения импульсов является триггер Шмитта, изображенный на рис. 28.15. При отсутствии входного сигнала база T_1 имеет нулевой потенциал, и транзистор закрыт. Транзистор T_2 в это время находится в состоянии насыщения, поскольку на его базу подано положительное напряжение, определяемое делителем R_2 – R_4 – R_5 . Выходное напряжение (коллектор T_2) при этом практически равно нулю. Ток транзистора T_2 , протекающий через эмиттерный резистор R_3 , создает положительное напряжение на эмиттерах, которое смещает эмиттерный переход T_1 в обратном направлении.

При увеличении входного напряжения в положительном направлении транзистор T_1 начинает проводить ток, когда напряжение на его базе превысит напряжение на эмиттере на $+0,6$ В. Когда это произойдет, транзистор T_1 начинает пропускать ток, потенциал его коллектора понижается и это понижение передается на базу транзистора T_2 . В результате ток транзистора T_2 уменьшается, падает потенциал эмиттеров транзисторов

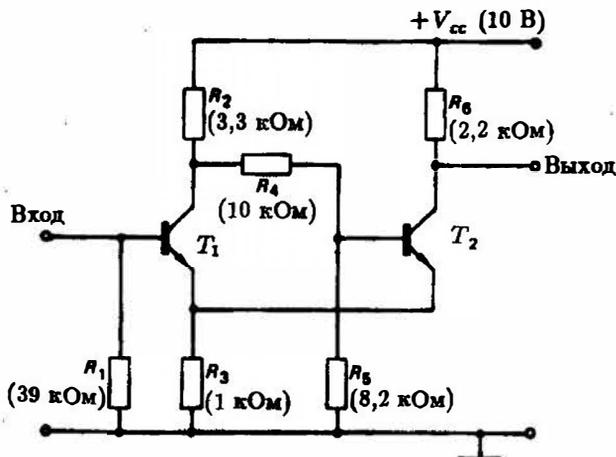


Рис. 28.15. Схема триггера Шмитта.

T_1 и T_2 и транзистор T_1 начинает пропускать еще больший ток и т. д. Таким образом, транзистор T_1 очень быстро достигает насыщения, а транзистор T_2 — отсечки. Выходное напряжение при этом равно V_{CC} . Если теперь входное напряжение упадет до нуля, произойдет обратный процесс, в результате чего транзистор T_1 закроется, а транзистор T_2 придет в насыщение.

Схема фиксации уровня

Эту схему называют еще схемой восстановления постоянной составляющей (ВПС). Схема фиксации уровня добавляет к сигналу переменного тока постоянную составляющую, не изменяя при этом формы входного сигнала.

Во многих случаях бывает важно сохранить уровень постоянной составляющей сигнала. Так, если схема имеет связь по переменному току, постоянная составляющая теряется, и ее потом приходится восстанавливать. Это случается, например, при дифференцировании импульсной последовательности или после прохождения видеосигнала через разделительный конденсатор. Фиксация уровня также используется для получения смещения класса С в транзисторах, например в генераторах (см. гл. 30). На рис. 28.16 изображена схема фиксатора.

Срез АВ (рис. 28.17) входного сигнала представляет собой отрицательный перепад напряжения величиной 10 В. Он состоит из высокочастотных составляющих и поэтому проходит через конденсатор, делая точку Х (выход) отрицательной. При этом диод оказывается смещенным в прямом направлении и, если считать его идеальным, накоротко замыкает точку Х на нулевой уровень. Конденсатор быстро заряжается через малое сопротивление прямо смещенного диода в отрицательном направле-

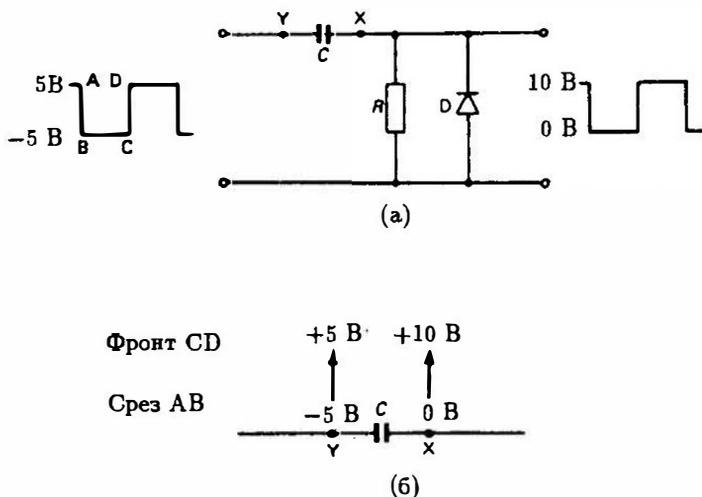


Рис. 28.16. Фиксация уровня постоянной составляющей. (а) Уровень фиксации 0 В. (б) Выходной сигнал (точка X) изменяется от 0 до 10 В, тогда как входной сигнал изменяется от -5 до +5 В.

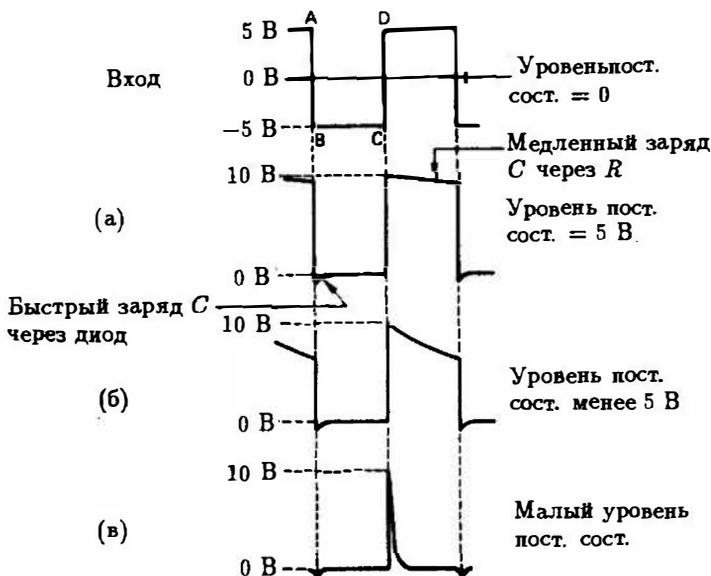


Рис. 28.17. Сигнал на выходе схемы, изображенной на рис. 28.16, при постоянной времени: (а) очень большой, (б) сравнимой с периодом входного сигнала, (в) малой.

нии (рис. 28.16(б)). Этот заряд сохраняется до прихода фронта следующего импульса.

Фронт импульса CD представляет собой положительный перепад напряжения величиной 10 В. Он состоит из высокочастотных составляющих и поэтому проходит через конденсатор, изменяя потенциал точки X от 0 до +10 В (рис. 28.16(б)).

Диод теперь смещен в обратном направлении (т. е. цепь разомкнута) падением напряжения 10 В на резисторе R. Начиная протекать ток пытается перезарядить конденсатор в противоположном направлении; при этом выходное напряжение начинает падать. Однако, если постоянная времени RC велика в сравнении с периодом входного сигнала, конденсатор не успеет потерять свой отрицательный заряд до прихода следующего среза входного импульса (рис. 28.17(а)).

При величине постоянной времени, сравнимой с периодом входного сигнала, выходной сигнал будет иметь форму, показанную на рис. 28.17(б). При малой постоянной времени схема превращается в дифференциатор (рис. 28.17(в)).

Чтобы получить большую величину постоянной времени, резистор R можно удалить. При этом постоянная времени будет определяться как $C \cdot r$, где r — обратное сопротивление диода. Чтобы получить на выходе нулевой уровень фиксации при отрицательной полярности выходного сигнала, следует поменять полярность включения диода (рис. 28.18). Обратите внимание, что постоянная составляющая входного сигнала блокируется конденсатором и не влияет на величину выходного сигнала.

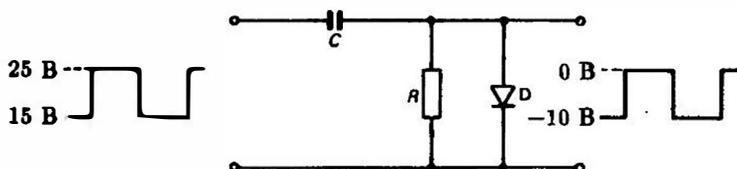


Рис. 28.18. Фиксация выходного сигнала на нулевом уровне при его отрицательной полярности.

Чтобы нарисовать график выходного сигнала, нужно сначала нарисовать входной сигнал и затем провести линию нулевого уровня. Если диод включен таким образом, что ограничивает положительные отклонения сигнала, то весь выходной сигнал будет расположен ниже нулевого уровня, и наоборот.

Схемы фиксации можно применять не только для сигналов прямоугольной формы. На рис. 28.19 показана схема фиксации синусоидального сигнала.

Для фиксации сигнала на уровнях, отличных от нулевого, последовательно с диодом включается источник ЭДС, который смещает диод в

прямом (рис. 28.20(а)) или обратном (рис. 28.20(б)) направлении. На схеме рис. 28.20(б) на диод подано обратное смещение $+5$ В, в результате чего выходной сигнал не может иметь значение, большее $+5$ В. Поскольку схема фиксации не изменяет размах входного сигнала, то выходной сигнал изменяется от $+5$ В до -15 В при общем размахе 20 В.

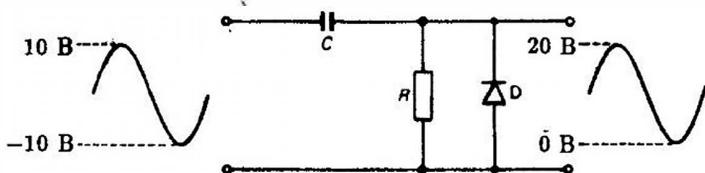


Рис. 28.19. Фиксация уровня синусоидального сигнала.

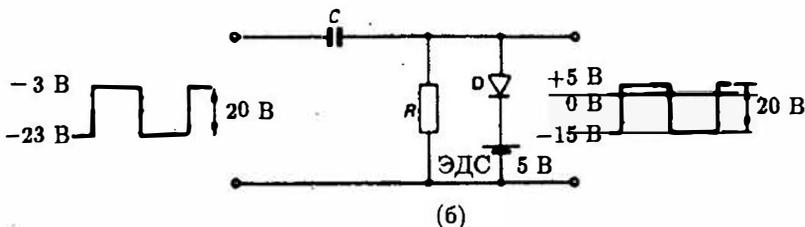
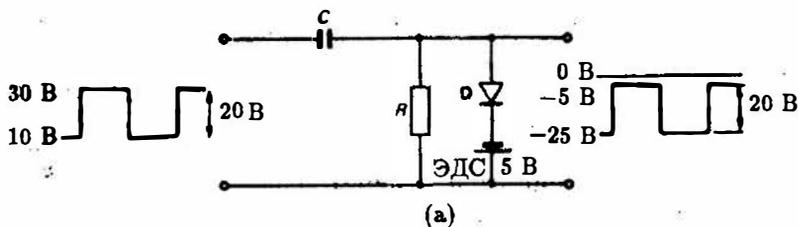


Рис. 28.20. Фиксация сигнала на уровне -5 В (а) и $+5$ В (б).

Источники питания II

Выпрямление тока

Существует два типа выпрямителей.

1. *Однополупериодный выпрямитель*, показан на рис. 29.1. Диод D_1 в схеме на рис. 29.1(а) проводит ток только в течение положительных полупериодов входного напряжения, обеспечивая формирование на выходе выпрямителя напряжение только положительной полярности. Если изменить полярность включения диода (рис. 29.1(б)), то на выходе выпрямителя будут воспроизводиться только отрицательные полупериоды входного напряжения. Выходное напряжение содержит постоянную составляющую (рис. 29.2), уровень которой приблизительно вдвое ниже максимального (пикового) уровня напряжения ($0,318V_p$, где V_p — максимальное напряжение).
2. *Двухполупериодный выпрямитель*, показан на рис. 29.3. В этом случае используется трансформатор с отводом от средней точки вторичной обмотки. ЭДС, индуцируемые в каждой из половин вторичной об-

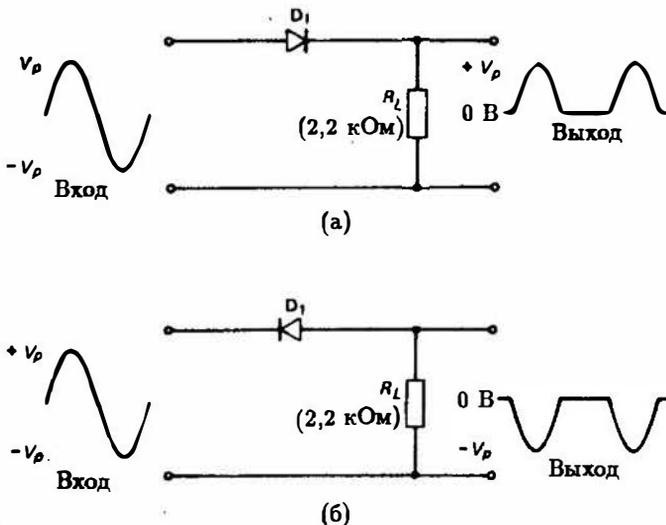


Рис. 29.1. Однополупериодный выпрямитель с положительной (а) и отрицательной (б) полярностью выходного напряжения.



Рис. 29.2.

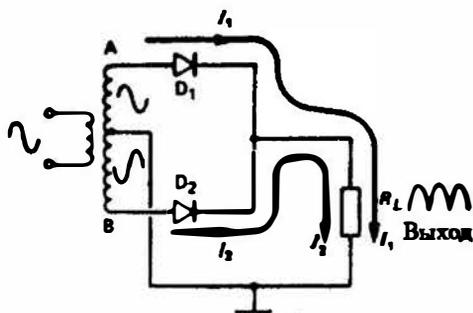
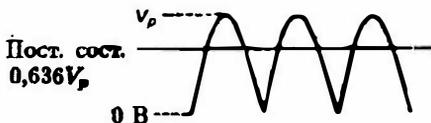


Рис. 29.3. Двухполупериодный выпрямитель с использованием трансформатора с отводом от средней точки вторичной обмотки.

Рис. 29.4. Уровень постоянной составляющей при двухполупериодном выпрямлении синусоидального тока вдвое выше ($0,636V_p$), чем при однополупериодном выпрямлении.

мотки, в любой момент времени равны по величине и противоположны по знаку. Для одного полупериода входного напряжения потенциал точки А положителен, а потенциал точки В отрицателен по отношению к среднему выводу вторичной обмотки, для другого полупериода ситуация изменяется на обратную. В первом случае открыт диод D_1 и через этот диод и нагрузку R_L протекает ток I_1 . Во втором случае открыт диод D_2 и ток I_2 протекает через нагрузку R_L в том же направлении, что и ток I_1 . Форма выходного напряжения показана на рис. 29.4. В данном случае уровень постоянной составляющей на выходе выпрямителя вдвое выше, чем при однополупериодном выпрямлении тока ($0,636V_p$, или приблизительно две трети от максимального напряжения).

Мостовой выпрямитель

Еще одна схема, обеспечивающая двухполупериодное выпрямление тока, показана на рис. 29.5. Это так называемый мостовой выпрямитель. В течение положительного полупериода входного напряжения (рис. 29.6(a)) потенциал точки А положителен, а потенциал точки В отрицателен. Диоды D_1 и D_3 открыты, и ток I_1 протекает через нагрузку R_L в направлении, указанном стрелкой (сверху вниз на рисунке). В течение отрицательного

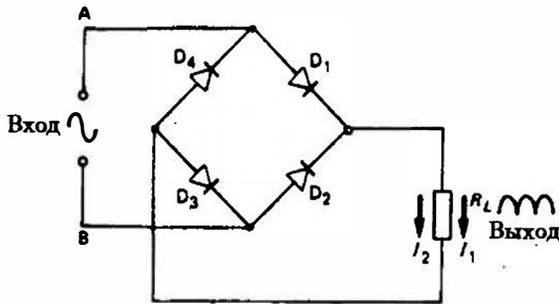


Рис. 29.5. Мостовой выпрямитель.

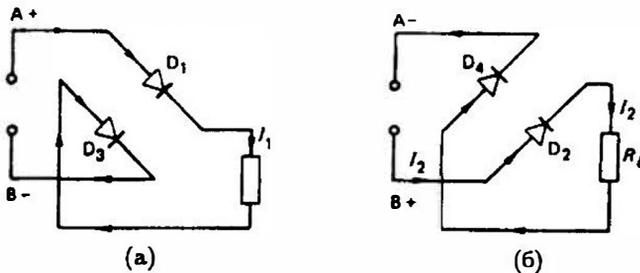


Рис. 29.6.

полупериода (рис. 29.6(б)), напротив, потенциал точки А отрицателен, а потенциал точки В положителен. Теперь открыты диоды D_2 и D_4 , и ток протекает через нагрузку R_L в том же самом направлении.

Для мостового выпрямителя не нужен трансформатор с отводом от средней точки вторичной обмотки. Однако трансформатор может быть использован для изменения уровня переменного напряжения на входе этого выпрямителя.

Накопительный конденсатор

Для снижения уровня переменных составляющих выпрямленного тока используется накопительный конденсатор C_1 , включаемый параллельно нагрузке (рис. 29.7). Этот конденсатор заряжается до максимального входного напряжения и затем разряжается через нагрузку R_L , предотвращая быстрый спад напряжения. На рис. 29.8 иллюстрируется влияние накопительного конденсатора на форму выходного напряжения однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей. В обоих случаях выходное напряжение содержит значительную по величине постоянную составляющую, на которую наложены малые пульсации напряжения. Амплитуда этих пульсаций определяется постоянной времени (RC -постоянной) для используемого накопительного конденсатора и нагруз-

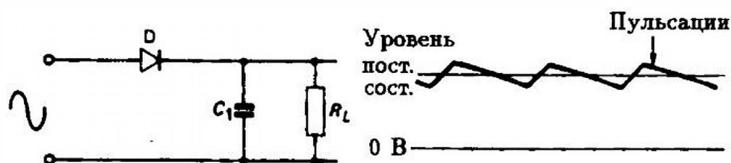


Рис. 29.7. Источник питания постоянного тока с накопительным конденсатором.

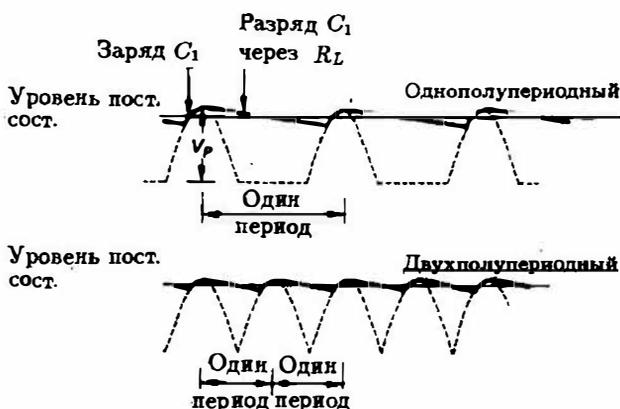


Рис. 29.8. Влияние накопительного конденсатора на форму выпрямленного синусоидального напряжения.

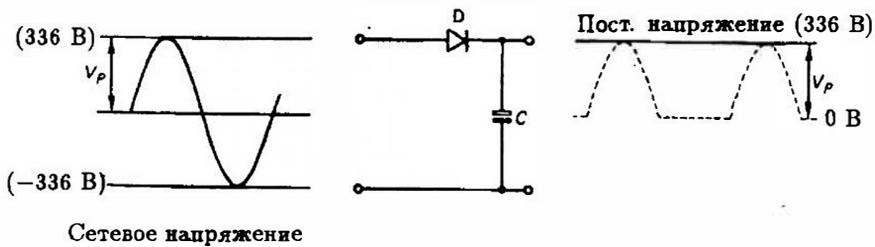
зочного резистора. Поэтому накопительный конденсатор должен иметь значительную емкость — от 100 до 5000 мкФ (и даже больше).

Сравнение двух временных диаграмм, представленных на рис. 29.8, показывает, что двухполупериодное выпрямление тока имеет следующие преимущества:

1. Время разряда накопительного конденсатора меньше, поэтому амплитуда пульсаций выходного напряжения тоже меньше.
2. Частота пульсаций вдвое превышает частоту входного питающего напряжения переменного тока, тогда как при однополупериодном выпрямлении частота пульсаций совпадает с частотой питающего напряжения. Например, если выпрямитель питается от бытовой электросети, то для двухполупериодного выпрямителя частота пульсаций будет равна $2 \cdot 50 = 100$ Гц, а для однополупериодного — только 50 Гц. Как будет показано далее, более высокочастотные пульсации отфильтровываются легче.

Напряжение холостого хода

Напряжением холостого хода называют величину выходного напряжения источника питания при нулевом токе нагрузки, т. е. при отключенной



Сетевое напряжение

Рис. 29.9. Напряжение холостого хода равно максимальному входному напряжению.

нагрузке. На рис. 29.9 показан простой источник питания без нагрузочного резистора. Накопительный конденсатор заряжается, как обычно, до максимального значения входного напряжения. Однако, если нагрузка не подключена (*no load*), этот конденсатор сохраняет свой заряд и обеспечивает тем самым постоянное значение выходного напряжения (равное максимальному входному напряжению) без каких-либо пульсаций. Таким образом, напряжение холостого хода V_{nl} — это максимально возможное выходное напряжение источника питания. При питании от бытовой электросети с напряжением $V_{\text{ср.кв.}} = 240$ В (среднеквадратическое значение) напряжение холостого хода

$$V_{nl} = V_p = 1,4 \cdot V_{\text{ср.кв.}} = 1,4 \cdot 240 = 336 \text{ В.}$$

Максимальное обратное напряжение

Важный фактор, который необходимо принимать во внимание при выборе диодов для источников питания постоянного тока, — максимальное напряжение, приложенное к диоду в «непроводящем» полупериоде. Эта величина называется максимальным обратным напряжением. Рассмотрим схему на рис. 29.9. Максимальное значение потенциала катода диода D равно напряжению холостого хода 336 В. Потенциал катода изменяется от положительного максимума +336 В до отрицательного минимума -336 В. Максимальное обратное напряжение, которое должен выдерживать диод, достигается, когда потенциал анода отрицателен и максимален по абсолютной величине, то есть равен -336 В. В этом случае на диоде падает напряжение $336 + 336 = 672$ В. Таким образом, максимальное обратное напряжение вдвое больше напряжения холостого хода, т. е. вдвое больше максимального входного напряжения.

RC-сглаживание

Пульсации напряжения в выходном сигнале выпрямителя могут быть уменьшены с помощью фильтра нижних частот (сглаживающего фильтра). Резистор R_1 и конденсатор C_2 в схеме на рис. 29.10 образуют простейший RC-фильтр. Для эффективного ослабления пульсаций посто-

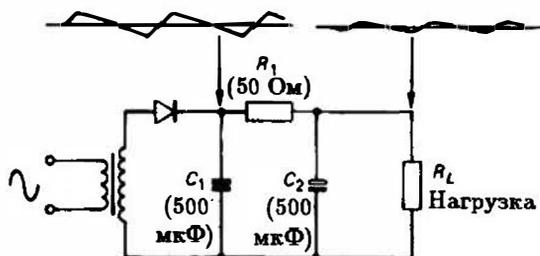


Рис. 29.10. Источник питания с RC -фильтром.

янная времени R_1C_2 должна быть очень велика по сравнению с периодом пульсаций. При заданной постоянной времени чем короче период пульсаций (т. е. чем выше их частота), тем эффективнее осуществляется сглаживание. Именно поэтому пульсации на выходе двухполупериодного выпрямителя сглаживаются лучше, чем пульсации на выходе однополупериодного выпрямителя.

Емкость конденсатора C_2 сглаживающего фильтра должна быть большой — от 100 до 5000 мкФ, т. е. сравнима с емкостью накопительного конденсатора C_1 . Сопротивление резистора R_1 , наоборот, должно быть мало, в противном случае ток нагрузки будет создавать на нем большое падение напряжения и выходное напряжение источника питания уменьшится. Номинал этого резистора выбирается в диапазоне 1–100 Ом в зависимости от величины тока нагрузки.

LC -сглаживание

Более эффективная схема сглаживания пульсаций показана на рис. 29.11. Катушка индуктивности L_1 и конденсатор C_2 образуют фильтр нижних частот. Дроссель L_1 сглаживающего фильтра имеет большую индуктивность (100 мГн — 10 Гн), благодаря чему сглаживаются изменения тока, протекающего через дроссель, и, как следствие, пульсации выходного напряжения. Низкое активное сопротивление дросселя — одно из его преимуществ, большие габариты — недостаток. Заметим, что в отличие от накопительного конденсатора, который повышает уровень постоянной составляющей выходного напряжения источника питания, сглаживающая цепь оставляет этот уровень практически неизменным. Она только ослабляет переменную составляющую на выходе источника питания.

Стабилизация

Увеличение тока, потребляемого от источника питания, приводит к уменьшению его выходного напряжения. Это связано с тем, что источник питания имеет свое внутреннее сопротивление, представляющее собой сумму сопротивлений обмотки трансформатора, выпрямительных диодов

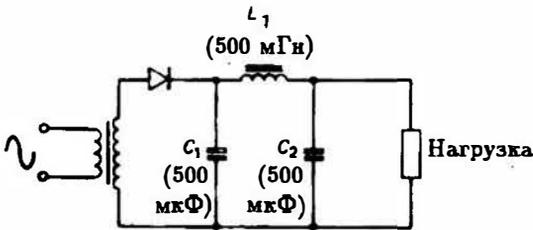


Рис. 29.11. Источник питания постоянного тока с LC-фильтром.

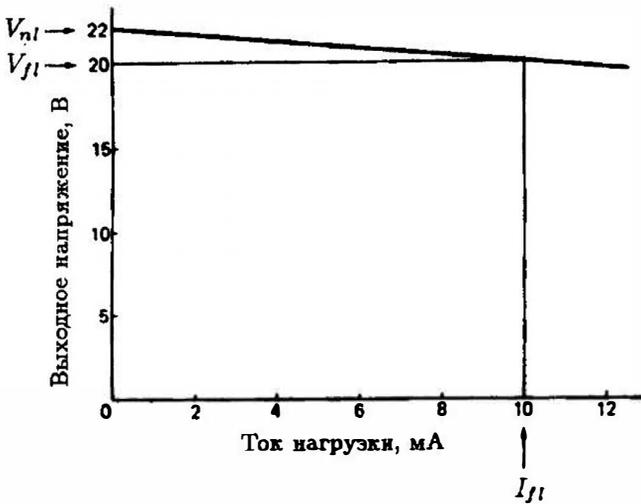


Рис. 29.12. Нагрузочная характеристика нестабилизированного источника питания.

и резистора или дросселя сглаживающего фильтра. Рисунок 29.12 иллюстрирует изменение напряжения на выходе источника питания при изменении тока нагрузки. Представленная кривая называется нагрузочной характеристикой (кривой). Выходное напряжение максимально, когда ток нагрузки равен нулю, т. е. при холостом ходе. Напряжение на выходе источника питания, которое он обеспечивает при установленной полной нагрузке или номинальном (полном) токе нагрузки (*full load*), называется номинальным выходным напряжением источника питания V_{fl} .

Изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения задается в процентах и определяется как

$$\frac{\text{Напряжение холостого хода} - \text{Номинальное напряжение}}{\text{Номинальное напряжение}} \cdot 100\% = \\ = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \cdot 100\%.$$

Например, если источник питания обеспечивает напряжение 22 В на холостом ходу и напряжение 20 В при номинальном токе нагрузки 10 мА, то изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки от нуля до номинального значения составляет

$$\frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \cdot 100\% = \frac{22 - 20}{20} \cdot 100\% = 10\%.$$

Стабилизированные источники питания

Чувствительность выходного напряжения источника питания к изменению тока нагрузки можно уменьшить, используя стабилизацию (автоматическое регулирование) напряжения. Этот метод позволяет поддерживать выходное напряжение источника питания на постоянном уровне при изменении тока нагрузки. Существуют два способа стабилизации: параллельная стабилизация и последовательная стабилизация.

Параллельные стабилизаторы

Блок-схема параллельного стабилизатора (или, более точно, стабилизатора с параллельным включением регулирующего элемента) представлена на рис. 29.13. На рис. 29.14 приведена схема источника питания с параллельной стабилизацией, где в качестве регулирующего элемента используется стабилитрон. Схема рассчитывается так, чтобы стабилитрон работал на участке пробоя. При этом падение напряжения на нем практически не изменяется даже при очень больших изменениях тока, поэтому неизменным остается и выходное напряжение источника питания.

Параллельная стабилизация основана на принципе разделения тока, в соответствии с которым сумма тока нагрузки I_L и тока стабилитрона I_Z поддерживается постоянной. Если, например, ток нагрузки возрастает на 2 мА, то на те же 2 мА уменьшается ток регулирующего элемента, и наоборот.

Через гасящий резистор R_1 , включенный последовательно с нагрузкой, протекает полный ток, и падение напряжения V_1 на этом резисторе

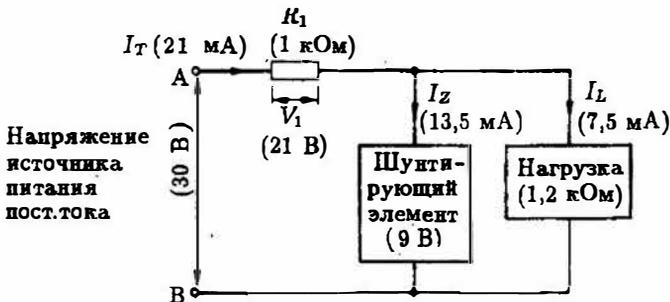


Рис. 29.13. Блок-схема параллельного стабилизатора напряжения.

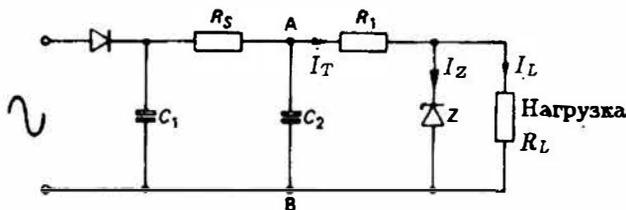


Рис. 29.14. Источник питания с параллельной стабилизацией.

равно разности между нестабилизированным напряжением выпрямителя V_{AB} и напряжением пробоя стабилитрона V_Z :

$$V_1 = V_{AB} - V_Z.$$

При указанных на рис. 29.13 параметрах стабилизатора напряжение на нагрузке $V_L = V_Z = 9$ В.

$$V_1 = V_{AB} - V_Z = 30 - 9 = 21 \text{ В.}$$

$$\text{Общий ток } I_T = \frac{21 \text{ В}}{1 \text{ кОм}} = 21 \text{ мА.}$$

$$\text{Ток нагрузки } I_L = \frac{\text{Напряжение на нагрузке}}{\text{Сопrotивление нагрузки}} = \frac{9 \text{ В}}{1,2 \text{ кОм}} = 7,5 \text{ мА.}$$

$$\text{Ток стабилитрона } I_Z = I_T - I_L = 21 - 7,5 = 13,5 \text{ мА.}$$

Если ток нагрузки уменьшить теперь на 2,5 мА (до 5 мА), то ток стабилитрона возрастет на 2,5 мА и станет равным $13,5 + 2,5 = 16$ мА.

На холостом ходу, когда $I_L = 0$, весь полный ток I_T будет протекать через стабилитрон: $I_Z = I_T$. Таким образом, независимо от того, есть нагрузка или она отключена, источник питания постоянно потребляет максимальный ток I_T . Это один из недостатков параллельного стабилизатора.

На рис. 29.15 показана типичная нагрузочная характеристика источника питания с параллельной стабилизацией, схема которого представлена на рис. 29.14. Напряжение на нагрузке начинает быстро падать, когда ток нагрузки превысит номинальное значение (близкое к 21 мА). При этих значениях тока нагрузки почти весь общий ток I_T ответвляется в нагрузку. Ток стабилитрона становится слишком мал и не может удержать стабилитрон в области пробоя, в результате происходит резкое падение выходного напряжения стабилизатора. Для обеспечения эффективной стабилизации значение нестабилизированного напряжения обычно выбирается таким, чтобы оно приблизительно втрое превышало напряжение стабилизации стабилитрона.

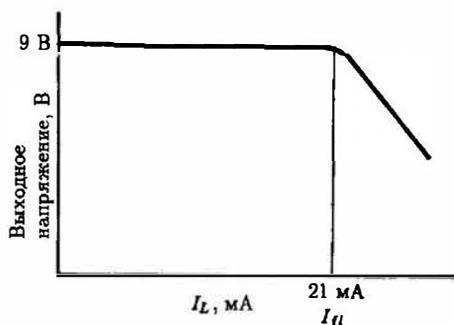


Рис. 29.15. Нагрузочная характеристика стабилизированного источника питания.

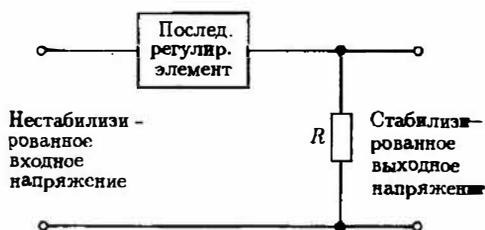


Рис. 29.16. Блок-схема последовательного стабилизатора напряжения.

Последовательная стабилизация

Лучшими параметрами и более высокой эффективностью характеризуются последовательные стабилизаторы (или, более точно, стабилизаторы с последовательным включением регулирующего элемента), в которых применяется транзистор или тиристор, включаемый последовательно с нагрузкой. Простая блок-схема последовательного стабилизатора представлена на рис. 29.16. Стабилизатор состоит из «последовательного» регулирующего элемента и стабилизирующего нагрузочного резистора, обеспечивающего некоторый минимальный нагрузочный ток.

Последовательный транзисторный стабилизатор

Базовая схема последовательного стабилизатора с использованием транзистора показана на рис. 29.17. Выходное напряжение снимается с эмиттера транзистора T_1 , и, как хорошо видно из рис. 29.18, где та же схема изображена по-иному, этот транзистор включен по схеме эмиттерного повторителя. Стабилитрон поддерживает на постоянном уровне потенциал базы. Поскольку при прямом смещении потенциал эмиттера отслеживает потенциал базы, оставаясь всегда ниже последнего на 0,6 В (для кремниевого транзистора), то выходное напряжение стабилизатора также сохраняет свой постоянный уровень.

Эмиттерный повторитель работает как усилитель тока и обеспечивает работу источника питания на нагрузку, потребляющую большой ток. Стабилитрон является регулирующим элементом и источником опорного напряжения и потребляет меньший ток по сравнению со стабилитроном, работающим в параллельном стабилизаторе. Для эффективной стабилизации ток через стабилитрон должен быть приблизительно в 5 раз больше базового тока транзистора.

Рассмотренный выше простой последовательный стабилизатор имеет два главных недостатка.

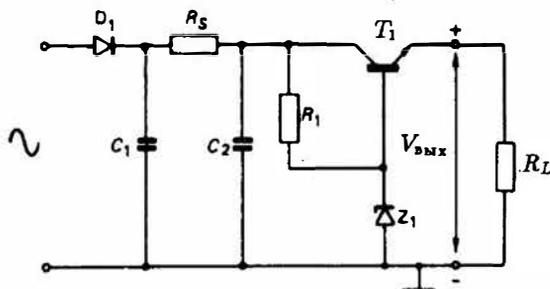


Рис. 29.17. Источник питания с последовательной стабилизацией напряжения.

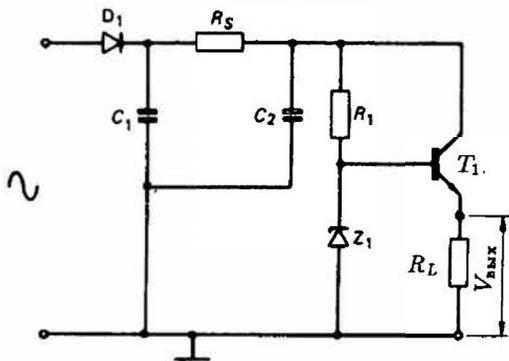


Рис. 29.18. Нарисованная по-другому схема рис. 29.17. Здесь явно видно, что транзистор T_1 включен по схеме эмиттерного повторителя.

1. При больших токах нагрузки необходимо использовать мощные стабилизаторы и транзисторы с большим коэффициентом усиления тока.
2. Стабильность выходного напряжения такого стабилизатора недостаточна для некоторых применений.

Первый недостаток можно преодолеть, если увеличить коэффициент усиления тока с помощью дополнительного транзистора T_2 , образующего второй каскад эмиттерного повторителя (рис. 29.19). При этом ток нагрузки может быть очень велик (амперы), тогда как ток стабилизатора по-прежнему остается очень малым. Стабильность выходного напряжения можно улучшить, если усилить изменение напряжения еще до сравнения его с опорным напряжением стабилизатора, как показано на рис. 29.20. Здесь T_1 — обычный последовательный транзистор, а транзистор T_2 работает как усилитель изменения напряжения. Стабилизатор выполняет только функцию источника опорного напряжения и, следовательно, может быть маломощным.

Транзистор T_2 сравнивает выходное напряжение с опорным напряжением стабилизатора. Любое изменение выходного напряжения усиливает-

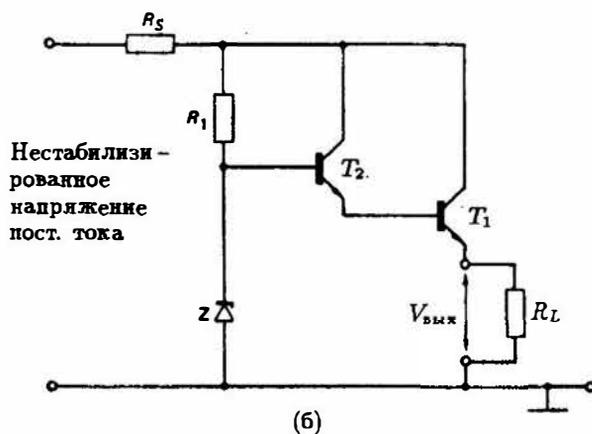
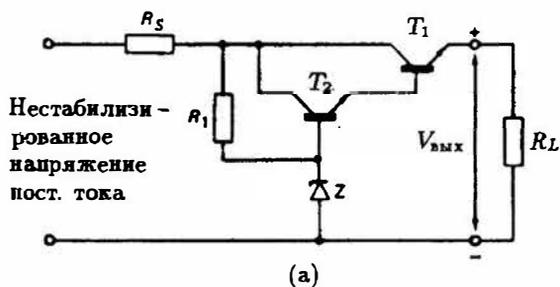


Рис. 29.19. Последовательный стабилизатор с двухкаскадным эмиттерным повторителем (приведены два варианта изображения одной и той же схемы).

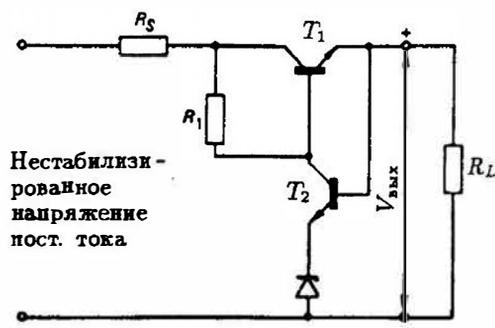


Рис. 29.20. Последовательный стабилизатор с усилителем изменения напряжения, который обеспечивает улучшение стабильности выходного напряжения.

ся и подается на базу транзистора T_1 , который поддерживает выходное напряжение на постоянном уровне. Предположим, например, что некоторое внешнее возмущение вызвало увеличение выходного напряжения $V_{\text{вых}}$. Тогда потенциал базы транзистора T_2 возрастет относительно потенциала эмиттера, который зафиксирован опорным напряжением стабилитрона, и ток через этот транзистор увеличится, а напряжение на его коллекторе уменьшится. В результате уменьшится разность потенциалов между базой и эмиттером транзистора T_1 и, как следствие, уменьшится ток через транзистор T_1 и напряжение на нагрузке $V_{\text{вых}}$. Таким образом компенсируется изменение $V_{\text{вых}}$. Различными модификациями базовой схемы последовательного стабилизатора можно добиться улучшения его параметров.

Цепь защиты от перегрузки

Одна из проблем, с которой приходится сталкиваться при использовании последовательного стабилизатора, — обеспечение защиты последовательного регулирующего транзистора от перегрузки. Резкое возрастание тока через этот транзистор при перегрузке или коротком замыкании в цепи нагрузки может привести к необратимому повреждению транзистора. Один из возможных способов защиты от перегрузки представлен на рис. 29.21. Здесь T_2 — транзистор защиты от перегрузки. Ток нагрузки I_L протекает через измерительный резистор R_1 и создает на нем падение напряжения, обеспечивающее прямое смещение эмиттерного перехода этого транзистора. Когда ток нагрузки находится в пределах нормы, падение напряжения на R_1 мало и транзистор T_2 закрыт. При увеличении тока нагрузки выше допустимого уровня падение напряжения на резисторе R_1 возрастает и открывает транзистор T_2 , он начинает проводить ток. В

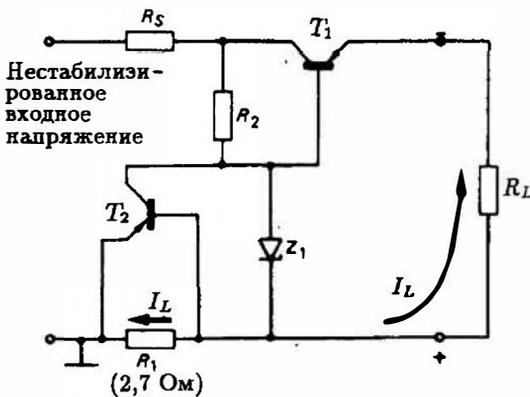


Рис. 29.21. Последовательный стабилизатор с цепью защиты от перегрузки на транзисторе T_2 .

проводящем состоянии транзистор T_2 «отбирает» часть тока у транзистора T_1 , обеспечивая его защиту. В схему защиты можно также включить устройство автоматического отключения источника питания от сети, если ток нагрузки превышает допустимый уровень.

Инверторы

Инверторы преобразуют входное напряжение постоянного тока в выходной синусоидальный сигнал. Они часто содержат схемы стабилизации выходного напряжения. Инверторы применяются главным образом в качестве резервных генераторов при аварийных сбоях питания.

Инверторы, вырабатывающие гармоническое напряжение, могут быть реализованы как генераторы класса А или В. Однако линейный режим работы таких генераторов связан с высокими потерями, поэтому обычно используются переключающие элементы, вырабатывающие прямоугольный периодический сигнал, который затем фильтруется для получения на выходе гармонического напряжения (рис. 29.22).



Рис. 29.22.

Конверторы

Конверторы преобразуют постоянное напряжение одной величины в постоянное напряжение другой величины. Конвертор состоит из инвертора, за которым следует выпрямитель. На рис. 29.23 показана простая схема конвертора на основе блокинг-генератора. Выходной сигнал блокинг-генератора представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с периодом, определяемым постоянной времени R_1C_1 . К вторичной обмотке трансформатора подключен диод D_1 для выпрямления импульсного сигнала. Усовершенствованная схема конвертора показана на рис. 29.24. Два блокинг-генератора на транзисторах T_1 и T_2 по очереди передают ток в трансформатор.

Импульсные источники питания

Более эффективными являются импульсные источники питания. В источниках этого типа последовательный регулирующий элемент (одноперационный триодный тиристор или транзистор) работает в режиме переключения. Он открывается или закрывается под управлением прямо-

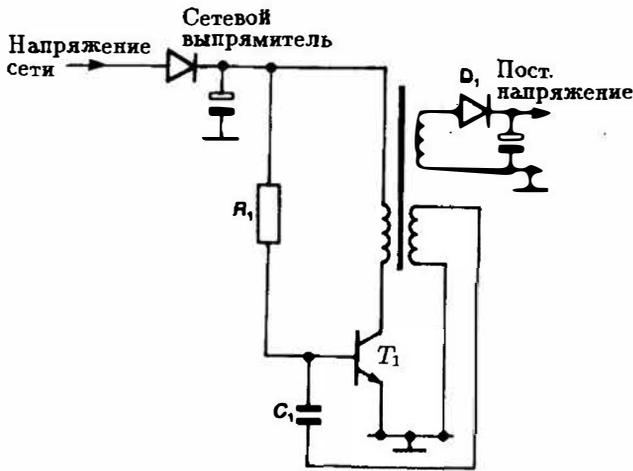


Рис. 29.23.

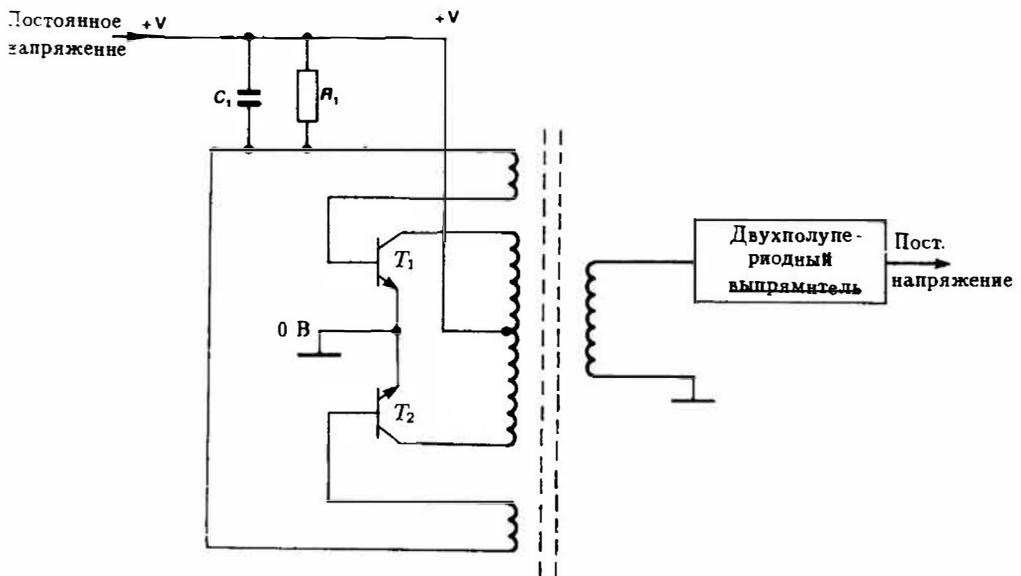


Рис. 29.24.

угольных импульсов, обеспечивающих подстройку и стабилизацию выходного напряжения.

Импульсный источник питания по существу ничем не отличается от конвертора. Он преобразует нестабилизированное входное напряжение постоянного тока в пульсирующее напряжение и затем в стабилизированное постоянное напряжение (рис. 29.25). Частота переключения регу-

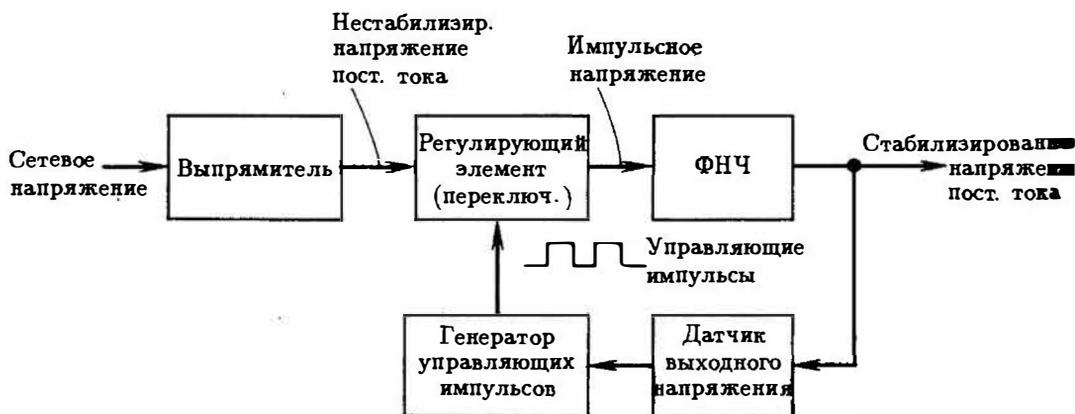


Рис. 29.25.

лирующего элемента определяет частоту пульсаций на выходе, которые в значительной степени сглаживаются фильтром нижних частот.

Как видно из рис. 29.25, переменное сетевое напряжение сначала поступает на выпрямитель. После выпрямителя полученное нестабилизированное напряжение постоянного тока подается на анод переключающего элемента. Этот элемент, который может быть транзистором или тиристором, открывается и закрывается в определенные моменты времени под действием импульсов, поступающих от блока управления. Через открытый переключающий элемент заряжается накопительный конденсатор. Заряд, запасаемый конденсатором (и, следовательно, выходное напряжение источника питания), определяется временем проводящего состояния этого элемента. Стабилизация выходного напряжения осуществляется путем изменения соотношения длительностей открытого или закрытого состояния переключающего элемента (т. е. изменения коэффициента заполнения последовательности управляющих импульсов) в зависимости от величины выходного напряжения, регистрируемой специальным датчиком. Уменьшение выходного напряжения относительно установленного уровня компенсируется подачей более широких управляющих импульсов, удерживающих переключающий элемент в открытом состоянии в течение более длительных промежутков времени, и наоборот.

30

Усилители

Классификация усилителей

В соответствии с используемым режимом работы различают три основных класса усилителей.

Класс А

До сих пор рассматривались транзисторные усилители, в которых условия смещения задавались таким образом, чтобы усилитель работал на линейном участке своей передаточной характеристики. Для получения максимального неискаженного выходного сигнала рабочая точка Q выбиралась в середине передаточной характеристики. Такие усилители называются усилителями класса А или усилителями, работающими в режиме класса А. На рис. 30.1 показана передаточная характеристика транзистора. Точка А представляет режим работы усилителей класса А. Входной сигнал достаточно мал и не может вывести транзистор из области прямого смещения перехода база-эмиттер. Следовательно, транзистор находится в проводящем состоянии в течение всего периода входного сигнала, т. е. 360° .

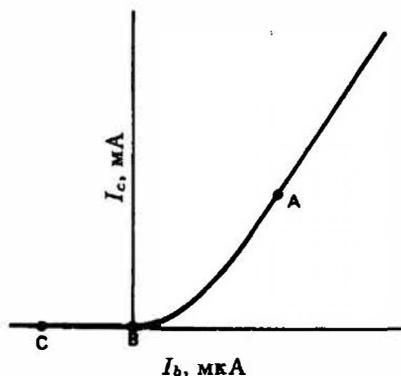


Рис. 30.1. Точки А, В и С на передаточной характеристике транзистора представляют рабочие точки усилителей класса А, В и С соответственно.

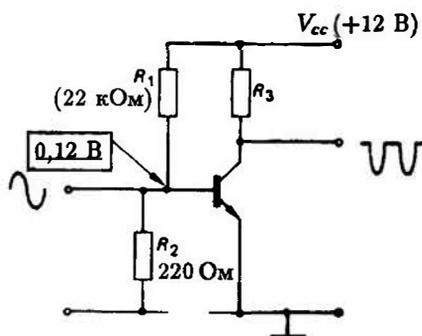


Рис. 30.2. Усилитель класса В. Делитель напряжения на резисторах R_1 и R_2 создает небольшое прямое смещение V_{BE} (0,12 В) для уменьшения искажения формы сигнала.

Преимуществом усилителей класса А является то, что они усиливают сигнал без искажений, поэтому такие усилители широко используются в качестве предвыходных каскадов усилителей мощности, УПЧ и УРЧ. Однако их КПД невелик (менее 30%); это связано с тем, что транзистор проводит ток и, следовательно, рассеивает мощность независимо от наличия или отсутствия входного сигнала.

Класс В

В усилителях этого класса в отсутствие сигнала транзистор находится на границе области отсечки (в точке отсечки). Точка В на рис. 30.1 представляет режим работы усилителей класса В. Транзистор проводит ток только в течение одного полупериода (180°) входного сигнала, как показано на рис. 30.2. В режиме класса В достигается более высокий КПД усилителя (50–60%), так как транзистор рассеивает мощность только в одном полупериоде входного сигнала. Усилители класса В применяются в двухтактных каскадах усиления мощности и часто работают в режиме небольшого прямого смещения эмиттерных переходов транзисторов для уменьшения искажений выходного сигнала.

Класс С

В этом случае транзистор смещен в область отсечки (точка С на рис. 30.1). В каждом периоде входного сигнала транзистор проводит ток в течение времени, меньшего длительности полупериода (менее 180°). Выходной сигнал такого усилителя имеет пульсирующий характер, как показано на рис. 30.3. Усилители класса С имеют высокий КПД (65–85%). Они применяются в генераторах и усилителях мощности РЧ.

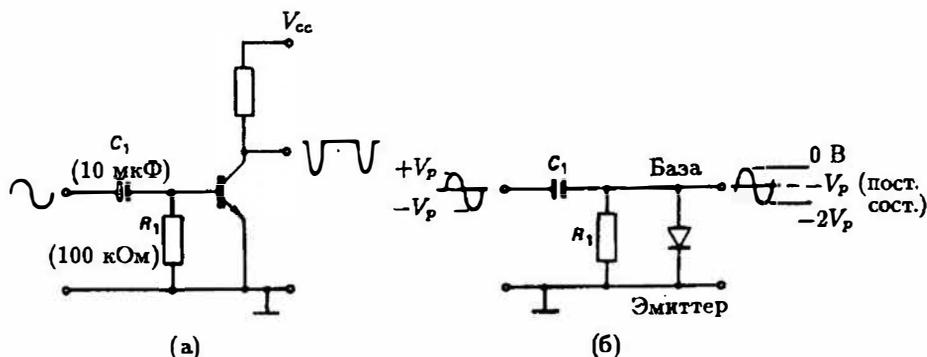


Рис. 30.3. Динамическое смещение в усилителе класса С. (а) Схема усилителя. (б) Эквивалентная схема фиксации уровня на элементах $C_1 - R_1$ и эмиттерном переходе транзистора.

Смещение

Смещение, задающее работу усилителя в режиме класса А, обеспечивается делителем напряжения, как уже объяснялось ранее. Делитель напряжения создает необходимое напряжение для прямого смещения перехода база-эмиттер.

Усилители класса В работают в точке отсечки, т. е. при нулевом напряжении между базой и эмиттером. В этом случае необходимость в цепи смещения отпадает. Однако, для того чтобы не работать на нелинейном участке характеристики, на базу транзистора подается небольшое напряжение смещения (0,1–0,2 В) с помощью делителя $R_1 - R_2$, показанного на рис. 30.2. Рабочая точка Q оказывается при этом чуть выше точки отсечки.

Усилители класса С смещаются в область отсечки. Другими словами, на переход база-эмиттер подается напряжение обратного смещения. Источником этого смещения является сам входной сигнал, подаваемый на транзистор. Поэтому смещение в усилителях класса С называется еще *сигнальным*, или *динамическим*, смещением. Оно может быть реализовано двумя способами.

Наиболее эффективный способ представлен на рис. 30.3(а). В отсутствие сигнала потенциал базы равен нулю. Как видно из рис. 30.3(б), эмиттерный переход транзистора вместе с конденсатором C_1 и резистором R_1 образует схему фиксации уровня, которая обеспечивает воспроизведение входного сигнала вместе с отрицательной постоянной составляющей. Уровень этой составляющей приблизительно равен пиковому напряжению $-V_p$. Поэтому на базе транзистора действует напряжение обратного смещения, приблизительно равное амплитудному значению напряжения входного сигнала. Величину напряжения обратного смещения (т. е. «глу-

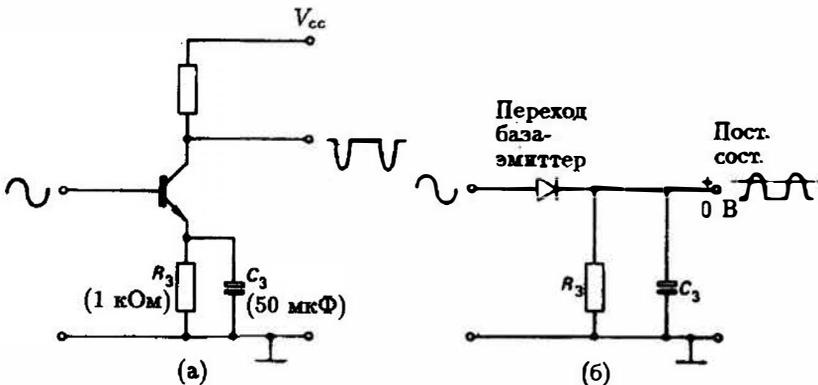


Рис. 30.4. Второй способ динамического смещения в усилителях класса С. а) Схема усилителя. б) Эквивалентная схема выпрямления сигнала на элементах R_3 , C_3 и эмиттерном переходе транзистора.

бину» режима С) можно уменьшить, уменьшая постоянную времени $C_1 R_1$ (обычно путем выбора резистора R_1 меньшего номинала).

Второй способ представлен на рис. 30.4. В этом случае за счет заряда конденсатора C_3 на эмиттере транзистора устанавливается положительный потенциал. При нулевом потенциале базы транзистора положительный потенциал эмиттера создает обратное смещение перехода база-эмиттер. Как видно из рис. 30.4(б), этот переход транзистора вместе с конденсатором C_3 и резистором R_3 выполняет функцию выпрямителя входного сигнала и поддерживает положительный заряд на конденсаторе C_3 .

Многокаскадные усилители

На рис. 30.5 показана схема двухкаскадного усилителя ЗЧ с RC -связью между каскадами. Транзисторы T_1 и T_2 работают в режиме класса А, задаваемом цепями смещения $R_1 - R_2$ и $R_5 - R_6$ соответственно. Эти два каскада изолированы друг от друга по постоянному току с помощью разделительного конденсатора C_2 .

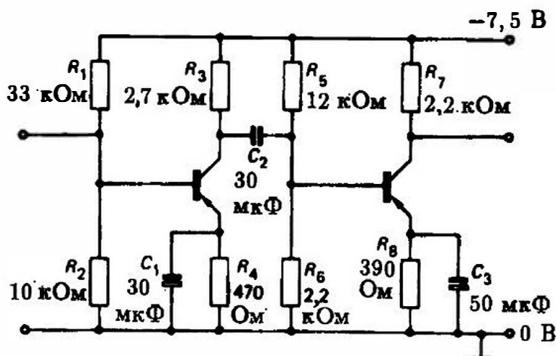


Рис. 30.5. Двухкаскадный УЗЧ.

Полоса пропускания

Типичная АЧХ усилителя показана на рис. 30.6. Видно, что коэффициент усиления сохраняет постоянное значение в интервале средних частот, но спадает на низких и высоких частотах.

Спад коэффициента усиления на низкочастотном участке АЧХ вызван влиянием разделительного конденсатора C_2 в схеме на рис. 30.5. При уменьшении частоты реактивное сопротивление конденсатора возрастает, что приводит к уменьшению амплитуды сигнала, подаваемого на вход второго каскада на транзисторе T_2 . Развязывающие конденсаторы C_1 и C_3 также снижают усиление на низких частотах, но в гораздо меньшей степени, так что их влиянием можно пренебречь.



Рис. 30.6. Типичная АЧХ усилителя звуковых частот.

Спад коэффициента усиления на высоких частотах связан с тем, что называется *паразитными*, или *межэлектродными*, *емкостями* транзистора¹⁾. Паразитные емкости существуют между различными электродами транзистора. Они оказывают шунтирующее действие на вход и выход усилителя, что приводит к снижению коэффициента усиления при высоких частотах. Для каждого транзистора можно указать так называемую граничную (предельную) частоту, при которой коэффициент усиления тока транзистора становится слишком мал, чтобы можно было использовать транзистор для усиления сигналов. Это наиболее важное ограничение на использование транзисторов на высоких частотах.

Ширина полосы пропускания усилителя определяется между точками АЧХ на уровне 3 дБ, в которых выходное напряжение составляет 70% своего максимального значения, а выходная мощность — половину своего максимального значения.

Усилители ПЧ

Усилители промежуточной частоты (УПЧ) представляют собой усилители напряжения, в которых роль нагрузки выполняет частотно-избирательная цепь (резонансный контур). Они работают на частоте 470 кГц в АМ-радиовещании, 10,7 МГц в ЧМ-радиовещании и 39,5 МГц в телевидении.

На рис. 30.7 приведена схема типичного УПЧ, используемого в АМ-радиоприемнике. Резисторы R_1 и R_2 образуют цепь смещения для транзистора T_1 , C_2 — развязывающий конденсатор цепи смещения, C_4 — эмиттерный развязывающий конденсатор и R_3 — эмиттерный резистор, обеспечивающий стабилизацию режима транзистора по постоянному току.

¹⁾ А также инерционными процессами диффузионного движения зарядов в области базы транзистора. — Прим. ред.

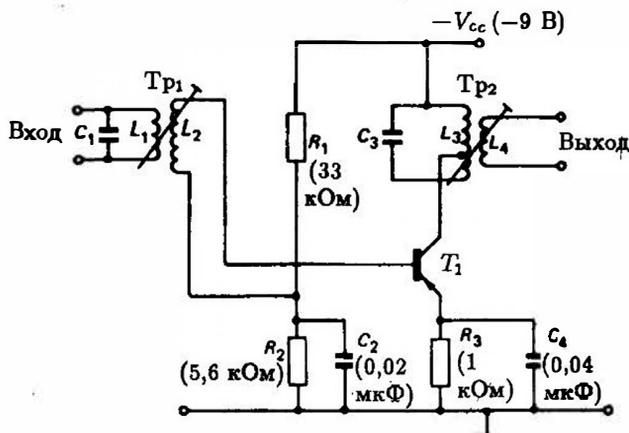


Рис. 30.7. УПЧ для АМ-радиоприемника.

ку. Резонансные контуры C_1L_1 и C_3L_3 настроены на ПЧ 470 кГц. Как на входе, так и на выходе усилителя используется трансформаторная связь. Отвод от первичной обмотки выходного трансформатора Tr_2 сделан для улучшения избирательности УПЧ. Без этого отвода низкое выходное сопротивление r_0 транзистора в схеме с ОЭ шунтирует резонансный контур C_3L_3 , снижая его избирательность. При наличии отвода первичная обмотка образует повышающий автотрансформатор, имеющий t_1 витков в «первичной» обмотке и t_2 витков во «вторичной» обмотке, как показано на рис. 30.8. В этом случае резонансный контур будет шунтироваться сопротивлением, эквивалентным сопротивлению r_0 , приведенному ко вторичной обмотке с коэффициентом трансформации $n = t_1/t_2$, меньшим единицы. Величина эквивалентного сопротивления $R_0 = r_0/n^2$ (см. гл. 7) гораздо больше величины исходного сопротивления r_0 . Благодаря этому уменьшается эффект шунтирования и улучшается селективность резонансного контура.

Усилители мощности

Все рассмотренные нами усилители относятся к категории усилителей напряжения, их основное назначение — получение максимального размаха выходного напряжения. Когда требуется большая выходная мощность, например для «раскачки» мощных громкоговорителей или антенн или питания электродвигателей, применяются усилители мощности. Они характеризуются высоким коэффициентом усиления по мощности, который достигается за счет высоких коэффициентов усиления по напряжению и по току.

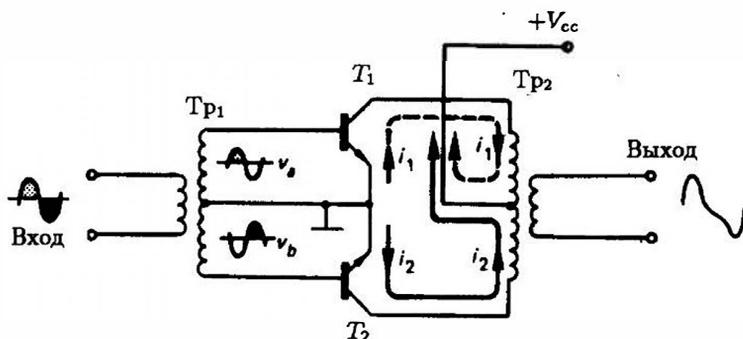


Рис. 30.10. Двухтактный усилитель мощности с двумя идентичными транзисторами и трансформаторным расщепителем фазы.

сигнала формируются в каждом полупериоде на половинах вторичной обмотки этого трансформатора: сигнал V_a , находящийся в фазе с входным сигналом, и сигнал V_b , противофазный входному сигналу. В то время как положительный полупериод сигнала V_a соответствует положительному периоду входного сигнала, положительный полупериод сигнала V_b соответствует отрицательному полупериоду входного сигнала. Транзисторы T_1 и T_2 открываются, когда потенциал базы транзистора становится положительным по отношению к потенциалу эмиттера. Таким образом, транзистор T_1 открыт в течение положительного полупериода сигнала V_a . При этом через него протекает ток i_1 от эмиттера к коллектору и далее через верхнюю половину первичной обмотки выходного трансформатора Tr_2 к источнику питания V_{CC} . Этот ток создает положительный полупериод выходного сигнала на вторичной обмотке трансформатора Tr_2 . Транзистор T_2 открыт в положительном полупериоде сигнала V_b , при этом ток i_2 протекает снизу вверх (в обратном по отношению к току i_1 направлении) через нижнюю половину трансформатора Tr_2 , создавая отрицательный полупериод выходного сигнала на его вторичной обмотке. Выходной трансформатор с отводом от средней точки первичной обмотки объединяет эти два полупериода в один полный период выходного сигнала. Транзисторы T_1 и T_2 включены по схеме с общим эмиттером и имеют при этом относительно высокое выходное сопротивление. Так как сопротивление нагрузки выходного каскада очень мало, обычно менее 10 Ом в случае громкоговорителя, всегда используется согласующий трансформатор Tr_2 .

Выходной сигнал двухтактного усилителя с нулевым смещением эмиттерных переходов транзисторов воспроизводится с искажениями типа «ступенька», как показано на рис. 30.10. Эти искажения связаны с нелинейными участками характеристик двух транзисторов. Искажения возникают в те моменты времени, когда один транзистор начинает открываться, а другой — закрываться. Для устранения этих искажений на

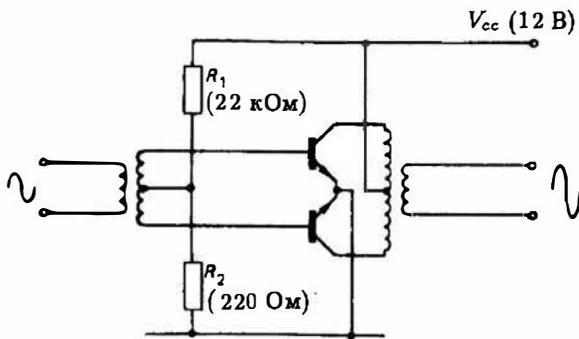


Рис. 30.11. Цепь смещения $R_1 - R_2$ устраняет искажения типа «ступенька».

базы транзисторов подается небольшое напряжение прямого смещения 0,1–0,2 В), как показано на рис. 30.11, где резисторы R_1 и R_2 образуют общую цепь смещения для обоих транзисторов. Нелинейности двух транзисторов компенсируют друг друга, и на выходе воспроизводится неискаженный сигнал.

Транзисторные фазорасщепители

На рис. 30.12 показана схема фазорасщепителя на транзисторе *pnp*-типа. Резисторы R_3 и R_4 имеют равные сопротивления, для того чтобы получить на выходе два равных по величине и противоположных по знаку синусоидальных сигнала, снимаемых с эмиттера и коллектора транзистора. Для обеспечения максимальной величины неискаженного выходного сигнала отношение сопротивлений $R_1 : R_2$ должно находиться в диапазоне от 2 : 1 до 3 : 1. Типичные значения постоянных напряжений, определяющих режим транзистора по постоянному току, указаны на схеме.

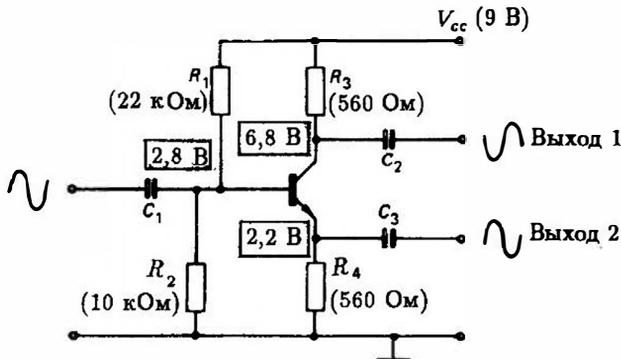


Рис. 30.12. Транзисторный фазорасщепитель.

Двухтактный усилитель на комплементарных транзисторах

Двухтактный усилитель мощности на комплементарных транзисторах позволяет отказаться от использования как фазорасщепителя на входе, так и трансформатора на выходе. В этом усилителе используются два симметричных транзистора, *pnp* и *nnp*-типа, называемые комплементарной парой. Принцип его работы основан на том факте, что положительный сигнал открывает *nnp*-транзистор, а отрицательный сигнал — *pnp*-транзистор. На рис. 30.13 приведена базовая схема двухтактного усилителя на комплементарных транзисторах (иногда называемая каскадом с дополнительной симметрией). Транзисторы T_1 и T_2 работают в режиме класса В, т. е. в точке отсечки. Используются два источника питания: $+V_{CC}$ и $-V_{CC}$. В положительном полупериоде входного сигнала транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 закрыт. Ток i_1 транзистора T_1 создает положительную полуволну тока в нагрузочном резисторе R . В отрицательном полупериоде открывается транзистор T_2 , и теперь его ток i_2 , имеющий противоположное току i_1 направление, протекает через нагрузочный резистор. Таким образом, на нагрузке формируется полный синусоидальный сигнал, соответствующий двум половинам полного периода входного сигнала. Следует отметить, что в рассматриваемом каскаде транзисторы включены по схеме с общим коллектором, то есть как эмиттерные повторители, поскольку выходной сигнал снимается с эмиттеров транзисторов.

На рис. 30.14 приведена полная схема двухтактного усилителя мощности на комплементарных транзисторах вместе с предвыходным каскадом.

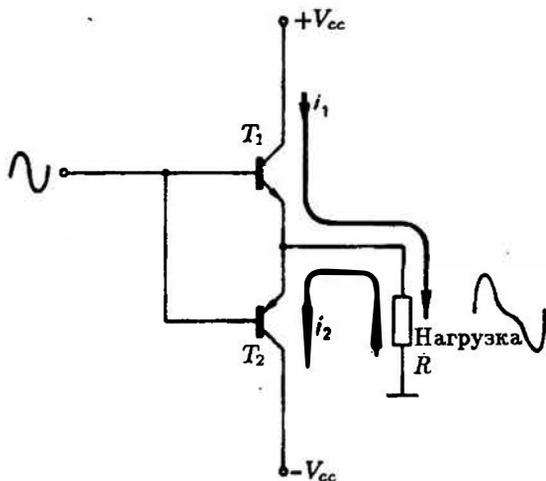


Рис. 30.13. Базовая схема двухтактного усилителя на комплементарных транзисторах.

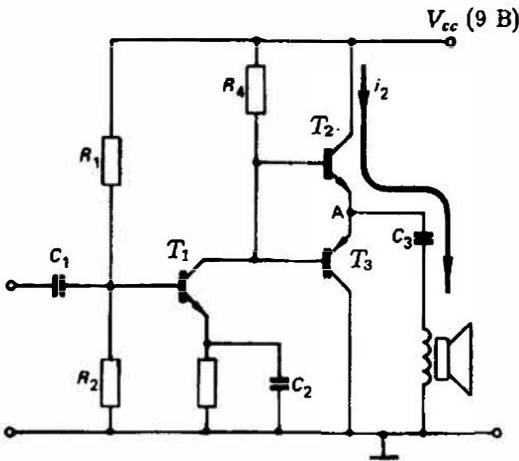


Рис. 30.14. Двухтактный усилитель на комплементарных транзисторах с независимой цепью смещения для транзистора T_1 предвыходного каскада.

Схема модифицирована для питания от одного источника. Транзистор T_1 работает в предвыходном каскаде (предусилителе мощности). Цепь смещения $R_1 - R_2$ обеспечивает работу этого каскада в режиме класса А. При подаче питания устанавливается нормальный статический режим транзистора T_1 (транзистор открыт). Разделительный конденсатор C_3 разряжен. Следовательно, потенциал точки А, где соединяются эмиттеры транзисторов T_2 и T_3 , равен нулю. Однако базы этих транзисторов находятся под положительным потенциалом, определяемым напряжением на коллекторе транзистора T_1 . Это положительное напряжение открывает транзистор T_2 . Транзистор T_3 (*npn*-типа) при этом закрыт. Таким образом, ток i_2 , протекающий через открытый транзистор, будет заряжать конденсатор C_3 , как показано на схеме. По мере заряда этого конденсатора возрастает напряжение в точке А. Процесс зарядки продолжается до тех пор, пока не закроется транзистор T_2 . Это происходит в тот момент, когда напряжение на эмиттере этого транзистора (в точке А) сравнивается с напряжением на его базе.

Если статический режим транзистора T_1 выбран таким образом, что его коллекторное напряжение равно $0,5V_{CC}$, то транзистор T_2 закроется, как только потенциал точки А возрастет до $0,5V_{CC}$. В результате схема будет сбалансирована по постоянному току и каждому транзистору будет приложено напряжение, равное половине напряжения источника питания. Транзисторы T_2 и T_3 оказываются в отсечке (режим класса В) с нулевым напряжением смещения на их эмиттерных переходах, т. е. они находятся на грани включения при отсутствии входного сигнала.

При подаче входного сигнала транзистор T_1 находится в проводящем состоянии в течение всего периода, усиливая этот сигнал и обеспечивая «раскачку» выходных транзисторов T_2 и T_3 . Комплементарная пара вы-

ходных транзисторов обеспечивает дальнейшее усиление сигнала, как это было описано выше при рассмотрении базовой схемы.

Схема на рис. 30.14 имеет низкую стабильность по постоянному току. Любое изменение тока транзистора T_1 вызывает изменение статического режима выходной пары транзисторов, что может привести к искажениям выходного сигнала. Для улучшения стабильности используется отрицательная обратная связь по постоянному току, обеспечивающая автоматическую подстройку смещения транзистора T_1 , как показано на рис. 30.15. Постоянное напряжение, действующее в точке А ($0,5V_{CC}$), подается обратно на базу транзистора T_1 через резистор обратной связи R_F . В этой схеме громкоговоритель подключен к положительной шине источника питания через разделительный конденсатор C_3 . Заметим, что в такой конфигурации ток транзистора T_3 заряжает этот конденсатор, а ток транзистора T_2 разряжает его. Вообще, транзистор, включенный «последовательно» с разделительным конденсатором, заряжает его, а включенный «параллельно» — разряжает. Через резистор R_4 на базы выходных транзисторов подается небольшое напряжение прямого смещения, обеспечивающее уменьшение искажений типа «ступенька». Резисторы R_6 и R_7 в эмиттерных цепях транзисторов T_2 и T_3 обеспечивают стабильность по постоянному току, а также неглубокую обратную связь по переменному току, улучшающую частотные характеристики усилителя.

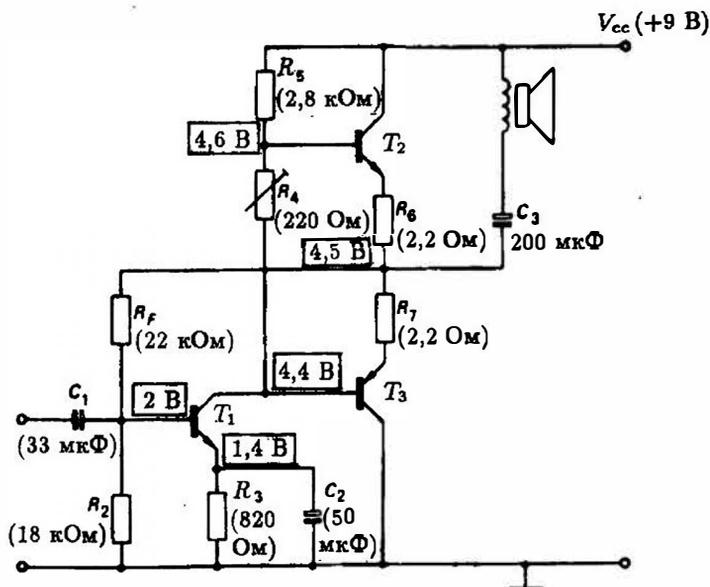


Рис. 30.15. Типичный двухтактный усилитель мощности на комплементарных транзисторах. Смещение на базу транзистора T_1 подается через резистор отрицательной обратной связи R_F .

Усилители постоянного тока

При усилении сигналов постоянного тока между каскадами действует непосредственная связь, как показано на рис. 30.16. Напряжение на базу транзистора T_2 напрямую подается с коллектора транзистора T_1 . Поэтому статический режим (в отсутствие сигнала) транзистора T_2 определяется статическим режимом предыдущего каскада. Отсутствие разделительного конденсатора позволяет усиливать самые низкочастотные сигналы.

Усилители постоянного тока подвержены так называемому дрейфу, представляющему собой сдвиг рабочей точки усилителя при изменении температуры. Для устранения дрейфа в схему включаются термисторы (термосопротивления) или другие температурно-чувствительные элементы, как показано на рис. 30.16.

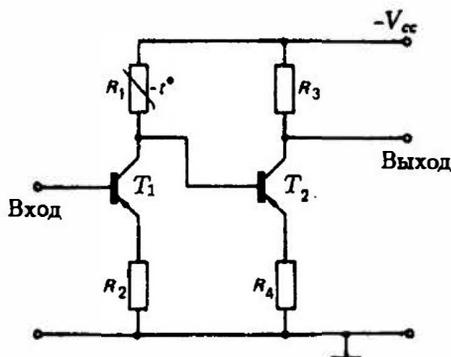


Рис. 30.16. Усилитель с непосредственной связью.

Обратная связь в усилителях

На рис. 30.17 показана система с обратной связью, в которой часть выходного напряжения подается обратно на вход усилителя. Напряжение v_f есть напряжение обратной связи, которое добавляется к входному напряжению v_i для получения эффективного входного напряжения e_i , действующего непосредственно на входе усилителя. Цепь обратной связи передает весь или часть β выходного сигнала обратно на вход усилителя. Если выходное напряжение равно v_o , то напряжение обратной связи равно

$$v_f = \beta v_o.$$

Эффективный сигнал на входе усилителя $v_i = e_i + v_f = e_i + \beta v_o$. При введении обратной связи коэффициент усиления становится равным

$$G_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{v_o}{e_i + \beta v_o}.$$

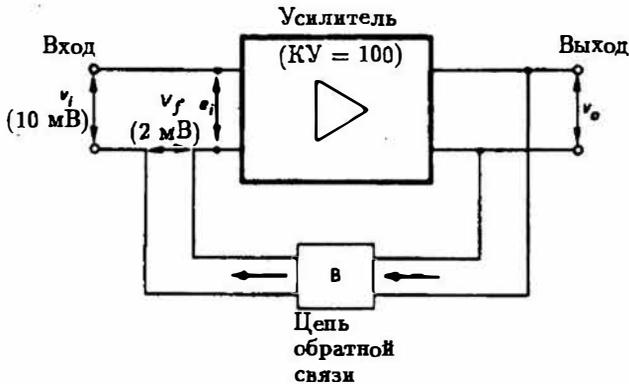


Рис. 30.17. Обратная связь в усилителях.

При введении отрицательной обратной связи, когда напряжение обратной связи находится в противофазе с входным напряжением, эффективное входное напряжение $e_i = v_i - v_f$, что приводит к уменьшению коэффициента усиления всей системы. При положительной обратной связи ситуация изменяется на обратную: напряжение обратной связи находится в фазе с входным напряжением, и эффективное входное напряжение $e_i = v_i + v_f$, т. е. превышает входное напряжение на величину напряжения обратной связи, в результате увеличивается коэффициент усиления всей системы.

Используя величины, указанные на рис. 30.17, и предполагая, что действует отрицательная обратная связь, можно рассчитать некоторые параметры системы с обратной связью.

Эффективное входное напряжение $e_i = 10 - 2 = 8$ мВ.

Выходное напряжение $v_o = 8 \cdot 100 = 800$ мВ.

Таким образом, коэффициент усиления системы с обратной связью

$$G_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{800}{10} = 80.$$

Коэффициент обратной связи

$$\beta = \frac{v_f}{v_o} = \frac{2}{800} = \frac{1}{400} = 0,0025, \text{ или } 0,25\%.$$

Различают *обратную связь по току* и *обратную связь по напряжению*. При обратной связи по току напряжение обратной связи пропорционально выходному току. Например, в схеме на рис. 30.18 такая связь осуществляется через резистор R_4 . Когда напряжение обратной связи пропорционально выходному напряжению, мы имеем дело с обратной связью по напряжению. В схеме на рис. 30.18 обратная связь по напряжению осуществляется через цепь $C_2 - R_3$.

Таблица 30.1. Сравнение характеристик систем с отрицательной и положительной обратной связью

Положительная обратная связь	Отрицательная обратная связь
<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий коэффициент усиления 2. Узкая полоса пропускания 3. АЧХ с выбросами 4. Низкое входное сопротивление¹⁾ 5. Высокое выходное сопротивление¹⁾ 6. Вносит нестабильность как по переменному току (возникновение колебательных процессов), так и по постоянному току (неустойчивость стационарного режима) 7. Применяется в генераторах 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкий коэффициент усиления 2. Широкая полоса пропускания 3. Плоская АЧХ 4. Высокое входное сопротивление 5. Низкое выходное сопротивление 6. Улучшается устойчивость системы как по переменному, так и по постоянному току 7. Часто применяется для улучшения устойчивости и расширения полосы пропускания усилителя

Эти условия не всегда выполняются и зависят от схемы цепи обратной связи. —
Прим. ред.

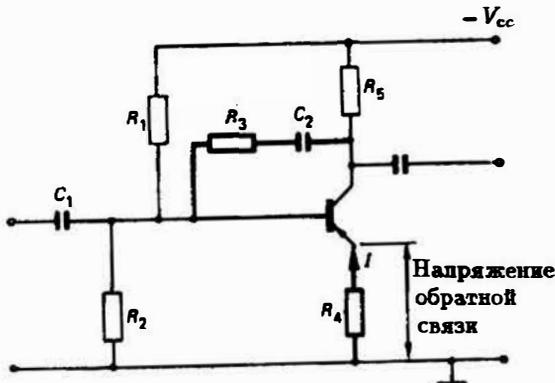


Рис. 30.18. Усилитель на транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, с двумя видами обратной связи: по току (через резистор R_4) и по напряжению (через цепь $C_2 - R_3$).

Усилители радиочастоты (УРЧ)

На радиочастотах, например в УКВ-диапазоне, влияние межэлектродных емкостей транзистора, особенно между коллектором и базой, становится очень заметным. Для устранения влияния этих емкостей используется усилитель по схеме с общей базой. Однако в схеме с ОБ транзистор имеет низкое входное сопротивление, которое чрезмерно нагружает

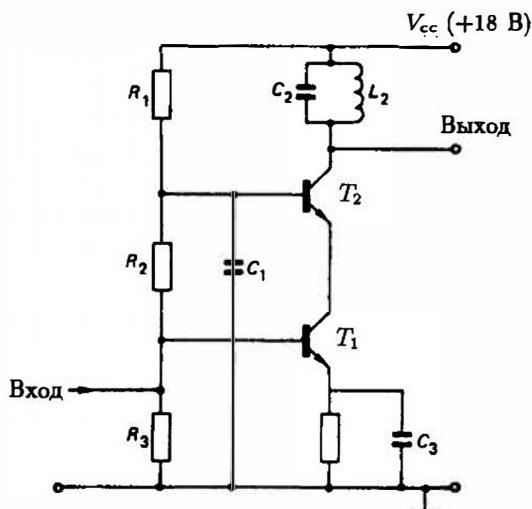


Рис. 30.19. Каскодный усилитель.

предыдущий каскод, работающий на усилитель. Для решения проблемы существуют два метода. В первом методе используется усилитель с ОЭ и схемой нейтрализации обратной связи. Такая схема компенсирует, или нейтрализует, отрицательную обратную связь через емкость перехода коллектор–база за счет введения еще одной петли обратной связи, но противоположного знака.

Во втором методе используется усилитель с общим эмиттером, каскодно включенный с усилителем с общей базой (рис. 30.19). Транзистор T_1 работает в усилителе с ОЭ, а транзистор T_2 — в усилителе с ОБ. Входной сигнал подается на базу транзистора T_1 . Его эмиттер развязан с шасси через конденсатор C_3 . Выходной сигнал с коллектора транзистора T_1 подается на эмиттер транзистора T_2 , база которого развязана с шасси через конденсатор C_1 . Смещение обоих транзисторов обеспечивает резисторная цепочка $R_1 - R_2 - R_3$.

Hi-Fi-усилители

Английское сокращение Hi-Fi (*high fidelity* — высокая верность передачи или воспроизведения, читается «хи-фи») используется для обозначения высокого качества. Этот термин применяется в звуковоспроизводящей аппаратуре, которая обеспечивает реалистичное воспроизведение исходного звука, — другими словами, высокое качество воспроизведения. Hi-Fi-системы должны иметь широкую полосу пропускания (40 Гц — 16 кГц), низкий уровень шумов и воспроизводить звук с минимальными искажениями.

Регулировка тембра

Регулировка тембра нужна для расширения или сужения (т. е. изменения формы) АЧХ усилителя. Регулировка тембра осуществляется в области нижних (низкочастотный участок АЧХ) и верхних (высокочастотный участок АЧХ) звуковых частот. Для этой цели используются самые различные схемы; начиная от простейшей цепи, состоящей из последовательно включенных конденсатора и резистора, до очень сложных систем с использованием обратной связи. На рис. 30.20 приведена схема регулятора тембра с возможностью независимой регулировки тембра в области нижних и верхних звуковых частот. На элементах R_1 и C_1 выполнен делитель напряжения поступающего сигнала ЗЧ. Поскольку реактивное сопротивление конденсатора C_1 мало на высоких частотах, этот делитель обеспечивает ослабление верхних звуковых частот, причем степень ослабления зависит от установки движка потенциометра R_1 . Элементы R_2 и C_2 образуют еще один делитель. Конденсатор C_2 имеет высокое реактивное сопротивление в области нижних звуковых частот, поэтому второй делитель ослабляет эти частоты в степени, зависящей от установки потенциометра R_2 .

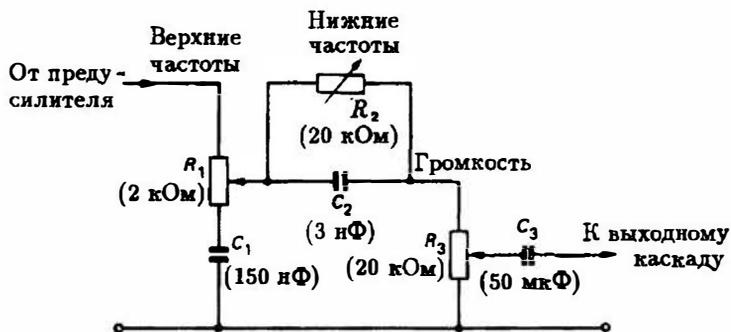


Рис. 30.20. Схема регулятора тембра.

Громкоговорители

Громкоговоритель представляет собой преобразователь электрической энергии в акустическую или звуковую энергию. Один из факторов, определяющих выбор громкоговорителя, — его АЧХ по звуковому давлению, т. е. диапазон эффективно воспроизводимых им звуковых частот. Если диапазон частот, воспроизводимых данным громкоговорителем, недостаточно широк, можно использовать два громкоговорителя, один из которых хорошо воспроизводит нижние, а другой — верхние звуковые частоты. На рис. 30.21 иллюстрируется один возможный способ разбиения частотного диапазона с помощью разделительного (двухполосного) фильтра. Разделительный фильтр состоит из фильтра нижних частот $L_1 - C_1$,

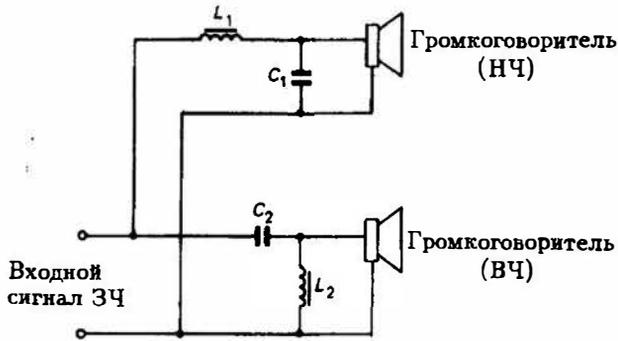


Рис. 30.21. Двухполосный разделительный фильтр для акустической системы с использованием низкочастотного и высокочастотного громкоговорителей.

к выходу которого подключается низкочастотный громкоговоритель, а фильтра верхних частот $L_2 - C_2$, связанного с высокочастотным громкоговорителем.

Другими факторами, влияющими на выбор громкоговорителя, являются его выходная мощность, КПД и сопротивление (для согласования с УЗЧ).

Операционный усилитель

До сих пор рассматривались усилители, собираемые из отдельных дискретных компонентов — транзисторов, диодов, резисторов. При использовании технологии интегральных схем все эти необходимые дискретные компоненты могут быть сформированы в одной монокристаллической ИС. Именно по такой технологии в настоящее время изготавливаются операционные усилители (ОУ). Первоначально они были разработаны для выполнения определенных математических операций (отсюда название), но затем быстро нашли применение в самых различных электронных схемах.

Идеальный операционный усилитель — это идеальный усилитель с бесконечно большим коэффициентом усиления, бесконечно широкой полосой пропускания и совершенно плоской АЧХ, бесконечным входным сопротивлением, нулевым выходным сопротивлением и полным отсутствием дрейфа нуля. На практике операционный усилитель имеет следующие свойства:

- 1) очень высокий коэффициент усиления (свыше 50 000);
- 2) очень широкую полосу пропускания и плоскую АЧХ;
- 3) очень высокое входное сопротивление;
- 4) очень низкое выходное сопротивление;
- 5) очень слабый дрейф нуля.

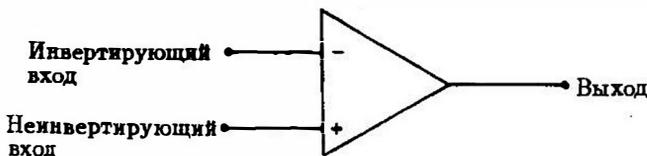


Рис. 31.1. Операционный усилитель.

На рис. 31.1 показано условное обозначение операционного усилителя. ОУ имеет два входа: инвертирующий вход ($-$), сигнал на котором находится в противофазе с выходным сигналом, и неинвертирующий вход ($+$), сигнал на котором совпадает по фазе с выходным сигналом.

Применения

Диапазон применений ОУ исключительно широк. Он может использоваться в качестве инвертирующего, неинвертирующего, суммирующего и

дифференциального усилителей, как повторитель напряжения, интегратор и компаратор. Внешние компоненты, подключаемые к ОУ, определяют его конкретное применение. Ниже рассматриваются некоторые из этих применений.

Инвертирующий усилитель

На рис. 31.2 показано применение ОУ в качестве инвертирующего усилителя. Поскольку ОУ обладает очень большим (почти бесконечным) коэффициентом усиления, то сигнал на его выходе вырабатывается при очень малом входном сигнале. Это означает, что инвертирующий вход ОУ (точку Р) можно считать виртуальной (мнимой) землей, т. е. точкой с практически нулевым потенциалом. Для получения коэффициента усиления ОУ требуемого уровня вводится очень глубокая отрицательная связь через резистор обратной связи R_{oc} . Коэффициент усиления инвертирующего усилителя (рис. 31.2) можно рассчитать по формуле

$$G_V = -\frac{R_{oc}}{R_1}$$

Отрицательный знак указывает на инвертирование входного сигнала при его усилении.

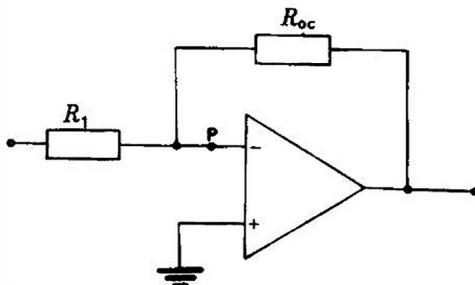


Рис. 31.2. Инвертирующий усилитель.

Пример

Полагая $R_1 = 1$ кОм и $R_{oc} = 2,2$ кОм, рассчитать коэффициент усиления и выходное напряжение инвертирующего усилителя, если на его вход подано напряжение 50 мВ.

Решение

$$\text{Коэффициент усиления } G_V = -\frac{R_{oc}}{R_1} = -\frac{2,2 \text{ кОм}}{1 \text{ кОм}} = -2,2.$$

$$\text{Выходное напряжение} = -2,2 \cdot 50 \text{ мВ} = -110 \text{ мВ}.$$

Суммирующий усилитель

Суммирующий усилитель (рис. 31.3) вырабатывает выходное напряжение, величина которого пропорциональна сумме входных напряжений V_1 и V_2 . Для входного напряжения V_1 коэффициент усиления $G_V = -R_{oc}/R_1$, а для входного напряжения V_2 $G_V = -R_{oc}/R_2$.

Например, если $R_{oc} = R_1 = R_2$, то коэффициент усиления для обоих входов равен $-5\text{ кОм}/5\text{ кОм} = -1$. Пусть $V_1 = 1\text{ В}$ и $V_2 = 2\text{ В}$, тогда вклад в выходное напряжение, связанный с V_1 , составляет $1 \cdot (-1) = -1\text{ В}$, а вклад, связанный с V_2 , составляет $2 \cdot (-1) = -2\text{ В}$. Следовательно, полное выходное напряжение равно $V_{\text{вых}} = -1 - 2 = -3\text{ В}$.

Пример 1

На входы суммирующего ОУ, показанного на рис. 31.4, подаются напряжения $V_1 = 20\text{ мВ}$ и $V_2 = -10\text{ мВ}$. Рассчитайте выходное напряжение $V_{\text{вых}}$.

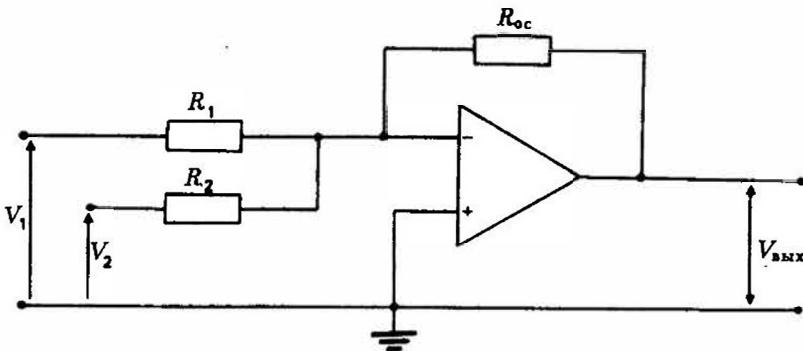


Рис. 31.3. Суммирующий усилитель.

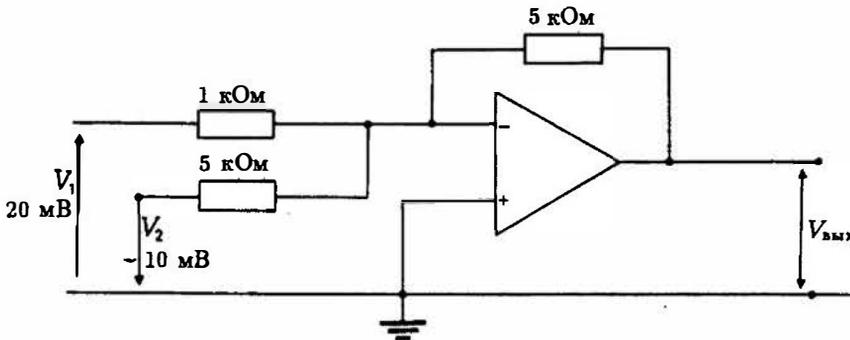


Рис. 31.4.

Решение

Выходное напряжение для $V_1 = -\frac{5}{1} \cdot 20 = -100$ мВ.

Выходное напряжение для $V_2 = -\frac{5}{5} \cdot (-10) = +10$ мВ.

Следовательно, полное выходное напряжение $V_{\text{вых}} = -100 + 10 = -90$ мВ.

Повторитель напряжения

В этом случае операционный усилитель охвачен 100%-ной отрицательной обратной связью (рис. 31.5) и имеет результирующий коэффициент усиления, равный 1. Заметим, что выходной и входной сигналы повторителя напряжения совпадают по фазе.

Напряжение смещения

При нулевом входном сигнале выходной сигнал идеального ОУ равен нулю. На практике это не так: отличный от нуля сигнал (ток или напряжение) присутствует на выходе ОУ даже при нулевом входном сигнале. Чтобы добиться нулевого выходного сигнала при нулевом входном, на вход ОУ подается входной ток смещения или напряжение смещения такой величины и полярности, чтобы выходной сигнал, соответствующий входному сигналу смещения, компенсировал исходный мешающий выходной сигнал.

Входной ток смещения обычно устанавливается с помощью дополнительного резистора R_2 , подключаемого к неинвертирующему входу ОУ.

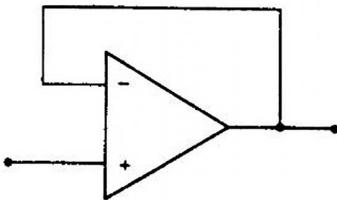


Рис. 31.5. Повторитель напряжения.

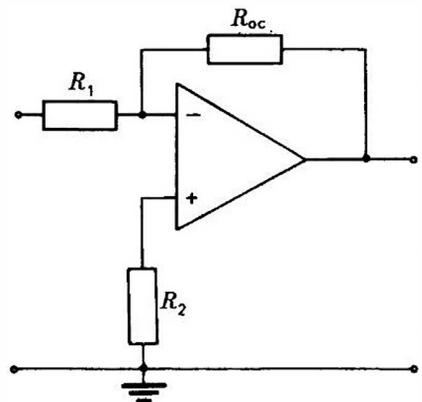


Рис. 31.6.

как показано на рис. 31.6. Оптимальное сопротивление этого резистора определяется по формуле

$$R_2 = \frac{R_{oc} R_1}{R_{oc} + R_1}.$$

Обычно, если коэффициент усиления больше четырех, номиналы резисторов R_2 и R_1 выбирают одинаковыми. Введение резистора R_2 не изменяет коэффициент усиления инвертирующего усилителя, он по-прежнему остается равным $-R_{oc}/R_1$. Как мы увидим позже, в некоторых ИС предусматриваются выводы для установки нулевого напряжения на выходе ОУ.

Неинвертирующий усилитель

В этом случае входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, как показано на рис. 31.7.

$$\text{Коэффициент усиления} = \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1} = 1 + \frac{R_{oc}}{R_1}.$$

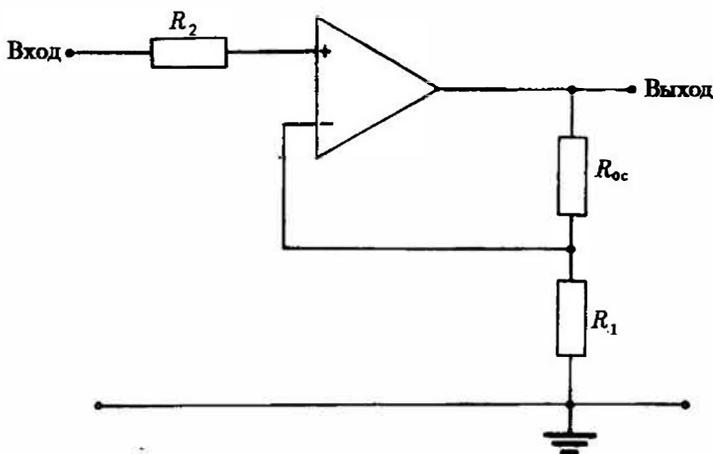


Рис. 31.7. Неинвертирующий усилитель.

Интегрирующий усилитель

На рис. 31.8 показано использование ОУ в качестве интегратора. В этом случае функцию элемента обратной связи выполняет конденсатор C_1 . При подаче перепада напряжения (ступеньки) на вход интегратора выходной сигнал начинает нарастать от нулевого значения с постоянной скоростью и имеет полярность, противоположную полярности входного

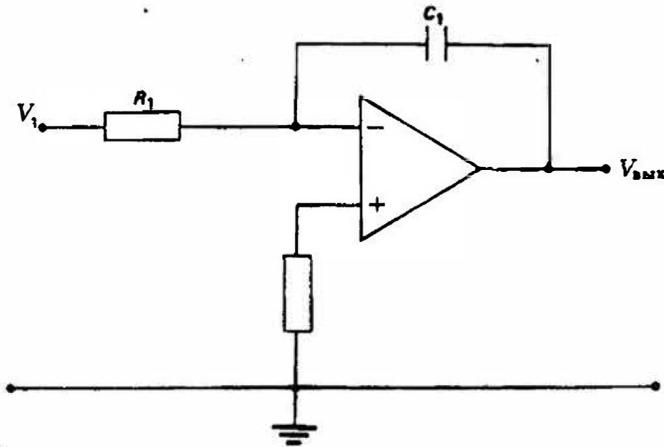


Рис. 31.8. Интегратор.

сигнала (рис. 31.9). Скорость изменения выходного напряжения определяется постоянной времени $C_1 R_1$ и величиной входного сигнала.

$$\text{Скорость изменения выходного напряжения} = -\frac{V_1}{C_1 R_1} \text{ [В/с]},$$

где V_1 — входное напряжение. Отрицательный знак указывает на инвертирование сигнала.

Пример 2

Пусть $C_1 = 1$ мкФ, $R_1 = 1$ кОм и $V_1 = 3$ В. Рассчитайте скорость изменения выходного напряжения.

Решение

Прежде чем рассчитывать скорость изменения выходного напряжения, полезно найти постоянную времени для данной схемы.

$$\text{Постоянная времени} = C_1 R_1 = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^3 = 10^{-3} \text{ с} = 1 \text{ мс.}$$

Скорость изменения выходного напряжения $= -V_1/C_1 R_1 = -3 \text{ В/1 мс} = -3 \text{ В/мс}$. Это означает, что выходное напряжение будет изменяться на -3 В за каждую миллисекунду. Предположим, что конденсатор C_1 полностью разряжен перед подачей входного сигнала. Тогда через $0,5 \text{ мс}$ выходное напряжение будет равно $-1,5 \text{ В}$, через 1 мс — -3 В , через $1,5 \text{ мс}$ — $-4,5 \text{ В}$ и т. д. Следует отметить, что постоянная времени интегрирующего усилителя $C_1 R_1$ численно равна длительности временного интервала, в течение которого выходное напряжение интегратора, «стартовое» с нулевого уровня, нарастает до величины входного напряжения.

Для того чтобы построить график временной зависимости выходного напряжения, нужны две точки. Удобнее всего использовать точки, указанные на

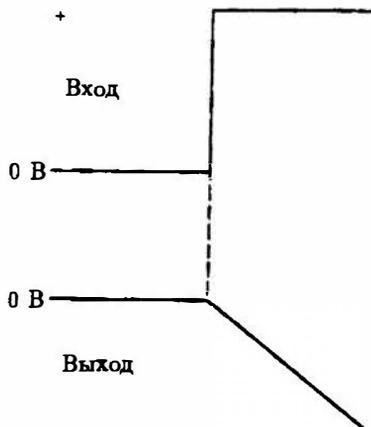


Рис. 31.9. Повторитель напряжения.

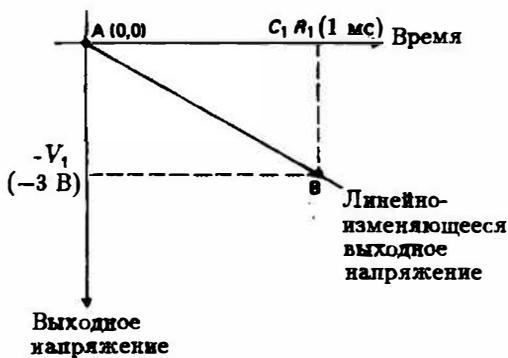


Рис. 31.10.

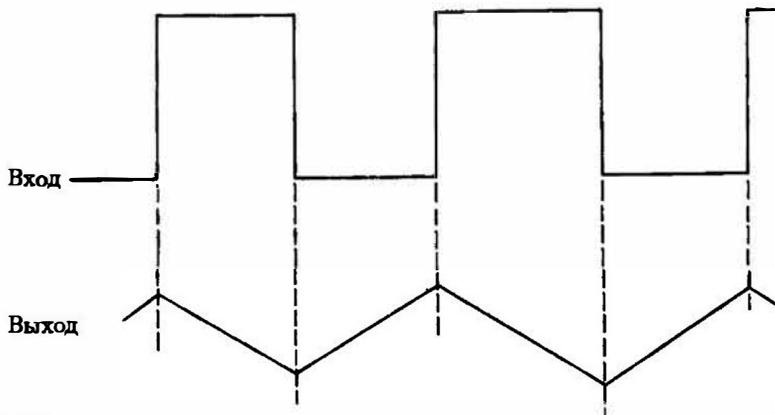


Рис. 31.11.

рис. 31.10: точку А для момента времени $t = 0$, когда выходное напряжение $V_{\text{вых}} = 0$, и точку В для момента времени $t = R_1 C_1$ (постоянная времени интегратора), когда выходное напряжение $V_{\text{вых}} = -V_1$ (входное напряжение с обратным знаком). Проводя через точки А и В прямую линию, получаем график изменения выходного напряжения. В рассматриваемом примере координаты точки А определяются как (0 В, 0 мс), а точки В как (-3 В, 1 мс).

Форма выходного сигнала при подаче на вход интегратора последовательности прямоугольных импульсов показана на рис. 31.11.

Коэффициент усиления переменного сигнала

Если на вход интегрирующего усилителя подать синусоидальный сигнал, на его выходе воспроизводится также синусоидальный сигнал. В этом

случае интегратор работает как усилитель с коэффициентом усиления по переменному току, определяемым постоянной времени $R_1 C_1$ и частотой входного сигнала.

$$\text{Коэффициент усиления} = \frac{\text{Реактивное сопротивление конденсатора } X_{C_1}}{R_1},$$

где реактивное сопротивление конденсатора $X_{C_1} = \frac{1}{2\pi f C_1}$. Отсюда

$$\text{Коэффициент усиления} = \frac{1}{2\pi f C_1 R_1}.$$

Дифференциальный усилитель

Дифференциальный усилитель (рис. 31.12) вырабатывает выходной сигнал, пропорциональный разности входных сигналов $V_1 - V_2$. При $R_1 = R_2$ имеем

$$V_{\text{вых}} = -\frac{R_{\text{ос}}}{R_1}(V_1 - V_2).$$

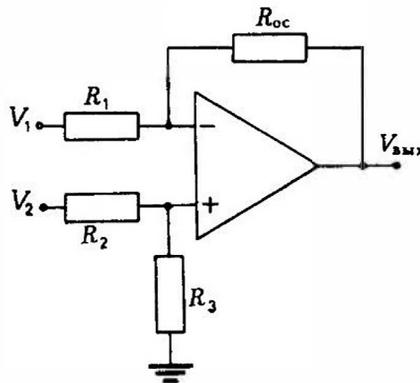


Рис. 31.12.

Назначение выводов ОУ 741

На рис. 31.13 показана схема расположения выводов ОУ 741, выпускаемого в 8-штырьковом DIP-корпусе (плоском корпусе с двухрядным расположением выводов). Подстройка нуля на выходе ОУ (балансировка ОУ) обеспечивается подстроечным резистором, включаемым между выводами 1 и 5 (как показано на рис. 31.14). Выводы 2 и 3 — инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ соответственно. Выходной сигнал снимается с вывода 6. Положительное напряжение источника питания (+15 В) подается на вывод 7, а равное по величине отрицательное напряжение (-15 В) — на вывод 4. Вывод 8 не используется.

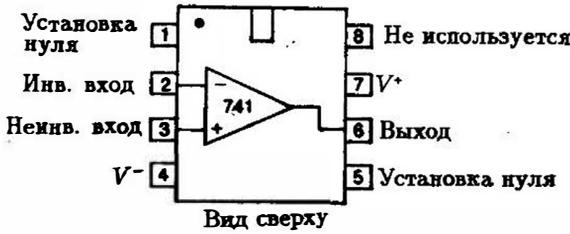


Рис. 31.13. Назначение выводов ОУ 741.

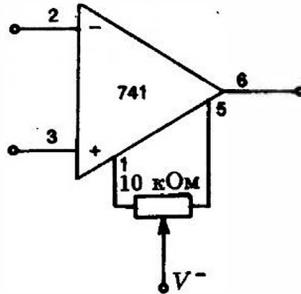


Рис. 31.14.

Частотная коррекция

Идеальный ОУ имеет бесконечную полосу пропускания. Однако на практике коэффициент усиления падает при увеличении частоты. Для компенсации этого падения и, следовательно, для расширения полосы пропускания в некоторых ИС операционных усилителей предусмотрены выводы для частотной коррекции. В ОУ 748 для этой цели предназначены выводы 1 и 8 (рис. 31.15). Частотная коррекция осуществляется путем включения конденсатора C_1 между этими выводами, как показано на рис. 31.15(б).

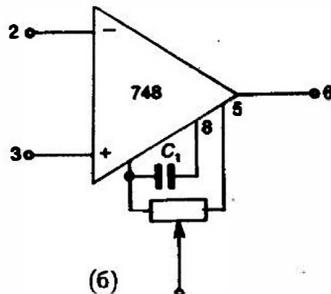
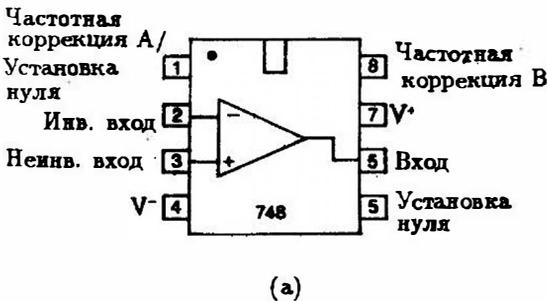


Рис. 31.15. ОУ 748: (а) назначение выводов; (б) частотная коррекция и балансировка.

Мультивибраторы и таймеры

Мультивибраторы состоят из двух транзисторов, соединенных таким образом, что один из них полностью открыт и насыщен, а другой закрыт. Следовательно, мультивибратор имеет два определенных устойчивых состояния: T_1 открыт/ T_2 закрыт или, наоборот, T_1 закрыт/ T_2 открыт. На рис. 32.1 показана основная принципиальная схема мультивибратора, где Z_1 и Z_2 обозначают два элемента связи, обеспечивающие положительную обратную связь.

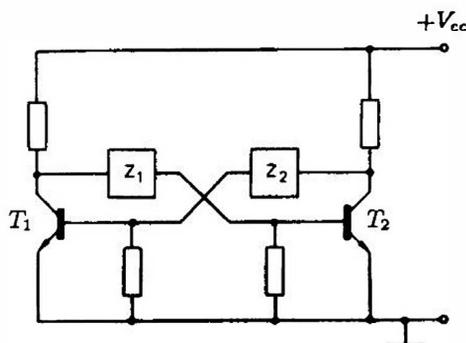


Рис. 32.1. Основная принципиальная схема мультивибратора.

В зависимости от используемых элементов обратной связи все мультивибраторы можно подразделить на три типа.

1. **Бистабильный мультивибратор**, который может оставаться сколько угодно долго в одном из двух устойчивых состояний. Чтобы переключить его из одного состояния в другое, необходимо подать внешний запускающий импульс. Мультивибратор остается в этом другом состоянии до тех пор, пока на него не воздействует второй внешний импульс, и так далее.
2. **Моностабильный мультивибратор (одновибратор или ждущий мультивибратор)**, который имеет лишь одно устойчивое состояние равновесия. Под воздействием внешнего импульса он переключается в другое состояние и остается в этом состоянии квазиравновесия в те-

чение отрезка времени, определяемого постоянной времени элементов обратной связи, после чего самостоятельно возвращается в исходное состояние.

- 3. Автоколебательный мультивибратор (или астабильный генератор),** который является генератором свободных колебаний. Он не имеет определенного устойчивого состояния и непрерывно переходит из одного состояния квазиравновесия в другое и обратно и т. д.

Бистабильный мультивибратор

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 32.2. При включении источника питания из-за разброса допусков параметров компонентов один из транзисторов будет пропускать больший ток, чем другой. Причем, какой бы малой ни была разница токов, проходящих через транзисторы, ее достаточно, чтобы привести триггер в одно из устойчивых состояний.

Предположим, что через транзистор T_2 начинает протекать больший ток, чем через T_1 . В этом случае напряжение на коллекторе транзистора T_2 будет падать, вызывая падение напряжения на базе транзистора T_1 . В результате ток через транзистор T_1 уменьшится, а напряжение на его коллекторе увеличится. При этом повышается потенциал базы транзистора T_2 относительно его эмиттера, и ток через T_2 увеличится еще больше. Так будет продолжаться до тех пор, пока не наступит насыщение транзистора T_2 , а транзистор T_1 не перейдет в режим запираия (отсечки). В этом состоянии напряжение на коллекторе запертого транзистора T_1 будет равно $+V_{CC}$ (10 В), а на коллекторе насыщенного транзистора T_2 — примерно 0 В.

Напряжение на базе транзистора T_1 определяется цепочкой резисторов $R_3 - R_5$. Как видно из рис. 32.2(б), база транзистора T_1 имеет отрицательный потенциал, создаваемый источником отрицательного напряжения $-V_{BB}$, что удерживает транзистор T_1 в закрытом состоянии. Напряжение на базе транзистора T_2 (рис. 32.2(в)) определяется цепочкой резисторов $R_2 - R_6$ и имеет положительное значение, что создает прямое смещение транзистора T_2 . Если на бистабильный мультивибратор не будет воздействовать внешний импульс, то он сохранит это устойчивое состояние неопределенно долго. В равной мере устойчивое состояние мультивибратора может быть сохранено и при другом режиме его работы, если при включении питания больший ток начнет протекать через транзистор T_1 , а не через транзистор T_2 .

Чтобы избежать применения отдельного источника питания отрицательного напряжения, на схеме, представленной на рис. 32.3, использован резистор R_6 в качестве общего резистора в цепи эмиттера. В любом из устойчивых состояний мультивибратора напряжение V_e возникает при протекании тока открытого транзистора через сопротивление R_6 . Обратное смещение закрытого транзистора обеспечивается тем, что его база

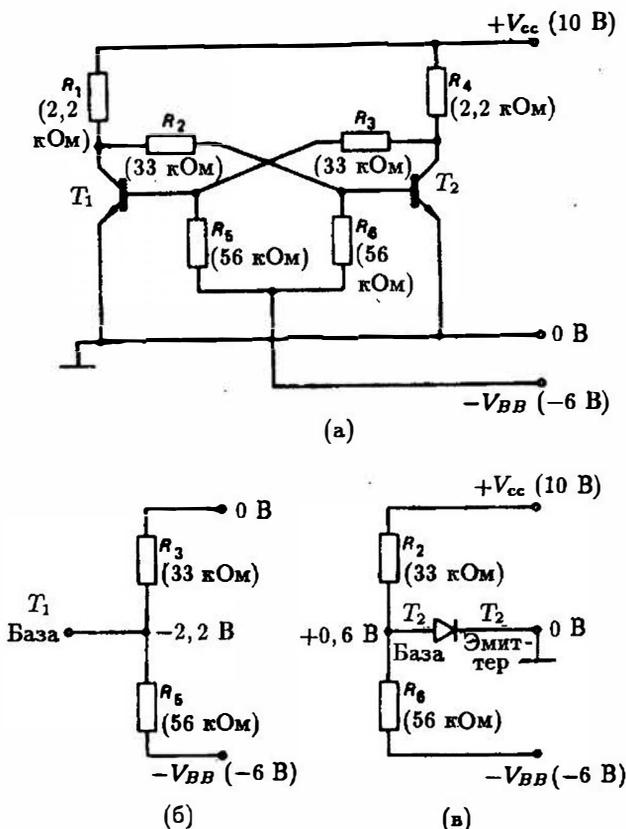


Рис. 32.2. Бистабильный мультивибратор (а). Схема с использованием отдельных источников питания постоянного тока $+V_{CC}$ и $-V_{BB}$.

имеет меньший потенциал, чем эмиттер. Конденсаторы C_2 и C_3 называются форсирующими или ускоряющими конденсаторами. Их назначение — обеспечивать быстрое переключение мультивибратора из одного состояния в другое.

Бистабильный мультивибратор с управляющими диодами

Чтобы изменить состояние бистабильного мультивибратора, на него подается внешний импульс, который переводит транзистор из закрытого состояния в открытое. Как показано на рис. 32.3, чтобы избежать применения двух отдельных входов, используются управляющие диоды D_1 и D_2 . Назначение этих диодов состоит в том, чтобы направлять запускающий импульс к базе соответствующего транзистора. Предположим, что бистабильный мультивибратор находится в состоянии T_1 закрыт/ T_2

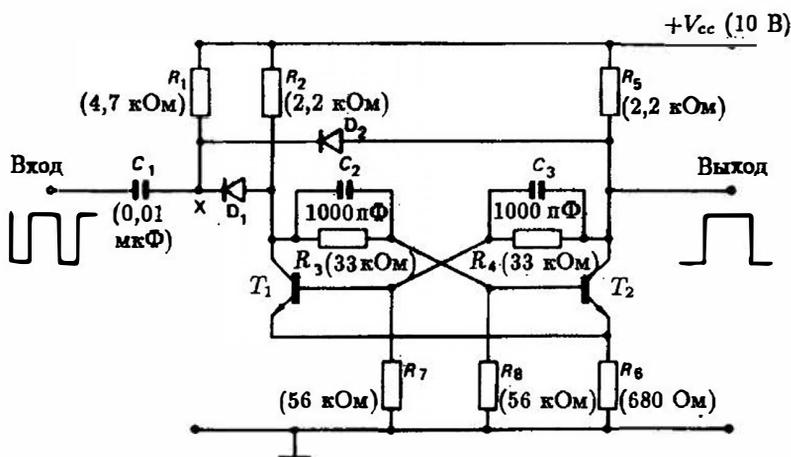


Рис. 32.3. Схема бистабильного мультивибратора с управляющими диодами D_1 и D_2 .

открыт и насыщен. Тогда точка X — общий катод диодов D_1 и D_2 — имеет потенциал V_{CC} (10 В), т. е. на диоде D_1 напряжение смещения равно нулю. В это же время анод диода D_2 находится под потенциалом эмиттера T_2 , приблизительно равного 1 В (транзистор T_2 находится в состоянии насыщения), т. е. на диоде D_2 напряжение обратного смещения равно -9 В.

Если теперь подать на вход в точку X отрицательный импульс, диод D_1 откроется и пропустит его через резистор R_3 на базу транзистора T_2 . В результате T_2 закроется, а T_1 откроется и мультивибратор перейдет в другое состояние. Напряжение смещения на управляющих диодах теперь противоположно предыдущему, т. е. D_1 находится под потенциалом -9 В. Следующий импульс откроет диод D_2 , пройдет через резистор R_4 на базу транзистора T_1 и запрет его. Мультивибратор опрокинется в первоначальное состояние. Так как бистабильный мультивибратор переходит из одного состояния в другое, то на коллекторе любого из транзисторов можно получить прямоугольные импульсы.

На рис. 32.4 показаны импульсы, действующие на входе и выходе мультивибратора, описанного выше. Прямоугольный входной импульс вначале дифференцируется цепью $C_1 - R_1$. Мультивибратор реагирует только на отрицательные «пички». Положительные «пички» не оказывают никакого влияния на схему, поскольку при их поступлении оба диода имеют обратное смещение. Выходной сигнал представляет собой последовательность прямоугольных импульсов, следующих с частотой, равной половине частоты входного сигнала. Поэтому бистабильный мультивибратор называется также делителем частоты на два и широко применяется в счетчиках и калькуляторах.

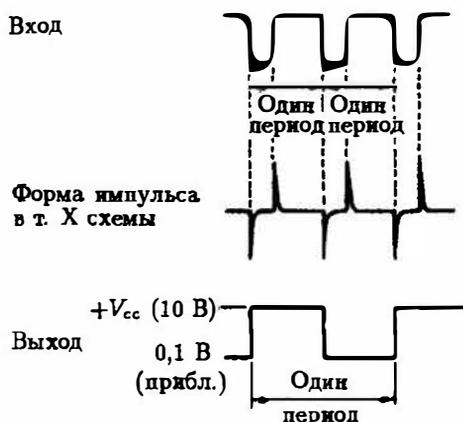


Рис. 32.4. Импульсы на входе и выходе мультивибратора.

Моностабильный мультивибратор (одновибратор)

Цепь обратной связи моностабильного мультивибратора (рис. 32.5) содержит одну цепочку $C - R$, а именно $C_2 - R_2$. При первоначальном включении схемы транзистор T_2 открывается, так как на его базу через резистор R_2 подается положительное напряжение $+V_{CC}$, а транзистор T_1 закрывается. Источник отрицательного напряжения $-V_{BB}$ гарантирует, что T_1 останется запертым. В этом состоянии схема может находиться сколь угодно долго при отсутствии внешнего воздействия.

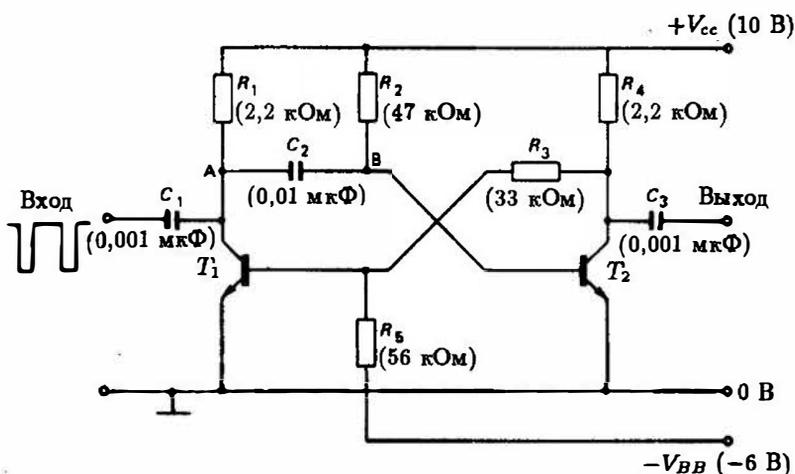


Рис. 32.5. Принципиальная схема моностабильного мультивибратора.

Если теперь на вход схемы подать отрицательный импульс, его высокочастотный фронт пройдет через конденсатор C_2 к базе транзистора T_2 и запрет его. Так же, как это происходит в бистабильном мультивибраторе, транзистор T_1 перейдет в состояние насыщения, а транзистор T_2 — в состояние отсечки. Напряжение на коллекторе транзистора T_1 (точка А на рис. 32.5) при этом резко падает от $+10\text{ В}$ (V_{CC}) до нулевого значения. Этот перепад напряжения 10 В заряжает конденсатор C_2 до -10 В . Другими словами, база транзистора T_2 (точка В на схеме рис. 32.5) находится теперь под напряжением -10 В , удерживая транзистор в запертом состоянии. Конденсатор C_2 начинает разряжаться через резистор R_2 от -10 В , пытаясь достигнуть напряжения $+10\text{ В}$. Отрицательный потенциал в точке В начинает плавно уменьшаться со скоростью, определяемой постоянной времени C_2R_2 . Как только напряжение в точке В изменит свой знак с отрицательного на положительный (рис. 32.6(б)), транзистор T_2 начнет проводить ток, а транзистор T_1 перейдет в состояние отсечки. Моностабильный мультивибратор возвращается обратно к начальному состоянию, ожидая прихода следующего переключающего импульса.

Форма импульса на выходе схемы показана на рис. 32.6(в). Длительность импульса определяется периодом, в течение которого транзистор T_2 остается в запертом состоянии, что в свою очередь зависит от постоянной времени C_2R_2 . Например, схема, приведенная на рис. 32.5, вырабатывает

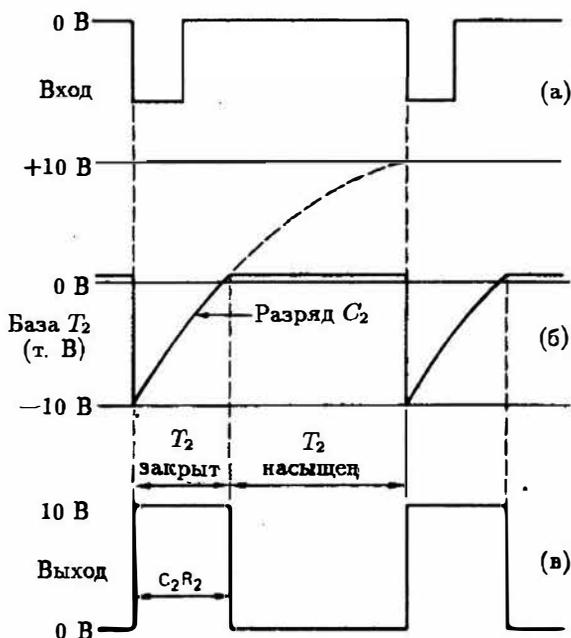


Рис. 32.6. Форма импульсов, действующих в различных точках схемы одновибратора.

импульс длительностью приблизительно 350 мкс. Она может быть изменена варьированием номиналов емкости конденсатора C_2 или резистора R_2 или обоих вместе. Следует заметить, что частота сигнала на выходе равна частоте входного сигнала, но их длительности различны. Одновибратор применяется для увеличения ширины импульса и получения временной задержки.

Автоколебательный мультивибратор

На рис. 32.7 показана схема автоколебательного (или несинхронизированного) мультивибратора. Контур обратной связи характеризуется двумя постоянными времени $C_1 R_1$ и $C_2 R_2$. Когда включается источник питания, через один из транзисторов проходит больший ток, чем через другой. Благодаря наличию цепи обратной связи это приводит к тому, что один из транзисторов приходит в состояние насыщения, а другой — в состояние отсечки. Предположим, что транзистор T_1 открыт и насыщен, а T_2 закрыт. Затем конденсатор C_1 заряжается до $-V_{CC}$ и удерживает T_2 в запертом состоянии. Конденсатор C_1 начинает разряжаться через резистор R_1 , пытаясь перезарядиться до $+V_{CC}$, как и в случае одновибратора. В момент, когда потенциал цепочки $R_1 - C_1$ (база транзистора T_2) проходит через нуль, транзистор T_2 открывается, закрывая транзистор T_1 . Конденсатор C_1 теперь скачком перезарядается в отрицательном направлении, сохраняя транзистор T_1 закрытым. Как только конденсатор C_2 разрядится через R_2 , откроется транзистор T_1 и т. д. Выходной сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов снимается с коллектора любого из транзисторов. Отношение метка/пауза (коэффициент заполнения) определяется временными постоянными схемы. Выходной сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов снимается с коллектора любого из транзисторов.

На рис. 32.8 изображены выходные импульсы на коллекторе каждого из транзисторов. Чтобы получить равные по длительности импульсы, временные постоянные $R_1 C_1$ и $R_2 C_2$ делают равными. Заметим, что, как

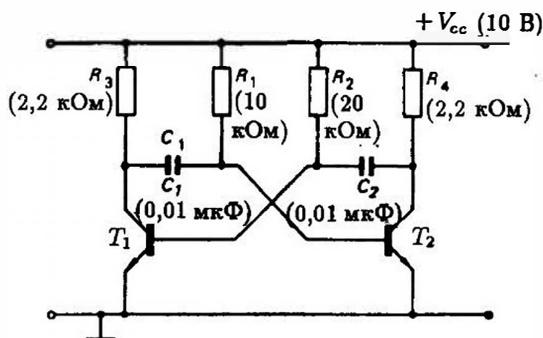


Рис. 32.7. Принципиальная схема автоколебательного мультивибратора.

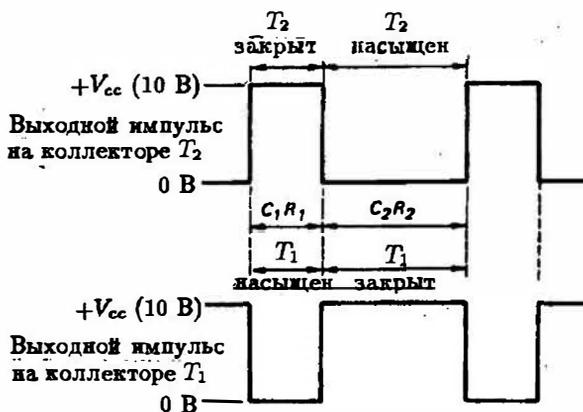


Рис. 32.8. Выходные импульсы на коллекторе каждого из транзисторов автоколебательного мультивибратора, схема которого приведена на рис. 32.7.

а в случае одновибратора, временная постоянная CR определяет время, в течение которого транзистор остается закрытым.

Таймер 555

Таймер 555 (рис. 32.9) представляет собой весьма универсальную недорогую интегральную микросхему, которая специально спроектирована для формирования стабильных временных интервалов, но также может быть использована в разнообразных моностабильных, автоколебательных мультивибраторах и триггерах.

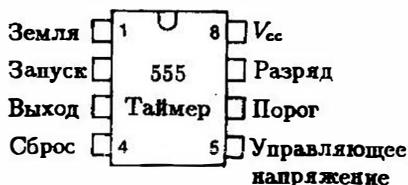


Рис. 32.9.

В режиме таймера схема вырабатывает очень точные временные интервалы, которые могут варьироваться от нескольких микросекунд до нескольких сотен секунд. Временной период задается единственной цепью CR и фактически не зависит от напряжения источника питания. Таймер включается подачей запускающего импульса на вывод 2 микросхемы и выключается командой RESET (сброс), подаваемой на вывод 4.

Базовая схема таймера показана на рис. 32.10. Временной интервал здесь задается цепочкой C_1R_1 . Начало отсчета времени инициируется нажатием кнопки S_1 . При этом вывод 2 ИС получает нулевой потенциал и микросхема переключается. Конденсатор C_1 начинает заряжаться через

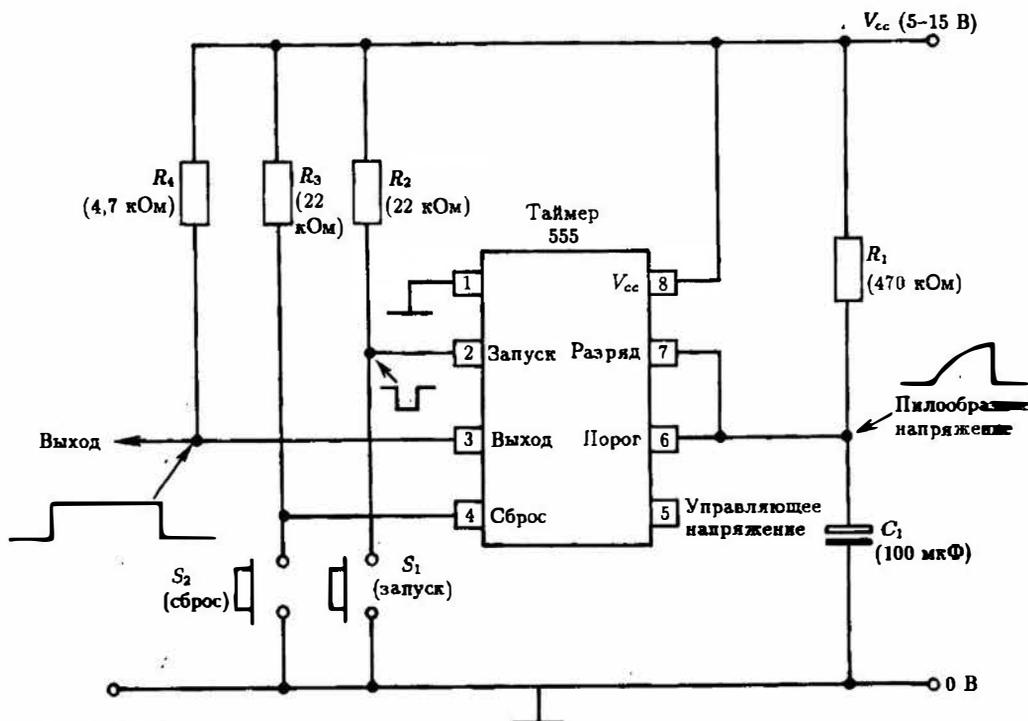


Рис. 32.10.

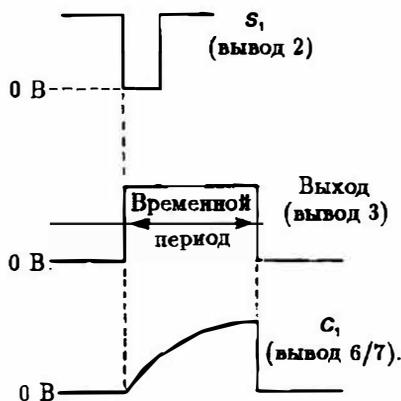


Рис. 32.11.

резистор R_1 , и на выводе 3 появляется положительное напряжение. По истечении времени, равного $1,1C_1R_1$, напряжение на выходе падает до 0 В (рис. 32.11). Отсчет времени может быть прерван нажатием кнопки RESET (сброс). При этом вывод 4 получает нулевой потенциал. При нормальной работе ключ S_2 разомкнут и вывод 4 имеет потенциал источника питания $+V_{CC}$.

33

Генераторы

Генератор — это усилитель с такой положительной обратной связью, которая обеспечивает поддержание сигнала на выходе усилителя без подачи внешнего входного сигнала. Генератор преобразует постоянный ток (получаемый от источника питания) в переменный сигнал. Для возникновения устойчивых колебаний должны выполняться два основных требования:

- обратная связь должна быть положительной;
- полный петлевой коэффициент усиления должен быть больше 1.

Существует два типа генераторов: генераторы синусоидальных сигналов, вырабатывающие гармонические сигналы, и генераторы несинусоидальных сигналов, называемые также релаксационными генераторами или мультивибраторами, обычно вырабатывающие прямоугольные сигналы.

Генераторы с резонансным контуром в цепи коллектора

В схеме генератора на рис. 33.1 элементы L_2 и C_2 образуют резонансный контур, с которого снимается выходной сигнал. Часть этого выходного

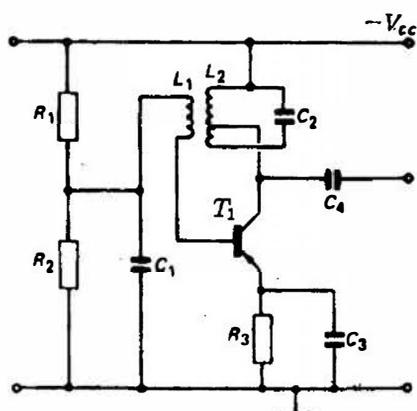


Рис. 33.1. Генератор с резонансным контуром в цепи коллектора.

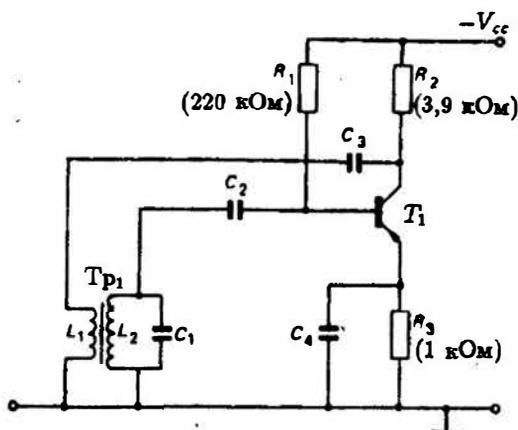


Рис. 33.2. Генератор с резонансным контуром в цепи базы.

сигнала подается обратно на вход через трансформаторную связь $L_1 - L_2$ таким образом, чтобы сигнал обратной связи совпадал по фазе с сигналом на входе. Транзистор включен по схеме с ОЭ и работает в режиме класса А, который задается цепью смещения $R_1 - R_2$. Конденсатор C_1 обеспечивает развязку для резистора R_2 цепи смещения, а конденсатор C_3 — развязку для обычного стабилизирующего резистора R_3 в цепи эмиттера.

Генераторы с резонансным контуром в цепи базы

В схеме генератора на рис. 33.2 разделительный конденсатор C_2 обеспечивает работу транзистора T_1 в режиме класса С. Элементы L_2 и C_1 образуют резонансный контур. Положительная обратная связь осуществляется через конденсатор C_3 и трансформатор Tr_1 .

Трехточечная схема генератора с индуктивной обратной связью (схема Хартли)

В этом генераторе (рис. 33.3) катушка индуктивности с отводом L_1 обеспечивает необходимую обратную связь на эмиттер транзистора. Элементы C_2 и L_1 образуют резонансный контур.

Трехточечная схема генератора с емкостной обратной связью (схема Колпитца)

В этом случае используется расщепленный конденсатор $C_1 - C_2$ (рис. 33.4)¹⁾. Элементы $C_1 - C_2$ и L_1 образуют резонансный контур, конденсатор C_3 обеспечивает работу транзистора в режиме класса С.

Генераторы с фазосдвигающей цепью обратной связи, или RC-генераторы

Синусоидальные колебания можно также получить с помощью специально подобранных RC-цепочек обратной связи, как показано на рис. 33.5. RC-секции $R_1 - C_1$, $R_2 - C_2$, $R_3 - C_3$ образуют фазосдвигающую цепь, которая на заданной частоте обеспечивает сдвиг фазы сигнала на 180° . Поскольку транзистор сдвигает фазу сигнала на 180° , то в петле обратной связи получается полный фазовый сдвиг 360° . Таким образом, обратная связь оказывается положительной. Обычно номиналы всех резисторов и всех конденсаторов в фазосдвигающей цепи выбираются одинаковыми, и каждая RC-секция вносит фазовый сдвиг 60° . Еще раз отметим, что вся

¹⁾ Здесь схема изображена только для рассмотрения переменных составляющих тока и напряжения. — Прим. ред.

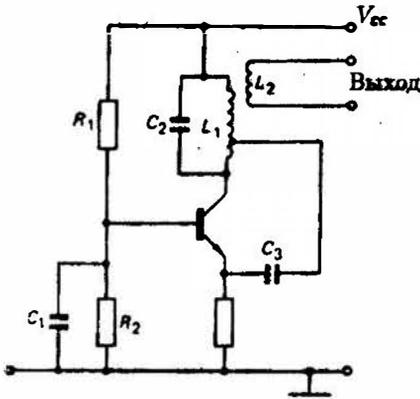


Рис. 33.3. Схема Хартли.

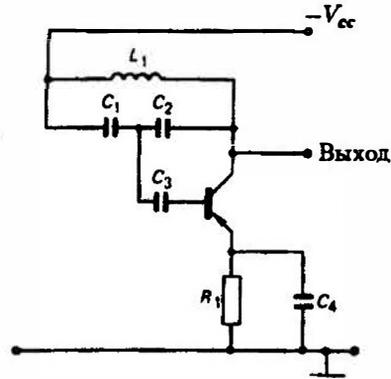


Рис. 33.4. Схема Колпитца.

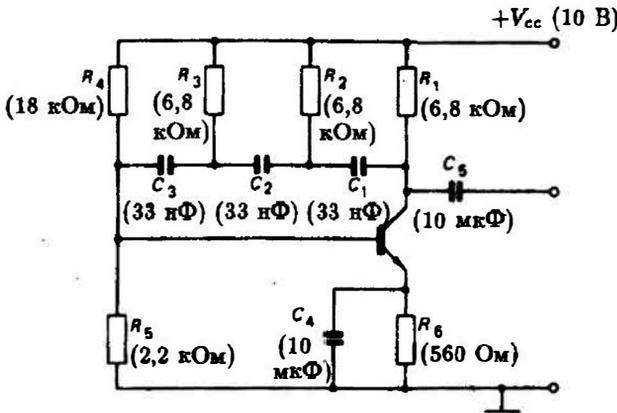


Рис. 33.5. RC-генератор с фазосдвигающей цепью обратной связи на элементах $R_1 - C_1$, $R_2 - C_2$, $R_3 - C_3$, обеспечивающей сдвиг фазы сигнала на 180° .

фазосдвигающая цепь обеспечивает фазовый сдвиг 180° только на одной частоте, определяемой номиналами используемых компонентов.

Кварцевые генераторы

Одним из самых важных требований, предъявляемых к генератору, является стабильность частоты генерируемых им колебаний. Изменения частоты могут быть вызваны, например, изменением емкости или индуктивности элементов резонансного контура или изменением параметров транзистора при колебаниях температуры. Стабильность частоты можно улучшить путем точного подбора элементов схемы, в том числе транзистора. Для обеспечения очень высокой стабильности частоты применяется кристалл кварца, точно задающий и стабилизирующий частоту

колебаний. В небольших пределах частоту генератора с кварцевой стабилизацией можно изменять с помощью конденсатора переменной емкости, подключаемого параллельно кристаллу кварца. Кварцевые генераторы используются в цветных телевизорах для генерации поднесущей частоты 4,43 МГц с точностью до нескольких герц.

УВЧ-генераторы

Генераторы очень высоких и ультравысоких частот (УВЧ) по принципу работы аналогичны другим генераторам. Однако из-за очень высокой частоты емкости и индуктивности элементов настройки C и L очень малы. Катушку индуктивности может заменить одна полоска проводника или простая петля из меди. В качестве конденсатора может служить варактор. Для построения резонансной схемы иногда используются отрезки длинных линий, имеющих распределенную емкость и индуктивность.

Генераторы несинусоидальных сигналов

Эти генераторы, называемые еще релаксационными генераторами, вырабатывают прямоугольные импульсные сигналы путем переключения одного или двух транзисторов из открытого состояния в закрытое и обратно. Несинхронизированный мультивибратор, описанный в предыдущей главе, является примером такого генератора. Другой разновидностью генератора несинусоидальных сигналов является блокинг-генератор.

Блокинг-генератор

В генераторе этого типа применяется трансформаторная обратная связь с коллектора на базу транзистора (рис. 33.6). Работа этой схемы основана на том, что в силу трансформаторной связи напряжение на базе будет наводиться только при изменении тока коллектора, то есть при его увеличении или уменьшении. В первом случае действует положительная обратная связь, во втором — отрицательная. При первом включении схемы транзистор открывается, его коллекторный ток увеличивается, создавая напряжение обратной связи на базе, в результате чего транзистор открывается еще больше. Когда достигается насыщение, увеличение коллекторного тока прекращается, что вызывает появление на базе напряжения противоположной полярности. Это напряжение закрывает транзистор. Транзистор удерживается в закрытом состоянии отрицательным зарядом на конденсаторе C до тех пор, пока этот конденсатор в достаточной степени не разрядится через резистор R . После этого транзистор снова открывается и описанный процесс повторяется.

Выходное напряжение блокинг-генератора представляет собой последовательность узких импульсов (рис. 33.7). Ширина (длительность) им-

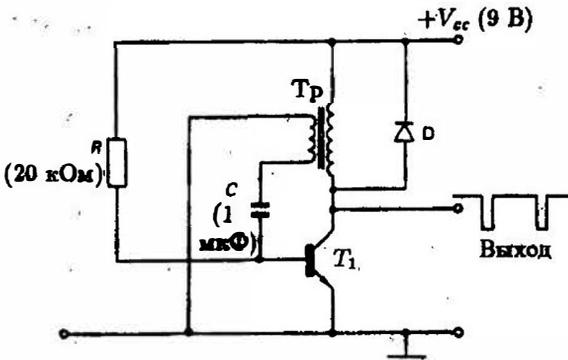


Рис. 33.6. Блокинг-генератор.

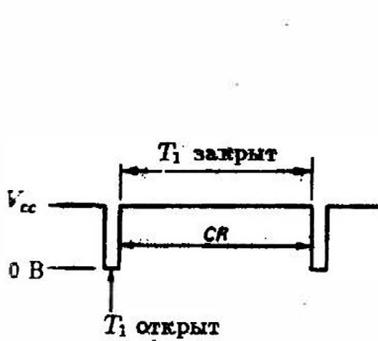


Рис. 33.7. Выходной сигнал блокинг-генератора.

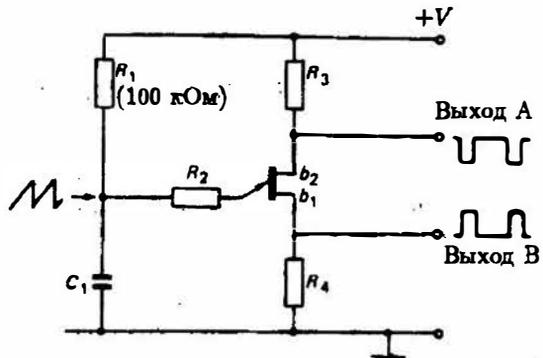


Рис. 33.8. Генератор на однопереходном транзисторе.

дурьса определяется параметрами трансформатора, а временной интервал между импульсами — постоянной времени RC . Поэтому частоту колебаний блокинг-генератора можно изменять путем изменения номинала резистора R .

Вторичная обмотка трансформатора является коллекторной нагрузкой транзистора. Быстрое изменение тока через эту обмотку при закрытии транзистора приводит к появлению большой противоЭДС и большого выброса коллекторного напряжения. Этот выброс напряжения может превысить максимально допустимое коллекторное напряжение и вызвать разрушение транзистора. Для защиты транзистора параллельно первичной обмотке трансформатора включается диод D_1 . В нормальном режиме этот диод смещен в обратном направлении и закрыт. Открывается он только в том случае, когда напряжение на коллекторе транзистора превышает напряжение источника питания V_{CC} .

Генераторы на однопереходных транзисторах

Полупроводниковые приборы, имеющие на характеристике участок с отрицательным сопротивлением, например однопереходные транзисторы, могут быть использованы в генераторах. На рис. 33.8 приведена схема генератора на однопереходном транзисторе. Транзистор смещен в ту область своей выходной характеристики, где выходной ток увеличивается при уменьшении входного напряжения, то есть в область отрицательного сопротивления. Он попеременно открывается и закрывается без какой-либо обратной связи. Выходное напряжение на базе 2 (b_2) представляет собой последовательность импульсов. Еще один выходной сигнал — последовательность импульсов противоположной полярности — можно снять с базы 1 (b_1). С эмиттера транзистора можно снять пилообразный сигнал. Частота генерируемых импульсов определяется постоянной времени $R_1 C_1$.

Генераторы пилообразного напряжения

На рис. 33.9 показана схема генератора, вырабатывающего пилообразный сигнал при подаче на его вход прямоугольных импульсов. На участке периода входной последовательности импульсов между точками А и В (рис. 33.10) на базе транзистора действует нулевое напряжение, и транзистор находится в состоянии отсечки, т. е. закрыт. Конденсатор C_1 постепенно заряжается через резистор R_1 . Прежде чем конденсатор полностью зарядится, на вход поступает положительный фронт ВС импульса, переключающий транзистор в проводящее состояние. В результате конденсатор C_1 очень быстро разряжается через открытый транзистор. Конденсатор находится в разряженном состоянии во время действия импульса (вершина CD). Отрицательный фронт DE импульса переключает

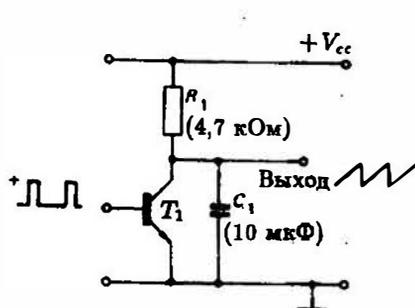


Рис. 33.9. Генератор пилообразного напряжения, управляемый последовательностью прямоугольных импульсов.

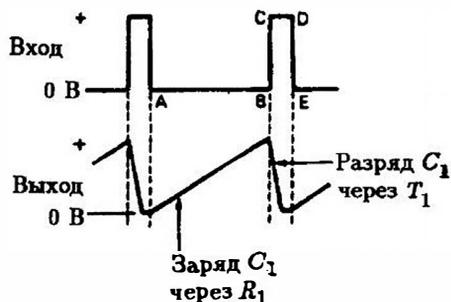
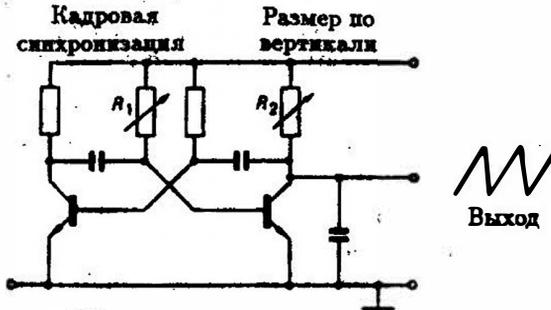


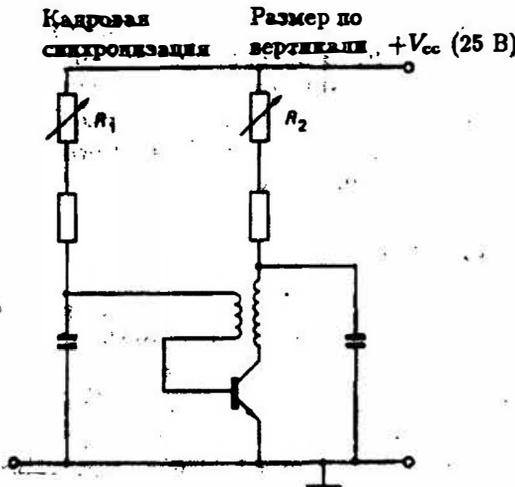
Рис. 33.10. Форма сигналов на входе и выходе генератора пилообразного напряжения.

транзистор в состояние отсечки, конденсатор C_1 снова начинает заряжаться и т. д.

Тот же принцип заряда и разряда конденсатора используется и в других генераторах пилообразного напряжения. На рис. 33.11 приведены схемы двух таких генераторов на основе несинхронизированного мультипликатора и блокинг-генератора соответственно, применяемых в блоках развертки телевизоров. Потенциометр R_1 управляет частотой развертки (кадровой синхронизацией), а потенциометр R_2 — амплитудой сигнала развертки (размером изображения по вертикали).



(а)



(б)

Рис. 33.11. Генераторы пилообразного напряжения на основе (а) несинхронизированного мультипликатора и (б) блокинг-генератора, применяемые в блоках кадровой развертки телевизоров.

Логические схемы

Логические элементы, включая вентили, счетчики и запоминающие устройства, изготавливаются в виде интегральных модулей, или интегральных схем (ИС). Эти ИС разбивают на классы, называемые семействами, по числу полупроводниковых приборов, содержащихся в одной ИС. В настоящее время существуют следующие семейства.

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. ИС низкой степени интеграции | до 10 приборов. |
| 2. ИС средней степени интеграции | 10–100 приборов. |
| 3. ИС большой степени интеграции, или большие ИС (БИС) | 100–1000 приборов. |
| 4. ИС сверхбольшой степени интеграции, или сверхбольшие ИС (СБИС) | 1000–10 000 приборов. |
| 5. Ультрабольшие ИС (УБИС) | 10 000–100 000 приборов. |

Степень интеграции определяет сложность интегральной схемы. Каждое следующее по сложности семейство характеризуется десятикратным увеличением числа элементов по сравнению с предыдущим. К ИС низкой и средней степени интеграции относятся дискретные логические элементы, такие, как вентили, счетчики и регистры. БИС и СБИС используются в качестве запоминающих устройств, микропроцессоров и законченных систем, таких, как микрокомпьютеры.

Логические состояния

Логический элемент имеет два различных состояния: состояние логического 0, представляемое низким уровнем напряжения, обычно 0 В; и состояние логической 1, представляемое высоким уровнем напряжения (положительной полярности в случае *положительной логики* и отрицательной полярности в случае *отрицательной логики*). Уровень напряжения, который представляет логическую 1, зависит от используемого типа ИС. Для ИС, изготавливаемых по биполярной технологии, например для ИС ТТЛ (ИС на основе транзисторно-транзисторной логики), логической 1 соответствует напряжение 5 В, в то время как для ИС КМОП (ИС на комплементарных, или дополняющих, МОП-транзисторах) логическая 1 может быть представлена напряжением в диапазоне от 3 до 15 В и выше. ИС ТТЛ имеют преимущество в быстродействии, а ИС КМОП позволяют реализовать более высокую степень интеграции компонентов

т. е. позволяют разместить большее число логических элементов в одном интегральном модуле) и не требуют использования стабилизированных источников питания.

Транзисторно-транзисторные логические элементы (ТТЛ)

ТТЛ-элементы применяются в интегральных схемах и обеспечивают высокую скорость переключения. На рис. 34.1 показана упрощенная схема логического элемента И-НЕ с многоэмиттерным транзистором T_1 на входе. Когда на обоих входах присутствует логический 0, транзистор T_1 насыщен и напряжение на его коллекторе близко к 0 В. Следовательно, транзистор T_2 находится в состоянии отсечки, и на выходе мы имеем логическую 1. Когда на оба входа подается логическая 1, транзистор T_1 закрывается и переключает транзистор T_2 в состояние насыщения. В этом случае на выходе элемента мы имеем логический 0.

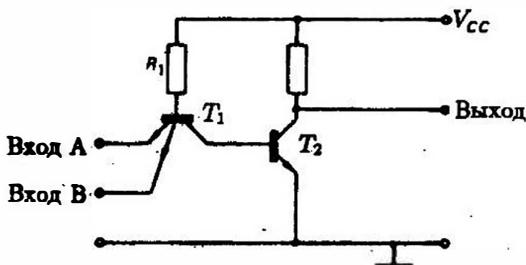


Рис. 34.1. Логический элемент И-НЕ (ТТЛ-типа).

Логические элементы на полевых транзисторах

Логические схемы в настоящее время изготавливаются только в виде интегральных схем. Огромное количество логических элементов можно разместить на мельчайшем кристалле (чипе) кремния размером 1×2 мм. В силу своей простоты полевые транзисторы применяются чаще, чем биполярные транзисторы. Наиболее широко распространены логические элементы на основе так называемых КМОП-ячеек (здесь они не рассматриваются). На рис. 34.2 приведена схема логического элемента ИЛИ-НЕ на МОП-транзисторах, который работает на основе отрицательной логики. В этой схеме T_1 и T_2 — полевые МОП-транзисторы с каналом p -типа (работающие в режиме обогащения). Когда на обоих входах присутствует уровень логического 0, транзисторы T_1 и T_2 находятся в состоянии отсечки и на выходе мы имеем логическую 1 ($-V_{DD} = -20$ В). Когда на один или на оба входа подается логическая 1 (например, -20 В), открываются один или оба транзистора и на выходе мы получаем логический 0.

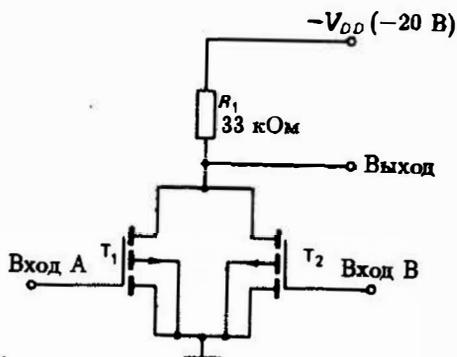


Рис. 34.2. Логический элемент ИЛИ-НЕ на МОП-транзисторах.

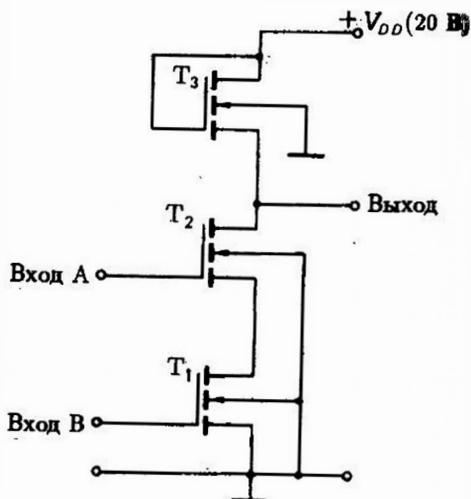


Рис. 34.3. Логический элемент И-НЕ на МОП-транзисторах.

На рис. 34.3 показана схема логического элемента И-НЕ на основе полевых МОП-транзисторов с каналом n -типа. Поскольку используется источник питания положительной полярности, данный логический элемент работает на основе положительной логики. Транзистор T_3 постоянно смещен в активную рабочую область напряжением V_{DD} , подаваемым на затвор, и выполняет функцию активной нагрузки логического элемента. Когда на одном или на обоих входах присутствует логический 0, один или оба транзистора находятся в состоянии отсечки, выдавая логическую 1 на выходе. Ток через транзисторы будет протекать только в том случае, когда на оба входа будет подана логическая 1, и только в этом случае мы получим на выходе логический 0.

Булевы выражения

Функции, реализуемые отдельным логическим элементом или комбинацией логических элементов, могут быть выражены логическими формулами, называемыми булевыми выражениями. В булевой алгебре используются следующие обозначения логических функций (см. табл. 34.1):

- Функция И обозначается символом точки (\cdot). Двухходовый (входы А и В) логический элемент И вырабатывает на выходе сигнал, представляемый булевым выражением $A \cdot B$.
- Функция ИЛИ обозначается символом (+). Двухходовый логический элемент ИЛИ вырабатывает на выходе сигнал, представляемый булевым выражением $A + B$.

Таблица 34.1. Булевы выражения

Функция	Обозначение в булевой алгебре
И	$A \cdot B$
ИЛИ	$A + B$
НЕ	\bar{A}
И-НЕ	$\overline{A \cdot B}$
ИЛИ-НЕ	$\overline{A + B}$
Исключающее ИЛИ	$(A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B)$ или $A \oplus B$
Исключающее ИЛИ-НЕ	$\overline{(A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B)}$ или $\overline{A \oplus B}$

- Логическая функция НЕ обозначается символом черты над обозначением входного сигнала. Логическая схема НЕ с одним входом А выработывает на выходе сигнал, представляемый булевым выражением \bar{A} (читается «НЕ А»).

Через эти простые функции можно выразить более сложные:

- Функция И-НЕ записывается как $\overline{A \cdot B}$.
- Функция ИЛИ-НЕ записывается как $\overline{A + B}$.
- Функция Исключающее ИЛИ записывается как $(A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B)$. Ее можно также записать, используя специальное обозначение, $A \oplus B$.
- Функция Исключающее ИЛИ-НЕ записывается как $\overline{(A \cdot \bar{B}) + (\bar{A} \cdot B)}$. Ее можно также записать, используя специальное обозначение, $\overline{A \oplus B}$.

Комбинаторная логика

Рассмотрим логическую схему на рис. 34.4. Логическую функцию, выполняемую этой схемой, можно описать с помощью следующих булевых выражений.

Выходной сигнал логического элемента ИЛИ (i): $A + B$

Выходной сигнал логического элемента И-НЕ (ii): $\overline{C \cdot D}$

Выходной сигнал логического элемента ИЛИ (iii): $(A + B) + \overline{C \cdot D}$

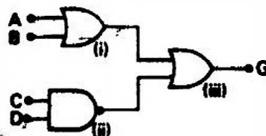


Рис. 34.4.

Пример 1

Обратимся к рис. 34.5.

- Найдите булево выражение для логической функции изображенной комбинации логических элементов.
- Составьте таблицу истинности, показывающую логические состояния во всех точках схемы, и докажите, что эту схему можно свести к одному логическому элементу.

Решение

- Булево выражение для точки $C = \bar{A}$.
Булево выражение для точки $D = \bar{B}$.
Булево выражение для точки $F = \bar{A} \cdot \bar{B}$.
- Таблица истинности

Входы		Точки		Выход
A	B	C	D	F
0	0	1	1	1
0	1	1	0	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	0

Как видно из таблицы истинности, приведенная комбинация логических элементов эквивалентна логическому элементу ИЛИ-НЕ.

Пример 2

Обратимся к рис. 34.6.

- Найдите булево выражение для логической функции изображенной комбинации логических элементов.
- Составьте таблицу истинности, показывающую логические состояния во всех точках схемы, и докажите, что эту схему можно свести к одному логическому элементу.

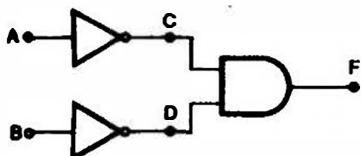


Рис. 34.5.

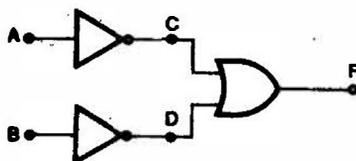


Рис. 34.6.

Решение

- а) Булево выражение для точки $C = \overline{A}$.
 Булево выражение для точки $D = \overline{B}$.
 Булево выражение для точки $F = \overline{A + B}$.

б) Таблица истинности

Входы		Точки		Выход
A	B	C	D	F
0	0	1	1	1
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	1	0	0	0

Как видно из таблицы истинности, приведенная комбинация логических элементов эквивалентна логическому элементу И-НЕ.

Счетчики

Функцию счета в двоичном счетчике выполняет бистабильный мультивибратор, или делитель на 2, чаще называемый триггером. Цепочка из нескольких таких триггеров образует счетчик. На рис. 34.7 показан двоичный счетчик, состоящий из трех триггеров. Каждый триггер делит частоту поступающих импульсов на 2. Таким образом, два последовательных триггера обеспечивают деление на 4 ($2 \cdot 2$), а три триггера — на 8 ($2 \cdot 2 \cdot 2$). Другими словами, на каждые восемь входных импульсов на выходе А появятся четыре импульса, на выходе В — два импульса и на выходе С — один импульс (рис. 34.7).

Как уже говорилось в гл. 32, бистабильный мультивибратор изменяет свое состояние только во время действия одного из фронтов входного импульса. Уровень входного импульса изменяется от 0 к 1 и обратно к 0, и так для каждого приходящего импульса. Обычно предполагается, что состояние триггера изменяется при приходе отрицательного фронта импульса (т. е. при переходе от 1 к 0).

Сигнал на выходе Q_A триггера А соответствует 2^0 , или столбцу «единиц» в табл. 34.2, сигнал на выходе Q_B — 2^1 , или столбцу «двоек», и наконец, сигнал на выходе Q_C — 2^2 , или столбцу «четверок». После поступления 6 импульсов на вход счетчика он оказывается в следующем состоянии: А (число единиц) = 0, В (число двоек) = 1, С (число четверок) = 1; это состояние соответствует десятичному числу 6 ($0 + 2 + 4$).

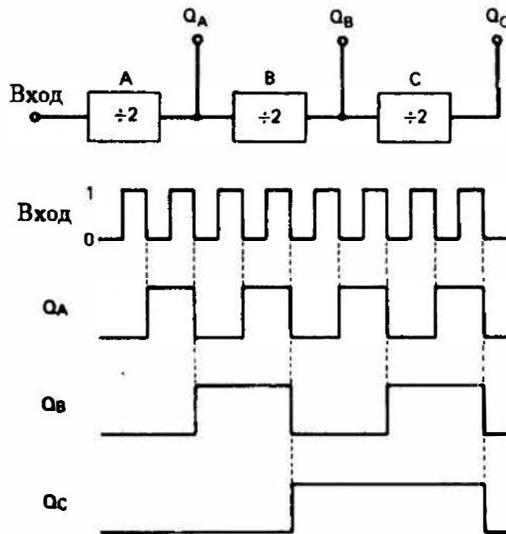


Рис. 34.7. Двоичный счетчик на трех триггерах.

Таблица 34.2

Импульс	Q_A единицы (2^0)	Q_B двойки (2^1)	Q_C четверки (2^2)
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
4	0	0	1
5	1	0	1
6	0	1	1
7	1	1	1
8	0	0	0

В двоичном исчислении это число записывается как 110 при порядке следования двоичных разрядов СВА. Обратите внимание, что в счетчике двоичному разряду единиц соответствует выход первого триггера, начиная от входа счетчика, а в двоичном числе разряд единиц всегда является самым правым разрядом.

Когда приходит седьмой импульс, на всех выходах счетчика устанавливается 1. Восьмой импульс сбрасывает все триггеры в 0. Еще раз отметим, что выходной сигнал каждого триггера представляет столбец в таблице двоичного кода. Сам двоичный код записывается в порядке СВА.

Обратная связь

Обратная связь вводится в двоичных счетчиках для изменения коэффициента деления частоты входного сигнала. Для примера рассмотрим действие обратной связи в счетчике на рис. 34.8(а), состоящем из трех триггеров. Процесс счета происходит обычным образом до прихода третьего импульса, когда счетчик находится в состоянии 011 (см. табл. 34.3).

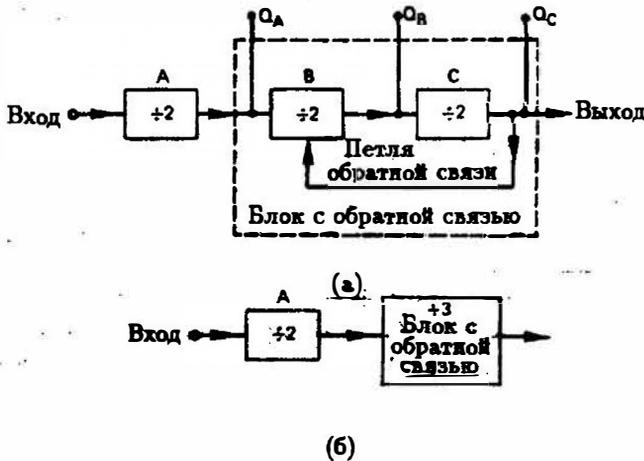


Рис. 34.8. (а) Счетчик-делитель на 6 с обратной связью, охватывающей триггеры В и С. (б) Замена петли обратной связи эквивалентным модулем деления на 3.

Таблица 34.3

Импульс	Q_A	Q_B	Q_C
0	0	0	0
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	1	0
Обратная связь	(0)	(0)	(1)
4	0	1	1
5	1	1	1
6	0	0	0

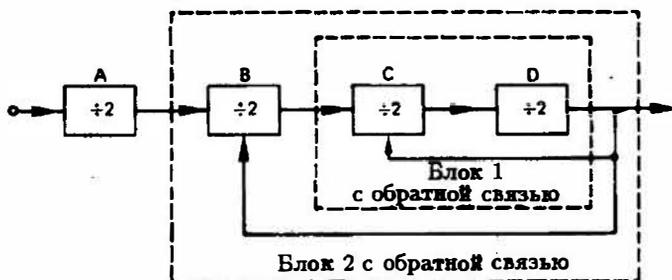
Четвертый импульс переключает сигнал на выходах А и В к 0 и на выходе С к 1. В отсутствие обратной связи счетчик переключился бы в состояние 100. Однако при включении обратной связи изменение сигнала на выходе С передается на вход триггера В, возвращая его выходной сигнал обратно к 1. Счетчик окажется в состоянии 110. Пятый импульс пере-

ключит все выходы к 1, и шестой импульс сбросит все триггеры в 0, т. е. получился счетчик-делитель на 6.

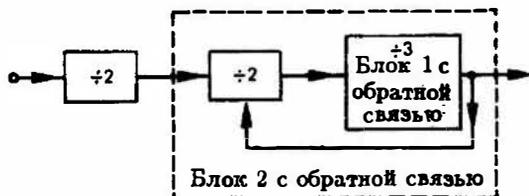
Вообще, можно показать, что петля обратной связи уменьшает коэффициент деления триггеров внутри петли на 1. В предыдущем примере внутри петли обратной связи находились триггеры В и С. Без обратной связи они осуществляли деление на 4. С обратной связью триггеры В и С образуют блок деления на 3 ($= 4 - 1$), как показано на рис. 34.8(б). С учетом триггера А вне петли обратной связи полный коэффициент деления счетчика равен 6 ($= 2 \cdot 3$).

Десятичный счетчик

На рис. 34.9(а) изображена схема десятичного счетчика с двумя петлями обратной связи. Обратной связью охвачены: 1) блок 1, включающий триггеры С и D и обеспечивающий деление на 3 ($= 4 - 1$), и 2) блок 2, включающий блок 1 и триггер В. Из рис. 34.9(б) видно, что без обратной связи блок 2 делил бы на 6 ($= 2 \cdot 3$). С обратной связью его коэффициент деления равен 5 ($= 6 - 1$). С учетом триггера А, не охваченного обратной связью, полный коэффициент деления счетчика равен 10 ($= 2 \cdot 5$).



(а)



(:5)

(б)

Рис. 34.9. Десятичный счетчик (а) и его представление в виде эквивалентных модулей (б).

Регистр сдвига

Для передачи данных из одной части системы, например компьютера, в другую можно использовать два метода. Первый, более быстрый, заключается в одновременной передаче всех разрядов. При этом для передачи восьми разрядов требуется восемь отдельных линий. Для передачи информации на расстояния в несколько метров этот метод вполне пригоден, но при передаче на большие расстояния, например между городами, он становится слишком дорогим. В этом случае применяется второй, более медленный метод: данные передаются последовательно разряд за разрядом по одному проводу. Для одновременного сдвига всех двоичных разрядов влево или вправо применяется регистр сдвига. Он состоит из нескольких триггеров, способных передвигать двоичные разряды в последовательном порядке.

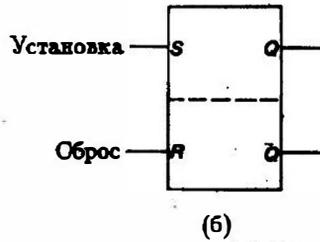
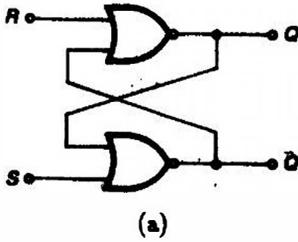
Кольцевой счетчик

Кольцевой счетчик — это обычный счетчик, составленный из нескольких триггеров, в котором выходной сигнал подается обратно на вход, отсюда и происходит его название. Импульсы циркулируют по счетчику от входа к выходу и обратно на вход. В конце каждого цикла выходной сигнал кольцевого счетчика можно снять для переключения другого счетчика. Например, выходной сигнал десятичного, или декадного, счетчика можно использовать для переключения еще одного декадного счетчика, обеспечивая тем самым коэффициент пересчета, равный 100.

Фиксатор (триггер-защелка)

В гл. 32 рассматривались бистабильные мультивибраторы, или триггеры, построенные на дискретных компонентах. Триггеры — очень важные и нужные базовые элементы логических устройств. Они применяются в качестве делителей на 2, фиксаторов (одноразрядные ячейки памяти) и для других целей.

Базовый триггер, называемый *RS*-триггером, или триггером-защелкой, показан на рис. 34.10. Два выходных сигнала, снимаемые с выходов Q и \bar{Q} ($\text{НЕ } Q$), находятся в противофазе друг к другу. Если $Q = 1$, то $\bar{Q} = 0$, и наоборот. Таблица истинности для *RS*-триггера приведена на рис. 34.10(в). При подаче логической 1 на вход R (*Reset* — сброс) на выходе Q устанавливается уровень логического 0 (и уровень логической 1 на выходе \bar{Q}), при подаче логической 1 на вход S (*Set* — установка) на выходе Q устанавливается уровень логической 1 (и уровень логического 0 на выходе \bar{Q}).

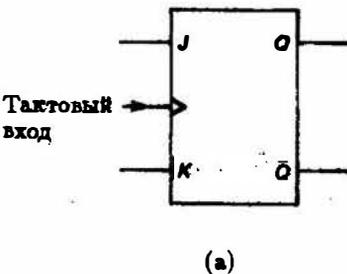


S	R	Q	\bar{Q}
0	0	Без изменений	
0	1	0	1 (Сброс)
1	0	1	0 (Установка)
1	1	Неопределенное состояние	

(в)

Рис. 34.10.

Более сложным устройством по сравнению с простым RS -триггером является тактируемый JK -триггер, в котором имеется тактовый вход и отсутствует неопределенное состояние (рис. 34.11). Тактовый вход важен для синхронных систем, в которых переключение триггеров происходит лишь тогда, когда на тактовый вход подается логическая 1. При установке логической 1 на обоих входах J и K триггера его выход переключается из уровня логического 0 в логическую 1 при поступлении каждого тактового импульса.



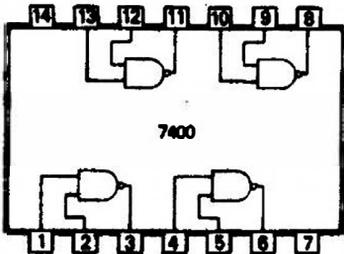
Такто- вый вход	J	K	Q	\bar{Q}
0	X	X	Без изменений	
1	0	0	Без изменений	
1	0	1	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	Переключение	

(б)

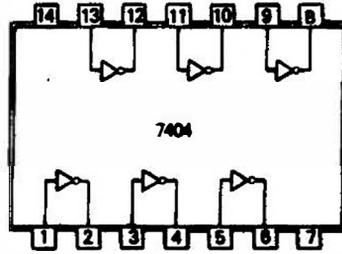
Рис. 34.11. Условное обозначение (а) и таблица истинности (б) JK -триггера.

Логические элементы в виде ИС

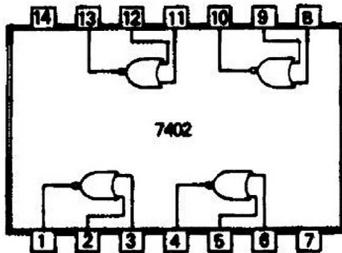
Логические элементы изготавливаются в виде интегральных схем и выпускаются в виде модулей, содержащих большое число идентичных элементов на одном модуле (чипе). Известны два основных типа ИС: ИС ТТЛ и ИС КМОП. Примеры ИС ТТЛ приведены на рис. 34.12.



4 двухходовых логических элемента И-НЕ



6 инверторов (логических элементов НЕ)



4 двухходовых логических элемента ИЛИ-НЕ

Рис. 34.12.

Цифровые индикаторы

Существует несколько способов отображения показаний цифрового измерительного прибора, начиная от простейшей неоновой лампы и кончая светоизлучающими диодами (СИД) и жидкокристаллическими индикаторами (ЖКИ). Обычно отображается от четырех до восьми разрядов десятичных чисел. Максимальное число, отображаемое четырехразрядным индикатором, равно 9999, тогда как для восьмиразрядного индикатора это число равно 99 999 999. В недорогих измерительных устройствах используется так называемый 3,5-разрядный индикатор. В индикаторе этого типа в старшем разряде (крайнем слева) может высвечиваться только либо 0, либо 1. Таким образом, максимальное число, отображаемое на индикаторе этого типа, равно 1999.

Основными типами индикаторов являются индикатор на светоизлучающих диодах (СИД) и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). Каждый разряд индикатора состоит из семи сегментов; это минимальное количество сегментов, необходимое для представления десятичных цифр от нуля до девяти. Сегменты обозначаются латинскими буквами от *a* до *g* (рис. 35.1). Таблица на рис. 35.2 иллюстрирует, с помощью каких сегментов формируется изображение каждой цифры. Жидкокристаллические индикаторы потребляют очень малую мощность (порядка микроватт) и применяются в портативных измерительных приборах. Для работы СИД-индикаторов нужен больший ток, и они потребляют большую мощность (порядка милливатт). Эти индикаторы широко применяются в стационарных цифровых вольтметрах, где потребляемая мощность не имеет пер-

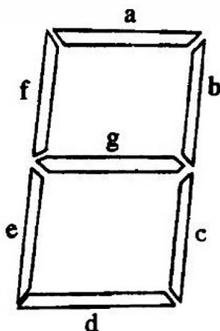


Рис. 35.1.

Номер входного импульса	Активизируемые сегменты	Отображаемое десятичное число
0	a b c d e f	0
1	b c	1
2	a b d e g	2
3	a b c d g	3
4	b c f g	4
5	a c d f g	5
6	c d e f g	6
7	d e f g	7
8	a b c d e f g	8
9	a b c f g	9

Рис. 35.2.

востепенного значения. С другой стороны, показания СИД-индикаторов можно видеть в темноте, в то время как для ЖКИ требуется внешняя подсветка экрана.

Управление работой СИД-индикатора

На рис. 35.3 показана схема управления работой семисегментного СИД-индикатора. Светодиод преобразует электрический ток в свет. Таким образом, чтобы сегмент индикатора светился, через светодиод, образующий этот сегмент, должен протекать ток. Как видно из рисунка, один вывод каждого диода подключен к одной общей для всех диодов точке. Здесь использована схема с общим анодом. Если присоединить к общей точке катоды всех диодов, то получится схема с общим катодом.

Каждый семисегментный индикатор формирует лишь один разряд всего десятичного числа, отображаемого многоразрядным индикатором. Каждый разряд имеет восемь выводов: один вывод для каждого сегмента и один общий вывод. В некоторых случаях для отображения десятичной точки добавляется девятый вывод.

Для управления сегментами индикатора выходной сигнал декадного счетчика нужно сначала преобразовать в соответствующую форму. Выходной сигнал счетчика выдается в виде двоично-десятичного кода, который представляют 4 двоичных разряда. Этот код должен быть преобразован в соответствующий сигнал — код семисегментного индикатора — для включения нужных сегментов. Это преобразование осуществляется с помощью дешифратора.

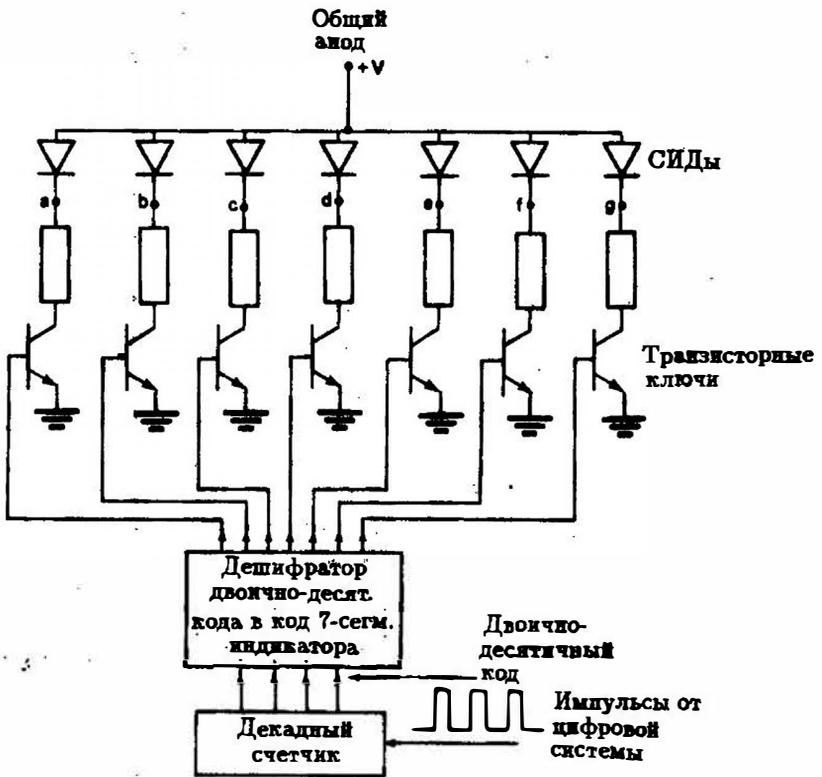


Рис. 35.3.

Показанный на схеме блок транзисторных ключей (блок коммутации тока) обычно выполняется в виде одного интегрального модуля. Функции дешифратора и коммутатора могут быть объединены в одной ИС; примерами являются ИС 7447 для индикаторов с общим анодом и ИС 7448 для индикаторов с общим катодом. На рис. 35.4 показан двухразрядный индикаторный модуль, в который входят два декадных счетчика, два модуля дешифратора/коммутатора и два семисегментных индикатора с общим анодом.

Управление работой ЖКИ

В жидкокристаллических индикаторах используется уникальная взаимосвязь между электрическими и оптическими характеристиками некоторых жидкостей, которые способны сохранять свою кристаллическую структуру. Оптические свойства этих жидких кристаллов позволяют использовать их в устройствах индикации. Жидкие кристаллы не излучают свет в отличие от СИД, а лишь изменяют свою рассеивающую способность, поэтому индикаторы этого типа работают при очень малых токах

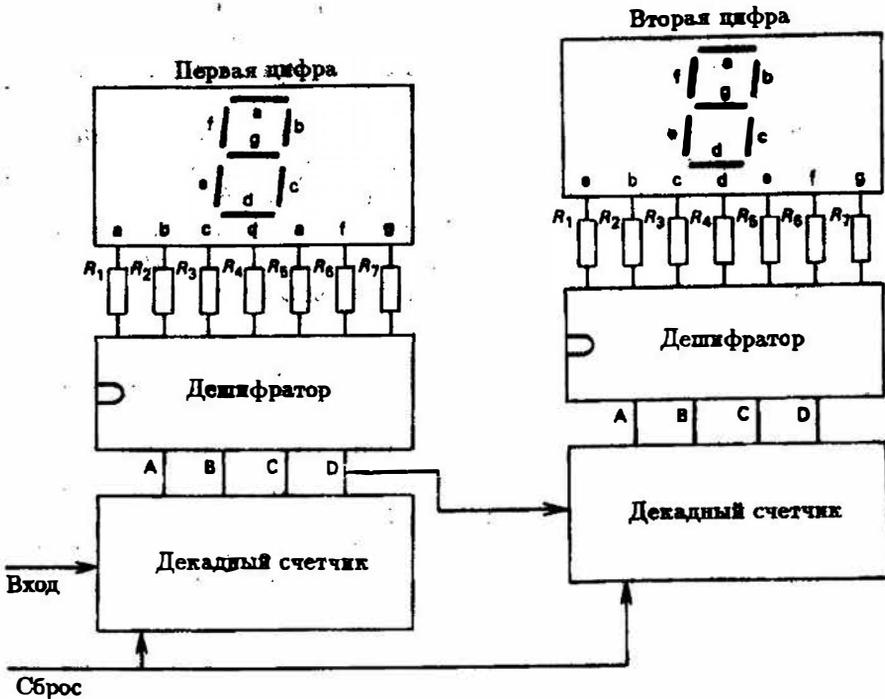


Рис. 35.4.

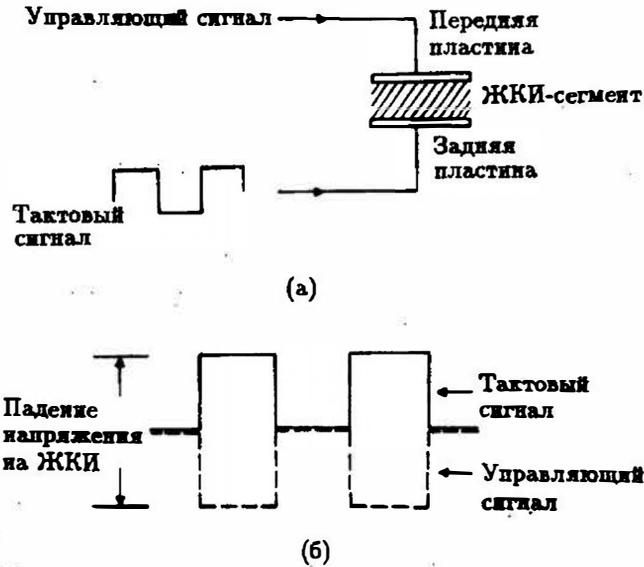


Рис. 35.5.

и потребляют очень малую мощность. Благодаря этому управлять работой ЖКИ могут непосредственно МОП- и КМОП-элементы.

Каждый сегмент ЖКИ имеет два вывода, или пластины: переднюю и заднюю. Задние пластины всех сегментов имеют общее электрическое соединение. Жидкокристаллические индикаторы всегда работают от переменного напряжения, чтобы избежать электролитического осаждения и обеспечить максимальное время жизни индикатора.

Для управления работой ЖКИ-сегмента на его заднюю пластину постоянно подается последовательность тактовых прямоугольных импульсов с частотой следования 40 Гц (рис. 35.5). Выключение сегмента осуществляется путем подачи на переднюю пластину последовательности прямоугольных импульсов, совпадающей по фазе с тактирующей последовательностью, а включение — путем подачи на переднюю пластину аналогичного сигнала в противофазе. Когда тактовый и управляющий сигналы противофазны, амплитуды их суммируются, и амплитуда полного напряжения на ЖКИ вдвое превышает амплитуду тактового сигнала, что обеспечивает включение сегмента (рис. 35.5(б)).

Управление работой ЖКИ можно, например, осуществить с помощью логического элемента Исключающее ИЛИ, как показано на рис. 35.6.

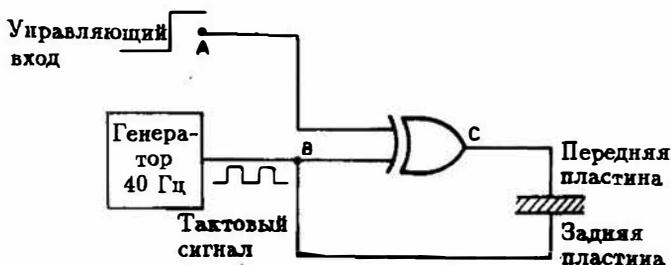


Рис. 35.6.

Таблица истинности логического элемента Исключающее ИЛИ имеет следующий вид:

A	B	C
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Из таблицы истинности видно, что если на управляющем входе А установлен логический 0, сигнал на выходе С повторяет тактовый сигнал (40 Гц) на входе В, т. е. находится в фазе с ним. Сигнал с выхода С подается на переднюю пластину сегмента ЖКИ. Синфазный с ним так-

товый сигнал непосредственно подается на заднюю пластину сегмента. В результате электрический потенциал, а следовательно, и электрическое поле между пластинами оказываются равными нулю, и сегмент выключен.

Когда на управляющем входе А установлена логическая 1, сигнал на выходе С логического элемента оказывается в противофазе с сигналом на входе В. Теперь на переднюю и заднюю пластины сегмента подаются противофазные сигналы, амплитуды которых суммируются и дают удвоенную амплитуду электрического поля (по отношению к амплитуде поля при действии одного тактового сигнала). Сегмент включен.

36

Применение микропроцессоров

Прогресс технологии интегральных схем и появление больших интегральных схем (БИС) привели к многократному расширению применения микропроцессоров в компьютерах, системах управления, измерительных приборах и системах регистрации данных.

Основные элементы микропроцессорной системы (которые были рассмотрены в гл. 12) изображены на рис. 36.1. Микропроцессор, называемый также центральным процессором (ЦП), выполняет арифметические и логические операции в соответствии с программой, хранимой в памяти. Работа всех элементов системы синхронизируется и управляется центральным процессором.



Рис. 36.1.

Память

Существуют два основных типа микросхем памяти. *Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ)* — это ЗУ, которое хранит постоянную информацию и никогда «не забывает» содержимого своих ячеек памяти.

Информация вводится в ПЗУ на этапе изготовления и остается там постоянно. ЦП может только считывать информацию из ПЗУ. Запись новой информации в ПЗУ невозможна, т. е. ЦП не может изменить информацию, хранимую в ПЗУ. Второй основной тип памяти — это ЗУ с произвольной выборкой (ЗУПВ), или оперативное ЗУ (ОЗУ). ОЗУ используется для временного хранения информации, и ЦП может изменить эту информацию в любой момент времени. Таким образом, микропроцессор может считать информацию, хранимую в ОЗУ, а также записать в ОЗУ новую информацию. При отсутствии аварийного батарейного питания информация, записанная в ОЗУ, будет потеряна при отключении питания. Вот почему такая память называется *энергозависимой*. Наоборот, ПЗУ сохраняет информацию даже при отключении питания. Такая память называется *энергонезависимой*.

Микросхема памяти

Микросхема памяти состоит из большого числа *ячеек памяти*, где данные (информация) могут храниться в форме двоичных разрядов (битов). В каждой ячейке обычно хранится одно 8-разрядное двоичное число. У каждой ячейки имеется свой собственный 16-разрядный *адрес*, как показано на рис. 36.2. Адрес ячейки памяти можно рассматривать как конверт, а данные — как полезную информацию, т. е. письмо внутри конверта.

Двоичный адрес				Двоичные данные
0000	0000	0000	0000	Данные
0000	0000	0000	0001	Данные
0000	0000	0000	0010	Данные
0000	0000	0000	0011	Данные
0000	0000	0000	0100	Данные
1100	1110	0110	1100	Данные
1100	1110	0110	1101	Данные
1111	1111	1111	1100	Данные
1111	1111	1111	1101	Данные
1111	1111	1111	1110	Данные
1111	1111	1111	1111	Данные

Рис. 36.2.

Архитектура микропроцессора

Рисунок 36.3 иллюстрирует архитектуру, или организацию, микрокомпьютерной системы. Показаны функциональные связи между различными элементами типичной микропроцессорной компьютерной системы. Микропроцессор — это однокристальная микросхема, содержащая все необходимые схемы для интерпретации и выполнения команд программы на языке обработки данных, логических и арифметических операций, синхронизации и управления системой.

Микропроцессоры обычно монтируются в 40-штырьковом плоском корпусе с двухрядным расположением выводов (рис. 36.4).

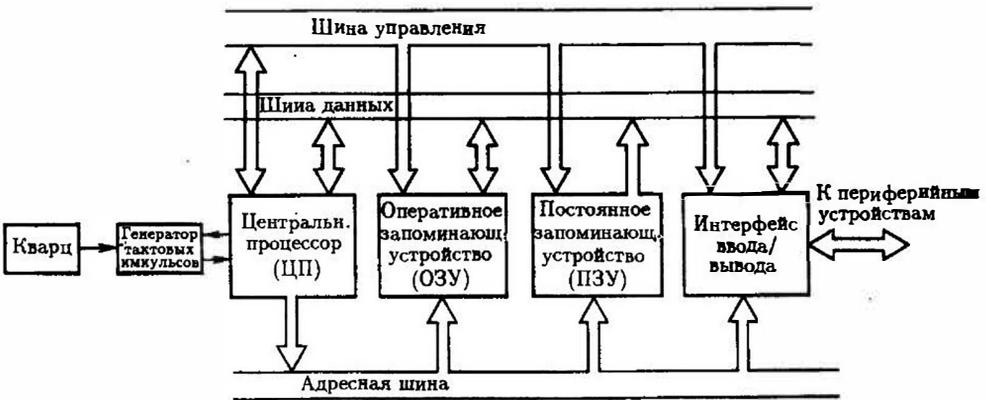


Рис. 36.3.

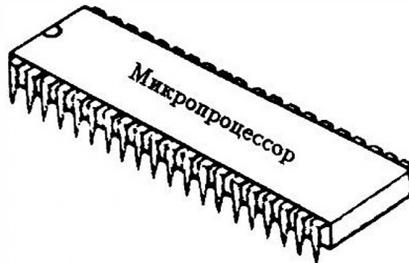


Рис. 36.4.

Интерфейс ввода/вывода

Интерфейс ввода/вывода связывает микрокомпьютер с внешними устройствами, называемыми периферийными устройствами (или просто периферией). Он действует как магистраль ввода/вывода для передачи данных от микропроцессора к клавиатуре, монитору или дисплею, преобразовате-

лям или схемам привода электромеханических устройств (шаговых двигателей, реле, и т. п.) и обратно — от всех этих периферийных устройств к процессору.

Шины

Связь основных аппаратных модулей микрокомпьютера (описанного ранее) обеспечивается с помощью так называемой шинной структуры. Шина — это группа соединительных проводов или проводящих дорожек на печатной плате, используемых в качестве линии связи для передачи цифровой информации и объединенных общим функциональным назначением. В микропроцессорной системе имеется три основных шины: шина данных, адресная шина и шина управления.

Шина данных используется для пересылки данных между микропроцессором и другими элементами в системе и обычно выполнена в виде двунаправленной 8-разрядной шины.

Адресная шина используется для пересылки адреса ячейки памяти, чтобы получить данные из ПЗУ или ОЗУ (считать данные) или сохранить данные в адресуемой ячейке ОЗУ (записать данные). Эта шина служит также для адресации устройств ввода/вывода, с которыми может осуществляться обмен данными. Адресная шина является однонаправленной шиной, по которой могут одновременно передаваться 16 разрядов цифровой информации.

Шина управления используется для посылки управляющих сигналов, например сигналов синхронизации, чтения, записи и т. п., от микропроцессора к другим элементам системы. Число линий в этой шине зависит от типа используемого микропроцессора и архитектуры системы.

Тактовый генератор

Задающий генератор синхронизирующих импульсов (тактовый генератор) служит в микрокомпьютере для синхронизации пересылки данных. Он работает на основе высокочастотного импульсного генератора с кварцевой стабилизацией. Частота тактового генератора определяет быстродействие микрокомпьютера.

Другие применения

Кроме компьютеров микропроцессоры широко применяются в различных промышленных и бытовых устройствах: стиральных машинах, легковых автомобилях, телевизорах, электроплитах, электронных играх, кассовых аппаратах, автоматических измерительных приборах, устройствах автоматизации и регистрации данных. В этих применениях микропроцессоры обычно называются микро- или мини-контроллерами. Вот некоторые из преимуществ, которые дает использование микроконтроллеров.

1. Снижается стоимость продукции.
2. Увеличивается надежность.
3. Снижаются эксплуатационные расходы.
4. Упрощается управление устройством и уменьшается вмешательство человека в его обслуживание.

В каждом конкретном применении проявляются одно или сразу несколько перечисленных преимуществ.

Измерительные приборы

Каждый измерительный прибор имеет определенные ограничения, которые нужно принимать во внимание, чтобы при использовании этого прибора получить правильное значение измеряемой величины. Введение измерительного прибора в электрическую схему может нарушить ее нормальную работу. Поэтому первое правило использования измерительных устройств — обеспечение таких условий измерения, при которых это вмешательство незначительно и им можно пренебречь. Важнейшей характеристикой измерительного прибора является его собственное сопротивление, называемое внутренним сопротивлением (рис. 37.1).



Рис. 37.1. Базовый измерительный прибор.

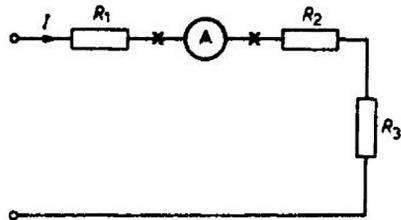


Рис. 37.2. Включение амперметра А для измерения тока I в цепи.

Измерение тока

Чтобы измерить ток в цепи, нужно разомкнуть эту цепь в подходящем месте и в место разрыва *последовательно* включить амперметр А (рис. 37.2). Амперметр может быть включен в любом месте цепи при условии, что через него будет протекать весь измеряемый ток.

Высококачественные амперметры имеют малое внутреннее сопротивление, благодаря чему они оказывают очень слабое влияние на измеряемый электрический ток. Амперметры с большими внутренними сопротивлениями дают неточные показания.

Измерение напряжения

Напряжение, или разность потенциалов, существует между двумя точками в цепи. Чтобы измерить напряжение, вольтметр включается между этими двумя точками, например между выводами резистора, без разрыва

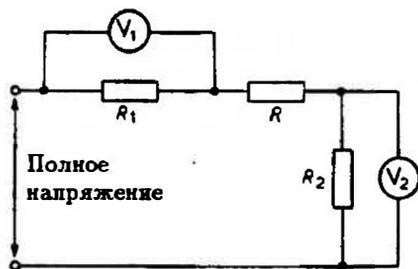


Рис. 37.3. Измерение напряжения.

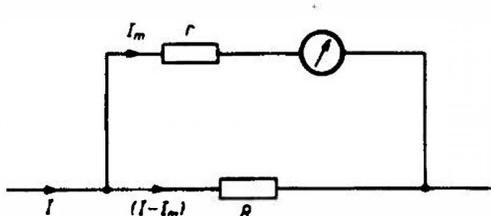


Рис. 37.4. Эффект нагрузки — часть общего тока, ток I_m , ответвляется в вольтметр.

цепи. Как показано на рис. 37.3, вольтметр V_1 измеряет падение напряжения на резисторе R_1 , а вольтметр V_2 — на резисторе R_2 .

Эффект нагрузки

Как видно из рис. 37.4, внутреннее сопротивление вольтметра шунтирует сопротивление участка цепи R , к которому подключается вольтметр. Часть тока, протекавшая до подключения вольтметра через R , теперь ответвляется к вольтметру. Другими словами, для полного тока I эффективное сопротивление резистора R , зашунтированного теперь внутренним сопротивлением вольтметра, уменьшается. Это так называемый эффект нагрузки вольтметра. Для ослабления этого эффекта внутреннее сопротивление вольтметра делают максимально большим, так чтобы оно по меньшей мере в 20 раз превышало сопротивление нагрузки. При таких соотношениях шунтирующим эффектом сопротивления измерительного прибора можно пренебречь.

Внутреннее сопротивление

Внутреннее сопротивление измерительного прибора зависит от его чувствительности и выбранного диапазона (предела) измерений. Его можно вычислить исходя из чувствительности, которую указывают в омах на вольт (Ом/В). Например, вольтметр с чувствительностью 1000 Ом/В имеет внутреннее сопротивление

$$1000 \cdot 1 = 1000 \text{ Ом в диапазоне измерений до } 1 \text{ В,}$$

$$1000 \cdot 3 = 3000 \text{ Ом в диапазоне измерений до } 3 \text{ В,}$$

$$1000 \cdot 10 = 10\,000 \text{ Ом в диапазоне измерений до } 10 \text{ В и т. д.}$$

При заданной чувствительности, чем больший диапазон измерений выбирается, тем больше внутреннее сопротивление и больше точность.

Пример 1

На рис. 37.5 показаны два одинаковых вольтметра V_1 и V_2 с чувствительностью $20\,000\ \text{Ом/В}$. Какой вольтметр даст более точные показания, если оба прибора работают в диапазоне измерений $10\ \text{В}$?

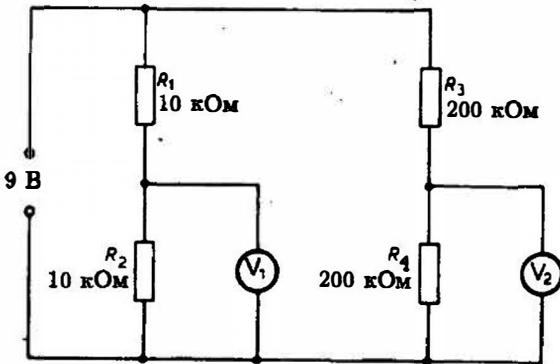


Рис. 37.5.

Решение

Звнутреннее сопротивление каждого прибора равно $20\,000 \cdot 10 = 200\,000\ \text{Ом}$, или $200\ \text{кОм}$. Вольтметр V_1 шунтирует резистор R_2 с сопротивлением $10\ \text{кОм}$, т. е. сопротивление этого измерительного прибора в 20 раз превышает сопротивление резистора R_2 , следовательно, вольтметр V_1 даст точное показание (т. е. $4.5\ \text{В}$). Вольтметр V_2 шунтирует резистор R_4 , сопротивление которого равно внутреннему сопротивлению вольтметра $200\ \text{кОм}$. В результате эффект нагрузки для вольтметра V_2 будет значительным, что приведет к ошибочному показанию ($3\ \text{В}$).

Аналоговые и цифровые измерительные приборы

Аналоговые измерительные приборы, такие, как магнитоэлектрические измерительные приборы с подвижной катушкой и осциллографы, обеспечивают непрерывную индикацию величин напряжения, тока и т. п. Цифровые измерительные приборы отображают показания дискретным образом. Они обеспечивают непосредственное считывание значений измеряемой величины, не зависящее от человеческих ошибок, не имеют движущихся частей, меньше по размерам и дешевле по сравнению с аналоговыми измерительными приборами.

Типы измерительных приборов

Приборы с подвижной катушкой

Магнитоэлектрический измерительный прибор с подвижной катушкой указывает величину постоянного тока, протекающего через катушку. Его можно использовать и для проведения измерений на переменном токе, подключив ко входу выпрямитель. Приборы этого типа имеют чувствительность порядка 20 кОм/В для постоянного тока и 600 Ом/В для переменного тока, частотный диапазон измерений — до 2 кГц или немного больше.

Электронный вольтметр

Это, по существу, магнитоэлектрический измерительный прибор с подвижной катушкой, но с усилителем на входе. Чувствительность достигает порядка мегаом на вольт как для постоянного, так и для переменного токов, частотный диапазон измерений — 3 МГц и выше.

Цифровой вольтметр

Цифровой вольтметр имеет очень высокую чувствительность (измеряемую в мегаомах на вольт) и очень широкий частотный диапазон (свыше 2 МГц).

Электронно-лучевой осциллограф

Кроме того, что на экране электронно-лучевого осциллографа можно увидеть форму электрического сигнала, с его помощью можно также измерить самые различные электрические величины: напряжение (среднее и пиковое), период, разность фаз и время задержки. Входное сопротивление осциллографа порядка 1 МОм, чувствительность и частотный диапазон измерений такие же, как у электронного и цифрового вольтметров.

Универсальный измерительный прибор (мультиметр)

Это, по существу, тот же вольтметр, но сочетающий в себе несколько измерительных функций. Коммутирующее устройство переключает функции и позволяет использовать этот прибор как амперметр, вольтметр и омметр. Это может быть аналоговый (с подвижной катушкой) или цифровой прибор.

Осциллограф

Осциллограф можно использовать также для определения частоты. Период t отображаемого сигнала измеряется с помощью откалиброванной по длительности развертки, а затем частота вычисляется по формуле

$f = 1/t$. Этот метод применим как для синусоидального, так и для периодического сигнала любой другой формы.

Более точный метод определения частоты синусоидального сигнала заключается в сравнении его частоты с известной эталонной частотой. Для этого выключается внутренний генератор развертки осциллографа, а сигнал известной частоты (вырабатываемый генератором эталонной частоты) подается на одну пару отклоняющих пластин, а сигнал измеряемой частоты — на другую. Плавно изменяя частоту эталонного генератора, добиваются появления на экране устойчивых изображений, называемых фигурами Лиссажу (рис. 37.6). Неизвестную частоту можно определить, подсчитывая число пиков (максимумов) на изображении. Если неизвестная частота f_Y подается на Y-пластины, а известная частота f_X — на X-пластины, то в тех случаях, когда возникают только горизонтальные линии, как на рис. 37.6, имеем

Неизвестная частота $f_Y = \text{Известная частота } f_X \cdot \text{Число пиков}$.

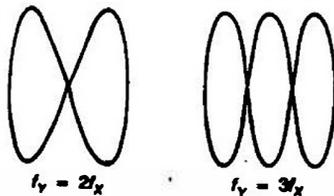


Рис. 37.6.

Измерительные приборы для регистрации логических состояний

Рассмотренные в предыдущем разделе устройства измеряют аналоговые величины. Для проверки логического состояния контрольной точки нужен логический пробник (рис. 37.7). При касании щупом пробника кон-



Рис. 37.7. TTL — ТТЛ; CMOS — КМОП; H — высокий уровень; L — низкий уровень.

трольной точки (или узла) индицируется логическое состояние узла: «1», «0» или состояние разомкнутой цепи. Индикация осуществляется с помощью индикатора на одном или двух светодиодах. Для изменения логического состояния узла используется *логический импульсный генератор*. При касании узла щупом генератора логическое состояние этого узла изменяется на противоположное. Если узел находился в состоянии логической 1, то он переключается в состояние логического 0, и наоборот. Логический импульсный генератор обычно применяется вместе с логическим пробником для контроля логических элементов, счетчиков, триггеров и других цифровых устройств.

Еще один очень полезный логический измерительный прибор — *токовый детектор*. Если токовый детектор поднести к проводнику на печатной плате, то он укажет наличие или отсутствие пульсирующего тока в проводнике. Электрический контакт с проводником не нужен. Токовый детектор применяется вместе с импульсным генератором для обнаружения короткого замыкания между проводником или выводом какого-либо элемента, с одной стороны, и землей или шиной источника питания — с другой. Этот детектор можно также применять для поиска коротких замыканий между проводниками или выводами элементов.

Логический и сигнатурный анализаторы

Логический пробник и другие приборы, определяющие логическое состояние схемы, практически не применяются при тестировании микропроцессорных систем. В системе с шинной организацией информация о логическом состоянии отдельной линии шины недостаточна для адекватного контроля системы. Необходима одновременная проверка логических уровней на всех линиях адресной шины или шины данных. Это можно сделать с помощью многоканального логического анализатора (индикатора логических состояний), который позволяет одновременно контролировать большое количество входов. Альтернативным методом тестирования микропроцессорной системы является регистрация последовательности битов, появляющихся в одной контрольной точке, с последующим сравнением этой последовательности с аналогичной последовательностью в хорошо работающей известной системе. Этот метод контроля основан на применении одновходового сигнатурного анализатора.

Поиск неисправностей в электронных схемах

Существуют два метода тестирования для диагностики неисправности электронной системы, устройства или печатной платы: функциональный контроль и внутрисхемный контроль. Функциональный контроль обеспечивает проверку работы тестируемого модуля, а внутрисхемный контроль состоит в проверке отдельных элементов этого модуля с целью выяснения их номиналов, полярности включения и т. п. Обычно оба этих метода применяются последовательно. С разработкой аппаратуры автоматического контроля появилась возможность очень быстрого внутрисхемного контроля с индивидуальной проверкой каждого элемента печатной платы, включая транзисторы, логические элементы и счетчики. Функциональный контроль также перешел на новый качественный уровень благодаря применению методов компьютерной обработки данных и компьютерного контроля. Что же касается самих принципов поиска неисправностей, то они совершенно одинаковы, независимо от того, осуществляется ли проверка вручную или автоматически.

Поиск неисправности должен проводиться в определенной логической последовательности, цель которой — выяснить причину неисправности и затем устранить ее. Число проводимых операций следует сводить к минимуму, избегая необязательных или бессмысленных проверок. Прежде чем проверять неисправную схему, нужно тщательно осмотреть ее для возможного обнаружения явных дефектов: перегоревших элементов, разрывов проводников на печатной плате и т. п. Этому следует уделять не более двух-трех минут, с приобретением опыта такой визуальный контроль будет выполняться интуитивно. Если осмотр ничего не дал, можно перейти к процедуре поиска неисправности.

В первую очередь выполняется *функциональный тест*: проверяется работа платы и делается попытка определить неисправный блок и подозреваемый неисправный элемент. Прежде чем заменять неисправный элемент, нужно провести *внутрисхемное измерение* параметров этого элемента, для того чтобы убедиться в его неисправности.

Функциональные тесты

Функциональные тесты можно разбить на два класса, или серии. Тесты *серии 1*, называемые *динамическими тестами*, применяются к закончен-

ному электронному устройству для выделения неисправного каскада или блока. Когда найден конкретный блок, с которым связана неисправность, применяются тесты серии 2, или статические тесты, для определения одного или двух, возможно, неисправных элементов (резисторов, конденсаторов и т. п.).

Динамические тесты

Это первый набор тестов, выполняемых при поиске неисправности в электронном устройстве. Поиск неисправности должен вестись в направлении от выхода устройства к его входу по методу деления пополам. Суть этого метода заключается в следующем. Сначала вся схема устройства делится на две секции: входную и выходную. На вход выходной секции подается сигнал, аналогичный сигналу, который в нормальных условиях действует в точке разбиения. Если при этом на выходе получается нормальный сигнал, значит, неисправность должна находиться во входной секции. Эта входная секция делится на две подсекции, и повторяется предыдущая процедура. И так до тех пор, пока неисправность не будет локализована в наименьшем функционально отличимом каскаде, например в выходном каскаде, видеусилителе или усилителе ПЧ, делителе частоты, дешифраторе или отдельном логическом элементе.

Пример 1. Радиоприемник (рис. 38.1)

Самым подходящим первым делением схемы радиоприемника является деление на ЗЧ-секцию и ПЧ/РЧ-секцию. Сначала проверяется ЗЧ-секция: на ее вход (регулятор громкости) подается сигнал с частотой 1 кГц через разделительный конденсатор (10–50 мкФ). Слабый или искаженный сигнал, а также его полное отсутствие указывают на неисправность ЗЧ-секции. Делим теперь эту секцию на две подсекции: выходной каскад и предусилитель. Каждая подсекция проверяется, начиная с выхода. Если же ЗЧ-секция исправна, то из громкоговорителя

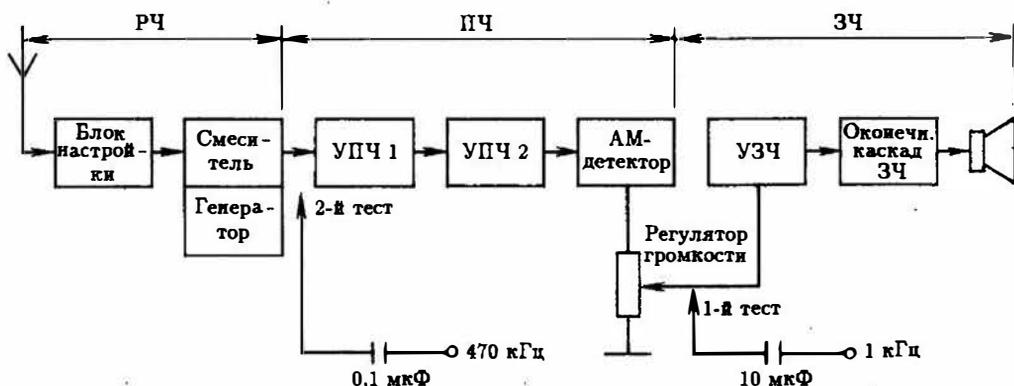


Рис. 38.1.

должен быть слышен чистый тональный сигнал (1 кГц). В этом случае неисправность нужно искать внутри ПЧ/РЧ-секции.

Очень быстро убедиться в исправности или неисправности ЗЧ-секции можно с помощью так называемого «отверточного» теста. Прикоснитесь концом отвертки к входным контактам ЗЧ-секции (предварительно установив регулятор громкости на максимальную громкость). Если эта секция исправна, будет отчетливо слышно гудение громкоговорителя.

Если установлено, что неисправность находится внутри ПЧ/РЧ-секции, следует разделить ее на две подсекции: ПЧ-секцию и РЧ-секцию. Сначала проверяется ПЧ-секция: на ее вход, т. е. на базу транзистора первого УПЧ подается амплитудно-модулированный (АМ) сигнал с частотой 470 кГц¹⁾ через разделительный конденсатор емкостью 0,01–0,1 мкФ. Для ЧМ-приемников требуется частотно-модулированный (ЧМ) тестовый сигнал с частотой 10,7 МГц. Если ПЧ-секция исправна, в громкоговорителе будет прослушиваться чистый тональный сигнал (400–600 Гц). В противном случае следует продолжить процедуру разбиения ПЧ-секции, пока не будет найден неисправный каскад, например УПЧ или детектор.

Если неисправность находится внутри РЧ-секции, то эта секция по возможности разбивается на две подсекции и проверяется следующим образом. АМ-сигнал с частотой 1000 кГц подается на вход каскада через разделительный конденсатор емкостью 0,01–0,1 мкФ. Приемник настраивается на прием радиосигнала с частотой 1000 кГц, или длиной волны 300 м в средневолновом диапазоне. В случае ЧМ-приемника, естественно, требуется тестовый сигнал другой частоты.

Можно воспользоваться и альтернативным методом проверки — *методом покаскадной проверки прохождения сигнала*. Радиоприемник включается и настраивается на какую-либо станцию. Затем, начиная от выхода устройства, с помощью осциллографа проверяется наличие или отсутствие сигнала в контрольных точках, а также соответствие его формы и амплитуды требуемым критериям для исправной системы. При поиске неисправности в каком-либо другом электронном устройстве на вход этого устройства подается номинальный сигнал.

Рассмотренные принципы динамических тестов можно применить к любому электронному устройству при условии правильного разбиения системы и подбора параметров тестовых сигналов.

Пример 2. Цифровой делитель частоты и дисплей (рис. 38.2)

Как видно из рисунка, первый тест выполняется в точке, где схема делится приблизительно на две равные части. Для изменения логического состояния сигнала на входе блока 4 применяется генератор импульсов. Светоизлучающий диод СИД на выходе должен изменять свое состояние, если фиксатор, усилитель и СИД исправны. Далее поиск неисправности следует продолжить в делителях, предшествующих блоку 4. Повторяется та же самая процедура с использованием генератора импульсов, пока не будет определен неисправный делитель. Если СИД не изменяет свое состояние в первом тесте, то неисправность находится в

¹⁾ В отечественных радиоприемниках частота 465 кГц. — *Прим. ред.*

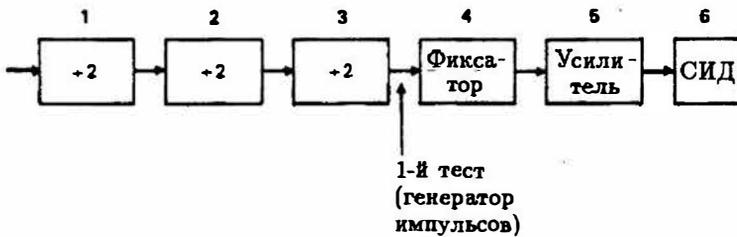


Рис. 38.2.

блоках 4, 5 или 6. Тогда сигнал генератора импульсов следует подавать на вход усилителя и т. д.

Принципы статических тестов

Эта серия тестов применяется для определения дефектного элемента в каскаде, неисправность которого установлена на предыдущем этапе проверок.

1. Начать с проверки статических режимов. Использовать вольтметр с чувствительностью не ниже 20 кОм/В.
2. Измерять только напряжение. Если требуется определить величину тока, вычислить его, измерив падение напряжения на резисторе известного номинала.
3. Если измерения на постоянном токе не выявили причину неисправности, то тогда и только тогда перейти к динамическому тестированию неисправного каскада.

Проведение тестирования однокаскадного усилителя (рис. 38.3)

Обычно номинальные значения постоянных напряжений в контрольных точках каскада известны. Если нет, их всегда можно оценить с приемлемой точностью. Сравнив реальные измеренные напряжения с их номинальными значениями, можно найти дефектный элемент. В первую очередь определяется статический режим транзистора. Здесь возможны три варианта.

1. Транзистор находится в состоянии отсечки, не вырабатывая никакого выходного сигнала, или в состоянии, близком к отсечке («уходит» в область отсечки в динамическом режиме).
2. Транзистор находится в состоянии насыщения, вырабатывая слабый искаженный выходной сигнал, или в состоянии, близком к насыщению («уходит» в область насыщения в динамическом режиме).
3. Транзистор в нормальном статическом режиме.

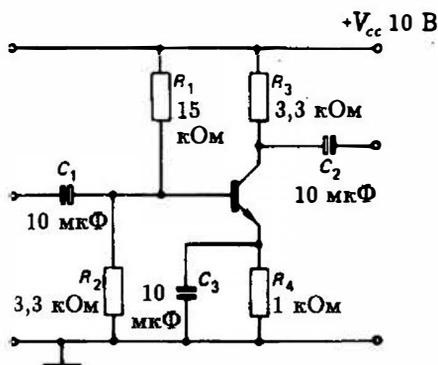


Рис. 38.3. Номинальные напряжения: $V_e = 1,1$ В, $V_b = 1,72$ В, $V_c = 5,37$ В.

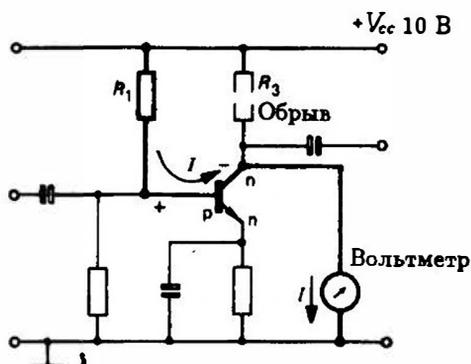


Рис. 38.4. Обрыв резистора R_3 , транзистор находится в состоянии отсечки: $V_e = 0,3$ В, $V_b = 0,94$ В, $V_c = 0,3$ В.

После того как установлен реальный режим работы транзистора, выясняется причина отсечки или насыщения. Если транзистор работает в нормальном статическом режиме, неисправность связана с прохождением переменного сигнала (такая неисправность будет обсуждаться позже).

Отсечка

Режим отсечки транзистора, т. е. прекращение протекания тока, имеет место, когда а) переход база-эмиттер транзистора имеет нулевое напряжение смещения или б) разрывается путь протекания тока, а именно: при обрыве (перегорании) резистора R_3 или резистора R_4 или когда неисправен сам транзистор. Обычно, когда транзистор находится в состоянии отсечки, напряжение на коллекторе равно напряжению источника питания V_{CC} . Однако при обрыве резистора R_3 коллектор «плавает» и теоретически должен иметь потенциал базы. Если подключить вольтметр для измерения напряжения на коллекторе, переход база-коллектор попадает в условия прямого смещения, как видно из рис. 38.4. По цепи «резистор R_1 — переход база-коллектор — вольтметр» потечет ток, и вольтметр покажет небольшую величину напряжения. Это показание полностью связано с внутренним сопротивлением вольтметра.

Аналогично, когда отсечка вызвана обрывом резистора R_4 , «плавает» эмиттер транзистора, который теоретически должен иметь потенциал базы. Если подключить вольтметр для измерения напряжения на эмиттере, образуется цепь протекания тока с прямым смещением перехода база-эмиттер. В результате вольтметр покажет напряжение, немного большее номинального напряжения на эмиттере (рис. 38.5).

В табл. 38.1 подытоживаются рассмотренные выше неисправности.

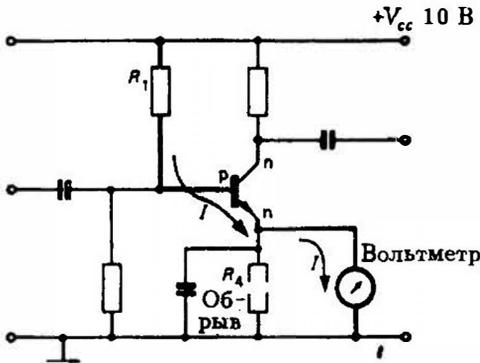


Рис. 38.5. Обрыв резистора R_4 , транзистор находится в состоянии отсечки: $V_e = 1,25$ В, $V_b = 1,74$ В, $V_c = 10$ В.

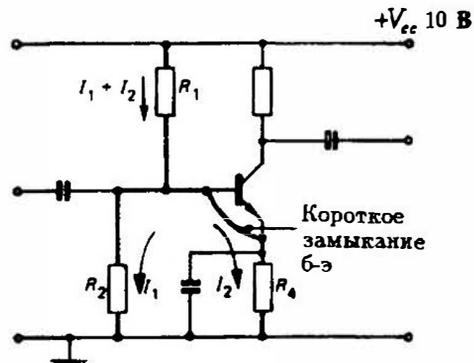


Рис. 38.6. Короткое замыкание перехода база-эмиттер, транзистор находится в состоянии отсечки: $V_e = 0,48$ В, $V_b = 0,48$ В, $V_c = 10$ В.

Отметим, что термин «высокое V_{BE} » означает превышение нормального напряжения прямого смещения эмиттерного перехода на $0,1-0,2$ В.

Неисправность транзистора также создает условия отсечки. Напряжения в контрольных точках зависят в этом случае от природы неисправности и номиналов элементов схемы. Например, короткое замыкание эмиттерного перехода (рис. 38.6) приводит к отсечке тока транзистора и параллельному соединению резисторов R_2 и R_4 . В результате потенциал базы и эмиттера уменьшается до величины, определяемой делителем

Таблица 38.1. Условия отсечки

	Неисправность		Причина
1.	V_e	0	Обрыв резистора R_1
	V_b	0	
	V_c	V_{CC}	
	V_{BE}	0	
2.	V_e	Высокое	Обрыв резистора R_4
	V_b	Нормальное	
	V_c	V_{CC}	
	V_{BE}	Низкое	
3.	V_e	Низкое ($\approx V_c$)	Обрыв резистора R_3
	V_b	Низкое	
	V_c	Низкое ($\approx V_e$)	
	V_{BE}	Нормальное	

напряжения $R_1 - R_2 \parallel R_4$. Потенциал коллектора при этом, очевидно, равен V_{CC} . На рис. 38.7 рассмотрен случай короткого замыкания между коллектором и эмиттером.

Другие случаи неисправности транзистора приведены в табл. 38.2.

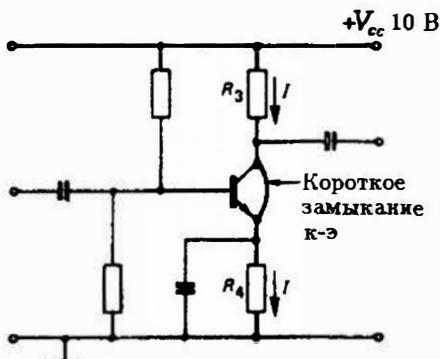


Рис. 38.7. Короткое замыкание между коллектором и эмиттером, транзистор находится в состоянии отсечки: $V_e = 2,29$ В, $V_b = 1,77$ В, $V_c = 2,29$ В.

Таблица 38.2

Неисправность			Причина
1.	V_e	0	Разрыв перехода база-эмиттер
	V_b	Нормальное	
	V_c	V_{CC}	
	V_{BE}	Очень высокое, не может быть выдержано функционирующим рп-переходом	
2.	V_e	Низкое	Разрыв перехода база-коллектор
	V_b	Низкое	
	V_c	V_{CC}	
	V_{BE}	Нормальное	

Насыщение

Как объяснялось в гл. 21, ток транзистора определяется напряжением прямого смещения перехода база-эмиттер. Небольшое увеличение этого напряжения приводит к сильному возрастанию тока транзистора. Когда ток через транзистор достигает максимальной величины, говорят, что транзистор насыщен (находится в состоянии насыщения). Потенциал

Таблица 38.3

Неисправность			Причина
1.	V_e V_b V_c	Высокое (V_c) Высокое Низкое	Обрыв резистора R_2 или мало сопротивление резистора R_1
2.	V_e V_b V_c	0 Низкое Очень низкое	Короткое замыкание конденсатора C_3

коллектора уменьшается при увеличении тока и при достижении насыщения практически сравнивается с потенциалом эмиттера (0,1–0,5 В). Вообще, при насыщении потенциалы эмиттера, базы и коллектора находятся приблизительно на одинаковом уровне (см. табл. 38.3).

Нормальный статический режим

Совпадение измеренных и номинальных постоянных напряжений и отсутствие или низкий уровень сигнала на выходе усилителя указывают на неисправность, связанную с прохождением переменного сигнала, например на внутренний обрыв в разделительном конденсаторе. Прежде чем заменять подозреваемый на обрыв конденсатор, убедитесь в его неисправности, подключая параллельно ему исправный конденсатор близкого номинала. Обрыв развязывающего конденсатора в цепи эмиттера (C_3 в схеме на рис. 38.3) приводит к уменьшению уровня сигнала на выходе усилителя, но сигнал воспроизводится без искажений. Большая утечка или короткое замыкание в этом конденсаторе обычно вносит изменения в режим транзистора по постоянному току. Эти изменения зависят от статических режимов предыдущих и последующих каскадов.

При поиске неисправности нужно помнить следующее.

1. Не делайте скоропалительных выводов на основе сравнения измеренного и номинального напряжений только в одной точке. Нужно записать весь набор величин измеренных напряжений (например, на эмиттере, базе и коллекторе транзистора в случае транзисторного каскада) и сравнить его с набором соответствующих номинальных напряжений.
2. При точных измерениях (для вольтметра с чувствительностью 20 кОм/В достижима точность 0,01 В) два одинаковых показания в разных контрольных точках в подавляющем большинстве случаев указывают на короткое замыкание между этими точками. Однако бывают и исключения, поэтому нужно выполнить все дальнейшие проверки для окончательного вывода.

Особенности диагностики цифровых схем

В цифровых устройствах самой распространенной неисправностью является так называемое «залипание», когда на выводе ИС или в узле схемы постоянно действует уровень логического 0 («константный нуль») или логической 1 («константная единица»). Возможны и другие неисправности, включая обрывы выводов ИС или короткое замыкание между проводниками печатной платы.

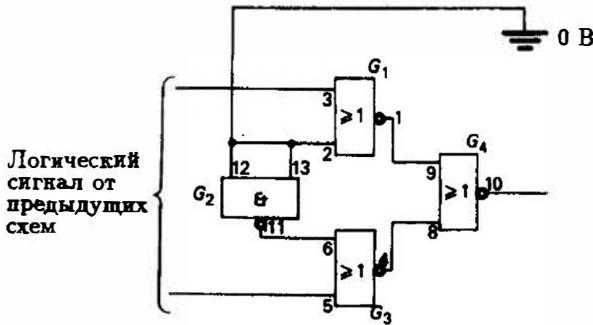


Рис. 38.8.

Диагностика неисправностей в цифровых схемах осуществляется путем подачи сигналов логического импульсного генератора на входы проверяемого элемента и наблюдения воздействия этих сигналов на состояние выходов с помощью логического пробника. Для полной проверки логического элемента «проходится» вся его таблица истинности. Рассмотрим, например, цифровую схему на рис. 38.8. Сначала записываются логические состояния входов и выходов каждого логического элемента и сопоставляются с состояниями в таблице истинности. Подозрительный логический элемент тестируется с помощью генератора импульсов и логического пробника. Рассмотрим, например, логический элемент G_1 . На его входе 2 постоянно действует уровень логического 0. Для проверки элемента щуп генератора устанавливается на выводе 3 (один из двух входов элемента), а щуп пробника — на выводе 1 (выход элемента). Обращаясь к таблице истинности элемента ИЛИ-НЕ, мы видим, что если на одном из входов (вывод 2) этого элемента действует уровень логического 0, то

Таблица истинности элемента G_1

Вывод 2	Вывод 3	Вывод 1
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

уровень сигнала на его выходе изменяется при изменении логического состояния второго входа (вывод 3). Например, если в исходном состоянии на выводе 3 действует логический 0, то на выходе элемента (вывод 1) присутствует логическая 1. Если теперь с помощью генератора изменить логическое состояние вывода 3 к логической 1, то уровень выходного сигнала изменится от 1 к 0, что и зарегистрирует пробник. Обратный результат наблюдается в том случае, когда в исходном состоянии на выводе 3 действует уровень логической 1. Аналогичные тесты можно применить к другим логическим элементам. При этих тестах нужно обязательно пользоваться таблицей истинности проверяемого логического элемента, потому что только в этом случае можно быть уверенным в правильности тестирования.

Особенности диагностики микропроцессорных систем

Диагностика неисправностей в микропроцессорной системе с шинной структурой имеет форму выборки последовательности адресов и данных, которые появляются на адресной шине и шине данных, и последующего сравнения их с хорошо известной последовательностью для работающей системы. Например, такая неисправность, как константный 0 на линии 3 (D_3) шины данных, будет указываться постоянным логическим нулем на линии D_3 . Соответствующий листинг, называемый *листингом состояния*, получается с помощью логического анализатора. Типичный листинг состояния, отображаемый на экране монитора, показан на рис. 38.9.

AQU MEM		STATE LISTING						Set-up: DEMO DATA
POS	ADDRESS	DATA	SYN	R/W	NMI	IRQ	UNUSED	
0000	111111111111100	11100000	0	1	1	1	1111	
0001	111111111111101	11111110	0	1	1	1	1111	
0002	111111011100000	10101110	1	1	1	1	1111	
0003	111111011100001	00000011	0	1	1	1	1111	
0004	111111011100010	11111000	0	1	1	1	1111	
0005	111110000000011	11111000	0	1	1	1	1111	
0006	111111011100011	11010000	0	1	1	1	1111	
0007	111111011100100	00001110	0	1	1	1	1111	
0008	111111011100101	11001010	0	1	1	1	1111	
0009	111111011100111	10100000	1	1	1	1	1111	
0010	111111011101000	10000000	0	1	1	1	1111	
0011	111111011101001	10100010	1	1	1	1	1111	
0012	111111011101100	00001001	0	1	1	1	1111	
0013	111111011101101	10010100	0	1	1	1	1111	
0014	111111011101100	00001110	0	1	1	1	1111	
0015	000000000001110	10000000	0	1	1	1	1111	

RUN STATUS			SINGLE MODE	STOPPED	TRIGGERED		
Inputs : 111110010101100 00000000 0 1 1 1 1101							
SINGLE REPEAT MONITOR CMD RPT FAST ROLL SLOW ROLL INFO EXIT							

Рис. 38.9.

Как альтернатива может использоваться сигнатурный анализатор для сбора потока битов, называемого сигнатурой, в некотором узле схемы и сравнения его с эталонной сигнатурой. Различие этих сигнатур указывает на неисправность.

Примеры поиска неисправностей

В каждом примере описаны условия проявления отдельных неисправностей. Предполагается, что в каждом случае неисправность обусловлена дефектом одного элемента схемы, но данная неисправность схемы может быть связана с несколькими элементами. Все потенциалы измеряются в вольтах относительно шасси с помощью вольтметра с чувствительностью 20 кОм/В.

1. Усилитель постоянного тока (рис. 38.10)

Контрольная точка	1	2	3	4
Номинальное напряжение	0,7	0,1	5,1	4,5
Неисправность А (нет выходного сигнала)	0	0	8,65	8
Неисправность В (нет выходного сигнала)	0,01	0,01	8,4	7,75
Неисправность С (нет выходного сигнала)	0,48	0	0,02	0
Неисправность D (нет выходного сигнала)	0,7	0,1	5,1	4,7

Неисправность А

Транзистор T_1 в состоянии отсечки, $V_e = 0$, $V_c = V_{CC}$. Отсечка обусловлена нулевым напряжением на базе этого транзистора (контрольная точка 1). Так как между двумя транзисторами существует непосредственная связь по постоянному току, напряжение на базе транзистора T_2 увеличивается вместе с увеличением напряжения на коллекторе транзистора T_1 , что приводит к насыщению транзистора T_2 .

Ответ: обрыв резистора R_1 .

Неисправность В

Транзистор T_1 в состоянии отсечки. Напряжения в контрольных точках 1 и 2 равны, что наводит на мысль о наличии короткого замыкания. Эти напряжения определяются резисторным делителем, составленным из резистора R_1 (1,6 МОм), включенного последовательно с параллельной парой резисторов R_2 (70 кОм)

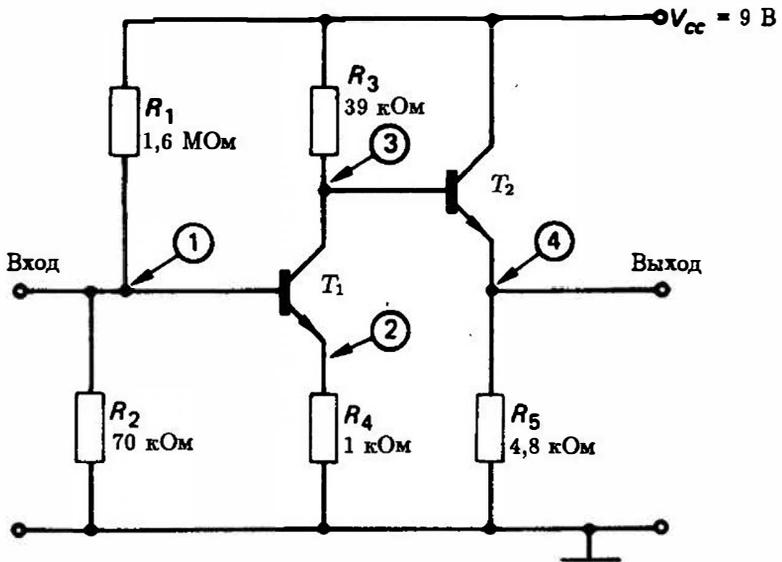


Рис. 38.10.

и R_4 (1 кОм). Как и в случае неисправности А, транзистор T_2 находится в состоянии насыщения.

Ответ: короткое замыкание перехода база–эмиттер транзистора T_1 .

Неисправность С

Оба транзистора в состоянии отсечки. Напряжение на эмиттере транзистора T_2 равно нулю (контрольная точка 4). Низкое напряжение на коллекторе транзистора T_1 указывает на насыщение транзистора, в то время как напряжение на его базе (контрольная точка 2) равно нулю. Такая ситуация соответствует отсечке транзистора в результате обрыва резистора в цепи коллектора. Понижение напряжения на базе транзистора T_1 (относительно номинального значения) связано с протеканием большого базового тока через резистор R_1 (1,6 МОм).

Ответ: обрыв резистора R_3 .

Неисправность D

Транзистор T_1 работает в нормальном статическом режиме. Насыщение транзистора T_2 привело бы к высокому напряжению на его эмиттере. Поскольку напряжение на эмиттере близко к номинальному, а выходной сигнал отсутствует, транзистор T_2 должен находиться в состоянии отсечки. Повреждение транзистора, например внутренний обрыв перехода база–эмиттер, привело бы к нулевому напряжению на эмиттере. При внутреннем обрыве коллекторного перехода

напряжение на эмиттере было бы очень мало. Неисправность может быть обусловлена только обрывом резистора R_5 .

Ответ: обрыв резистора R_5 .

2. Двухкаскадный усилитель с RC-связью на полевых транзисторах (рис. 38.11)

Контрольная точка	1	2	3	4	5	6
Номинальное напряжение	15	2,4	5,55	0	3,3	12,75
Неисправность А (нет выходного сигнала)	15	0	0	0	3,3	12,75
Неисправность В (нет выходного сигнала)	15	2,4	5,55	5,55	7,5	9,9
Неисправность С (нет выходного сигнала)	15	2,4	5,55	0	4,1	15
Неисправность D (нет выходного сигнала)	15	2,4	5,55	0	6,1	10,8
Неисправность E (низкий уровень выходного сигнала)	15	2,4	5,55	0	3,3	12,75

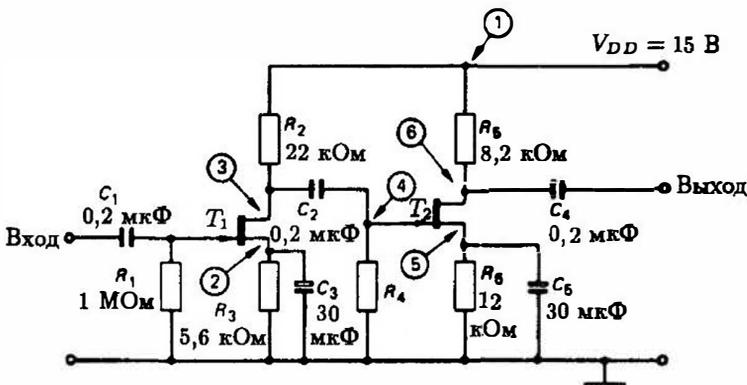


Рис. 38.11.

Неисправность А

Транзистор T_1 в состоянии отсечки. Транзистор T_2 в нормальном режиме. Нулевое напряжение на стоке и истоке наводит на мысль об обрыве резистора R_2 . Заметим, что при обрыве резистора R_3 было бы получено высокое значение истокового напряжения.

Ответ: обрыв резистора R_2 .

Неисправность В

Транзистор T_1 в нормальном режиме. Транзистор T_2 насыщен (высокое напряжение на истоке–стоке). Полевой транзистор может перейти в состояние насыщения при уменьшении напряжения обратного смещения затвор–исток V_{GS} . В случае полевого транзистора с каналом n -типа, используемого в данной схеме, это может произойти или при уменьшении абсолютной величины напряжения на затворе (приближении потенциала затвора к потенциалу истока с уменьшением падения напряжения V_{GS}), или при удалении резистора утечки затвора (см. также неисправность D). Измерения в контрольных точках 3 и 4 указывают на короткое замыкание конденсатора C_2 . Это приводит к увеличению напряжения на затворе транзистора T_2 с соответствующим уменьшением напряжения обратного смещения и увеличением тока через транзистор.

Ответ: короткое замыкание конденсатора C_2 .

Неисправность С

Транзистор T_1 в нормальном режиме. Напряжение на стоке транзистора T_2 равно напряжению источника питания (15 В), что указывает на отсечку этого транзистора. Увеличение напряжения на истоке (контрольная точка 5) указывает на обрыв резистора R_6 . Заметим, что неисправность транзистора, связанная с внутренним обрывом перехода, приводила бы к отсечке, но одновременно и к нулевому напряжению на истоке.

Ответ: обрыв резистора R_6 .

Неисправность D

Транзистор T_1 в нормальном режиме. Транзистор T_2 насыщен (высокое напряжение на истоке и стоке). Поскольку напряжение на затворе остается равным нулю, насыщение связано с обрывом резистора утечки затвора, что приводит к потере обратного смещения и увеличению тока стока.

Ответ: обрыв резистора R_4 .

Неисправность E

Все напряжения по постоянному току в схеме соответствуют номинальным значениям. Следовательно, неисправность связана с прохождением переменного тока. Низкий уровень выходного сигнала указывает на обрыв развязывающего конденсатора в цепи истока, что приводит к появлению отрицательной обратной связи по переменному току и уменьшению коэффициента усиления схемы.

Ответ: обрыв конденсатора C_3 или C_5 .

3. Стабилизированный источник питания (рис. 38.12)

Примечание. Всегда начинайте с измерения опорного напряжения стабилитрона. Низкое или нулевое падение напряжения на стабилитроне указывает на то, что стабилитрон не находится в области пробоя. Это

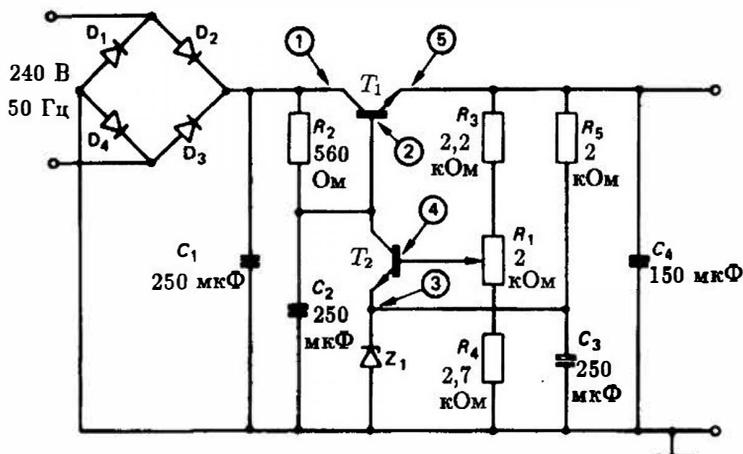


Рис. 38.12.

Контрольная точка	1	2	3	4	5
Номинальное напряжение	18	14,1	8,75	9,35	13,3
Неисправность А	19,5	2,65	0	0,7	2,0
Неисправность В	19,8	13,5	8,75	9,35	13,5
Неисправность С	20	20	8,65	0	19,3
Неисправность D	19,5	0	0	0	0
Неисправность E	20	20	0	0	0

может быть связано либо с неисправностью самого стабилитрона, либо с повреждением резистора, определяющего ток стабилитрона (резистор R_5 в схеме на рис. 38.12).

Неисправность А

Опорное напряжение стабилитрона равно нулю, что указывает на короткое замыкание между контрольной точкой 3 и шасси. Заметим, что обрыв резистора R_5 не привел бы к нулевому показанию вольтметра в точке 3, так как внутреннее сопротивление вольтметра дополнило бы эмиттерную цепь транзистора T_2 и прибор показал бы падение напряжения.

Ответ: короткое замыкание стабилитрона Z_1 или конденсатора C_3 .

Неисправность В

Стабилитрон работает. Контрольные точки 2 и 5 имеют одинаковые потенциалы, что указывает на короткое замыкание. Транзистор T_1 находится в состоянии

отсечки, поэтому увеличилось напряжение на его коллекторе (в контрольной точке 1).

Ответ: короткое замыкание эмиттерного перехода транзистора T_1 .

Неисправность С

Падение напряжения на стабилитроне на 0,1 В меньше номинального напряжения стабилизации. Это указывает на то, что стабилитрон находится в рабочей области (области пробоя), но получает недостаточный ток. Причиной такой ситуации является отсечка транзистора T_2 (на его коллекторе 20 В). Отсечка связана с нулевым напряжением на базе этого транзистора, что указывает на обрыв в цепи смещения.

Ответ: обрыв резистора R_3 или верхней части потенциометра R_1 .

Неисправность D

Нулевое напряжение на стабилитроне обусловлено нулевым напряжением в контрольной точке 5. Транзистор T_2 находится в состоянии отсечки (на его базе и эмиттере нулевое напряжение). В контрольной точке 1 измеренное напряжение почти соответствует номинальному напряжению, однако на коллекторе транзистора T_2 все же 0 В. Это указывает на неисправность элементов R_2 или C_2 .

Ответ: обрыв резистора R_2 или короткое замыкание конденсатора C_2 .

Неисправность E

Нулевое напряжение на стабилитроне обусловлено нулевым напряжением в контрольной точке 5. Напряжение на эмиттерном переходе транзистора T_1 равно разности напряжений в контрольных точках 2 и 5: $20 - 0 = 20$ В. Хорошо известно, что *pn*-переход не может поддерживать прямое напряжение смещения, превышающее 0,7 В.

Ответ: обрыв эмиттерного перехода транзистора T_1 .

4. Выходной каскад (рис. 38.13)

Примечание. Следует начать с проверки напряжения в контрольной точке 4, где номинальное значение напряжения приблизительно равно $0,5V_{CC}$. Если измеренное напряжение больше, то транзистор T_3 имеет более высокую проводимость, чем транзистор T_2 , и наоборот.

Неисправность A

В контрольной точке 4 действует полное напряжение источника питания V_{CC} . Транзистор T_3 насыщен, а транзистор T_2 находится в состоянии отсечки. Кол-

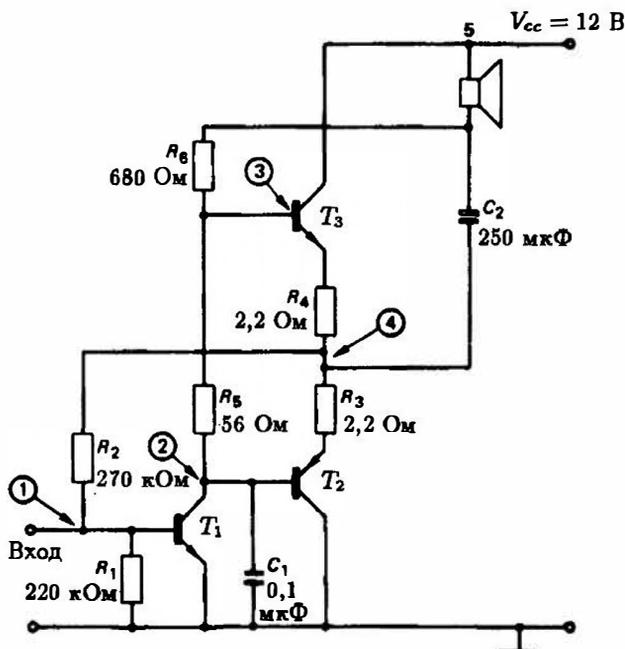


Рис. 38.13.

Контрольная точка	1	2	3	4	5
Номинальное напряжение	0,61	6,3	6,7	6,45	12
Неисправность А (нет выходного сигнала)	0	12	12	12	12
Неисправность В (нет выходного сигнала)	0,19	0	0,79	1,09	12
Неисправность С (очень низкий выходной сигнал)	0,4	1,1	1,08	1,08	12
Неисправность D (нет выходного сигнала)	0,61	5,85	6,22	6,0	12

лектор T_1 (контрольная точка 2) находится под напряжением V_{CC} , что указывает на отсечку этого транзистора. Напряжение на базе T_1 равно нулю, следовательно, неисправна цепь смещения.

Ответ: обрыв резистора R_2 .

Неисправность В

Контрольная точка 2 имеет нулевой потенциал, что указывает на возможное короткое замыкание на шасси. Такое короткое замыкание приводит к очень сильному прямому смещению эмиттерного перехода транзистора T_2 , зарядке

конденсатора C_2 и уменьшению напряжения в контрольной точке 4. Низкое напряжение на базе T_1 связано с низким напряжением в контрольной точке 4.

Ответ: короткое замыкание коллекторного перехода транзистора T_2 или конденсатора C_1 .

Неисправность С

Напряжение в контрольной точке 4 существенно меньше номинального напряжения. Конденсатор C_2 заряжается через транзистор T_2 , проводимость которого выше, чем в нормальном режиме, из-за низкого напряжения на его базе (контрольная точка 2). Низкий потенциал контрольной точки 2 не связан с насыщением T_1 . Заметим, что напряжение прямого смещения V_{BE} этого транзистора составляет всего 0,4 В вместо номинального значения 0,61 В. Таким образом, T_1 должен находиться в состоянии отсечки в результате обрыва резистора в цепи коллектора. Отсечка не полная: транзистор T_1 проводит ток, который протекает через эмиттерный переход транзистора T_2 и заряжает конденсатор C_2 , что приводит к уменьшению напряжения в контрольной точке 4 до 1,08 В.

Потенциал базы T_3 равен потенциалу коллектора T_1 , поскольку через резистор R_5 не протекает ток. Транзистор T_3 находится в состоянии отсечки.

Ответ: обрыв резистора R_6 .

Неисправность D

Измеренные значения напряжений приблизительно совпадают с номинальными значениями. Следовательно, неисправность связана с прохождением переменного тока. Обрыв конденсатора C_2 мог бы привести к небольшому уменьшению напряжения в контрольной точке 4 относительно номинального значения, так как баланс между двумя выходными транзисторами T_2 и T_3 больше не поддерживается за счет заряда на конденсаторе C_2 .

Ответ: обрыв конденсатора C_2 .

5. Бистабильный мультивибратор (рис. 38.14)

В контрольных точках схемы должны действовать следующие номинальные значения напряжений:

Контрольная точка	1	2	3	4	5
Состояние I (транзистор T_1 закрыт)	1,1	0,45	18,5	1,3	1,2
Состояние II (транзистор T_1 открыт)	1,1	1,3	1,2	0,45	18,5

В каждом из следующих случаев сигнал на выходе не изменяется при подаче на вход мультивибратора входного импульса.

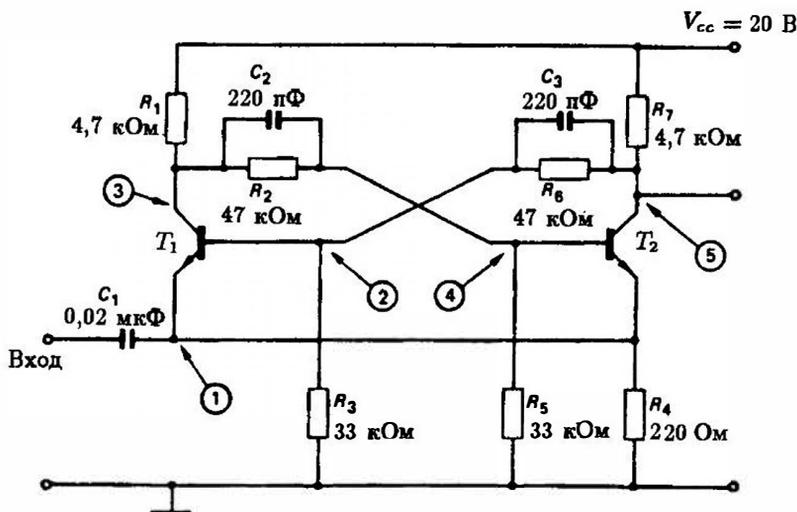


Рис. 38.14.

Контрольная точка	1	2	3	4	5
Неисправность А	0,95	0,95	18,5	1,6	1,0
Неисправность В	0,95	0	18,5	1,6	1,0
Неисправность С	0,1	0,7	0,1	0,05	18,5
Неисправность D	1,1	0,45	18,5	1,3	1,2
Неисправность E	7,7	8,0	19,0	8,0	19,0

Примечание. Бистабильный мультивибратор имеет два устойчивых состояния, в которых он может находиться, и, следовательно, два возможных набора номинальных напряжений в точках схемы. При локализации неисправности сначала определяется состояние каждого транзистора, затем измеренные напряжения сравниваются с номинальными напряжениями для определения причины отсутствия переключения из одного состояния в другое.

Неисправность А

Транзистор T_1 закрыт (отсечка), транзистор T_2 открыт (насыщение). Напряжение V_{BE} для транзистора T_1 равно нулю, что указывает на короткое замыкание между его базой и эмиттером. Напряжение в контрольной точке 1 (0,95 В) в этом случае определяется падением напряжения на резисторе R_4 .

Ответ: короткое замыкание эмиттерного перехода транзистора T_1 .

Неисправность В

Транзистор T_1 закрыт, транзистор T_2 открыт. Нулевое напряжение на базе транзистора T_1 указывает на неисправность цепи смещения $R_6 - R_3$.

Ответ: обрыв резистора R_6 .

Неисправность С

Транзистор T_2 в состоянии отсечки. Кажется, что транзистор T_1 насыщен; однако низкое напряжение на эмиттере (0,1 В в контрольной точке 1) указывает на отсечку из-за обрыва коллекторного резистора R_1 . Измеряемое напряжение на коллекторе транзистора T_1 (контрольная точка 3) обусловлено внутренним сопротивлением вольтметра, а измеряемое напряжение на эмиттере (контрольная точка 1) — большим базовым током, протекающим через прямосмещенный эмиттерный переход транзистора T_1 .

Ответ: обрыв резистора R_1 .

Неисправность D

Все постоянные напряжения в норме. Неисправность связана с переменным током.

Ответ: обрыв конденсатора C_1 .

Неисправность E

Показания вольтметра одинаковы для обоих транзисторов (оба в состоянии отсечки). Следовательно, неисправность должна быть общей для обоих транзисторов. Резистор R_4 — единственный общий элемент, влияющий на режим схемы по постоянному току. Показание вольтметра в контрольной точке 1 обусловлено его внутренним сопротивлением.

Ответ: обрыв резистора R_4 .

6. Цифровая схема (рис. 38.15)

Описание схемы. Схема на рис. 38.15 является частью светового контроллера нагрузки линии передачи. Импульсы, поступающие на вход этой схемы, подсчитываются двоичным счетчиком на микросхеме ИС 5, который является делителем на 5, как видно из таблицы состояний его выходов. Сигналы, снимаемые с трех выходов ИС 5, выхода С (вывод 8), выхода В (вывод 9) и выхода А (вывод 12), формируют двоичный код, соответствующий определенной функции рассматриваемой системы. Например, когда состояние выходов СВА счетчика соответствует двоичной комбинации 000, зажигается ЖЕЛТЫЙ светодиод, а ЗЕЛЕНЫЙ и КРАСНЫЙ светодиоды погашены. В состоянии 011 зажигаются ЖЕЛТЫЙ и

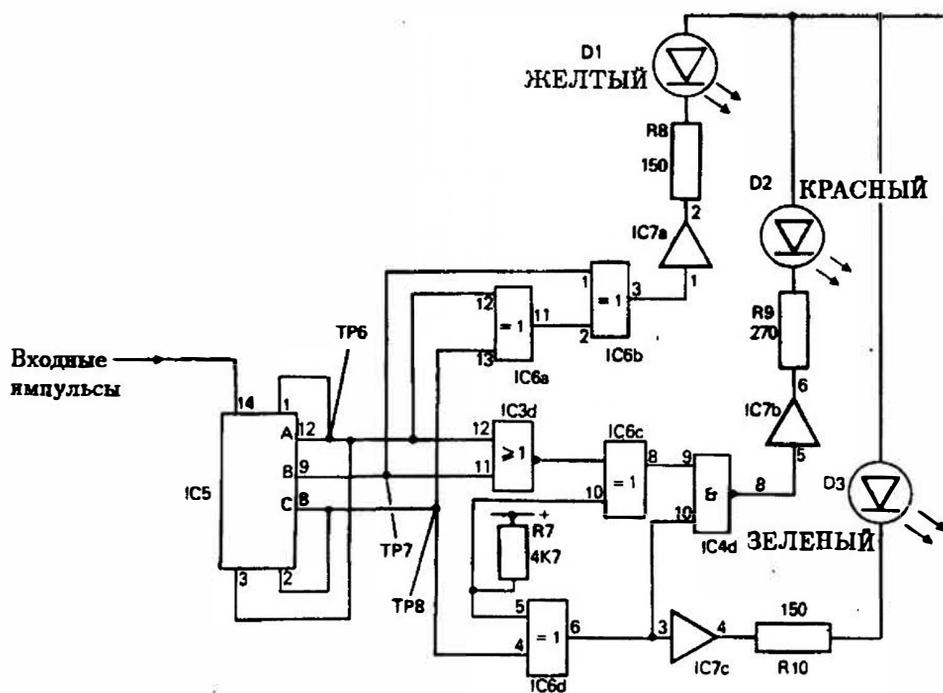


Рис. 38.15.

Таблица состояний выходов микросхемы ИС5

С	В	А	Активный выход
0	0	0	Желтый
0	0	1	Красный
0	1	0	Красный
0	1	1	Красный/желтый
1	0	0	Зеленый

КРАСНЫЙ светодиода, а ЗЕЛЕНый погашен и т. д. Счетчик сбрасывается в исходное состояние 000 после зажигания ЗЕЛЕНОГО светодиода. Комбинационные логические схемы, следующие за счетчиком, образуют схему управления зажиганием светодиодов. Микросхемы ИС 7а, ИС 7б, ИС 7с — буферные усилители тока.

Исходя из описанного ниже признака неисправности и измеренных логических состояний на выводах микросхем, установить причину неисправности схемы.

Признак неисправности: не зажигается **ЗЕЛЕНЫЙ** светодиод

При проверке функционирования схемы путем подачи на вход отдельных импульсов с выхода логического импульсного генератора в соответствующих узлах схемы были зарегистрированы логические состояния микросхем ИС5, ИС6d, ИС7с. Все показания сняты с помощью логического пробника.

Выводы	ИС 5			ИС 6d			ИС 7с	
	С	В	А	4	5	6	3	4
	0	0	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	0	1	1	1	1
	0	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	0	1	1	1	1
	0	0	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	0	1	1	1	1

Ответ. По состояниям выходов ИС 5 видно, что «зеленая» двоичная последовательность 100 отсутствует, поэтому на выводах 3 и 4 ИС 7с действует уровень логической 1, удерживающий **ЗЕЛЕНЫЙ** светодиод в выключенном состоянии. Неисправность — константный 0 на выходе С счетчика ИС 5. Счетчик сбрасывается в состояние 000 сразу же после «красно-желтой» комбинации.

Возможная неисправность: константный 0 на выводе 8 или выводе 2 счетчика ИС 5.

Проверка элементов схем

Проверка элементов электронных схем обычно осуществляется с помощью омметра. Сопротивление элемента измеряется и сравнивается с сопротивлением исправного элемента.

Резисторы и катушки индуктивности

Сопротивление резистора или катушки индуктивности может быть измерено точно, что позволяет судить о характере неисправности тестируемого элемента. Резисторы имеют тенденцию к увеличению своего сопротивления или к внутреннему обрыву и очень редко вызывают короткое замыкание в цепи. Катушки индуктивности (и трансформаторы) могут замкнуть цепь накоротко, что легко установить с помощью омметра. В них могут также образовываться короткозамкнутые витки (т. е. возникать короткое замыкание между витками). Это довольно распространенная неисправность, но ее трудно обнаружить с помощью омметра. Возможно также короткое замыкание обмотки на сердечник; найти такую неисправность не составляет труда.

Конденсаторы

Неисправность конденсатора может быть связана с внутренним обрывом, коротким замыканием или утечкой. Короткое замыкание или утечка (т. е. низкое сопротивление) легко обнаруживаются с помощью омметра. Более трудно установить наличие обрыва. Когда выводы омметра подсоединяются к выводам конденсатора, батарея омметра начинает заряжать конденсатор. В случае конденсатора большой емкости стрелка омметра резко отклоняется к нулевому показанию и затем, по мере заряда конденсатора, медленно возвращается к положению, соответствующему бесконечному сопротивлению. Если этого не происходит, имеется обрыв. Однако конденсатор малой емкости будет заряжаться настолько быстро, что измерительный прибор не сможет зарегистрировать процесс зарядки.

Электролитические конденсаторы могут быть проверены на внутренний обрыв, поскольку они имеют большую емкость и обычно большой ток утечки. Прибор показывает низкое сопротивление (несколько сотен килоом) при подключении конденсатора к омметру в правильной полярности.

Конденсаторы могут изменять свою емкость в больших пределах. Для обнаружения этой неисправности необходимо измерять емкость мостовым методом.

Диоды

Проверка полупроводниковых устройств обычно включает измерения прямого и обратного сопротивлений pn -перехода. В случае диода омметр сначала подключается, как показано на рис. 38.16(а): отрицательным выводом к аноду диода и положительным — к его катоду. При этом диод будет смещен в обратном направлении, и омметр покажет очень высокое сопротивление (МОм). Затем полярность подключения меняется на обратную (рис. 38.16(б)), и диод смещается в прямом направлении. Омметр регистрирует низкое прямое сопротивление pn -перехода (600–1000 Ом при измерении прибором с подвижной катушкой и несколько ом при измерении электронным или цифровым вольтметром). Если в обоих направлениях регистрируется низкое сопротивление, то диод, вероятно, неисправен (короткое замыкание).

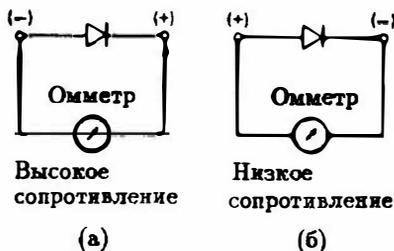


Рис. 38.16. Проверка диода.

Омметр можно также использовать для определения выводов диода — анода или катода. Когда омметр показывает низкое сопротивление (прямое смещение), как показано на рис. 38.16(б), полярность подключения омметра совпадает с полярностью диода, т. е. положительный (черный) вывод подключен к аноду, а отрицательный (красный) вывод — к катоду.

Биполярные транзисторы

Биполярный транзистор состоит из двух pn -переходов, которые проверяются каждый в отдельности, т. е. так же, как переход диода. Прямое и обратное сопротивления эмиттерного и коллекторного переходов измеряются отдельно. Показания омметра должны быть того же порядка, как и для обычного диода. Проверяется также сопротивление между коллектором и эмиттером, которое должно иметь очень большую (мегаомы) или бесконечную величину в обоих направлениях.

Полевые транзисторы с управляющим pn -переходом

Для измерения сопротивления обоих переходов, а также сопротивления самого канала используется омметр. Исправный полевой транзистор должен иметь следующие величины сопротивлений.

- Сток–затвор
(прямое смещение) низкое сопротивление (40 Ом).
- Сток–затвор
(обратное смещение) очень большое (мегаомы).
- Затвор–исток
(прямое смещение) низкое сопротивление (40 Ом).
- Затвор–исток
(обратное смещение) очень большое (мегаомы).
- Сток–исток или сопротивление канала
(в обоих направлениях) низкое сопротивление (100 Ом).

Тиристоры

Как прямое, так и обратное сопротивление между анодом и катодом очень велико. Переключение тиристора в проводящее состояние можно зарегистрировать, подключая омметр в прямом направлении, как показано на рис. 38.17. Если в этой схеме управляющий электрод тиристора коротить с анодом, потечет ток управляющего электрода, который переключит тиристор в проводящее состояние. В результате омметр покажет низкое сопротивление (несколько сотен ом). Это показание омметра не изменится, если устранить короткое замыкание между анодом и управляющим электродом.



Рис. 38.17. Проверка тиристора.

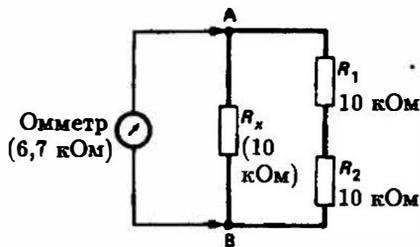


Рис. 38.18. Влияние шунтирования при внутрисхемном измерении сопротивления.

Внутрисхемный контроль

Всегда целесообразно проверить подозрительный элемент, пока он остается в схеме. Если неисправность подтверждается, тогда можно заменить этот элемент. Такие проверки осуществляются с помощью омметра и обычно называются *проверками цепи на обрыв*. При проведении внутрисхемных измерений нужно принять меры для минимизации шунтирующего влияния других компонентов схемы или учесть это влияние.

Внутрисхемное измерение сопротивления

Рассмотрим схему на рис. 38.18, где R_x — полное сопротивление элемента, включенного между точками А и В, которое нужно измерить. Кроме того, имеется параллельный участок цепи с сопротивлением $R_1 + R_2 = 10 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм} = 20 \text{ кОм}$, по которому может протекать ток омметра и наличие которого приводит к уменьшению показаний омметра относительно реальной величины сопротивления R_x проверяемого элемента. Если элемент исправен, то омметр покажет сопротивление

$$\frac{10 \cdot 20}{10 + 20} = \frac{200}{30} = 6,67 \text{ кОм}.$$

При обрыве R_x омметр показал бы только величину шунтирующего сопротивления, т. е. 20 кОм.

В схеме на рис. 38.18 шунтирующее сопротивление сравнимо с сопротивлением проверяемого элемента. Следовательно, его влияние нужно принять во внимание. В схеме на рис. 38.19 $R_x = 220 \text{ Ом}$. Величина шунтирующего сопротивления (20 кОм) в 100 раз больше, чем сопротивление проверяемого элемента. В этом случае влиянием шунтирования можно пренебречь.

В тех случаях, когда сопротивление подозреваемого элемента существенно больше, чем полное сопротивление шунтирующей цепи (рис. 38.20), внутрисхемная проверка становится бесполезной. Омметр

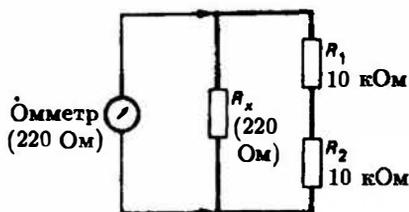


Рис. 38.19. Влияние шунтирования при внутрисхемном измерении сопротивления.

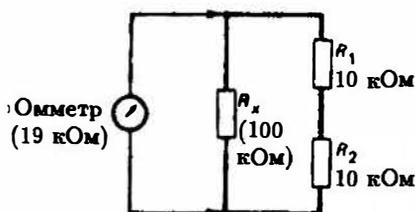


Рис. 38.20. Влияние шунтирования при внутрисхемном измерении сопротивления.

покажет сопротивление, приблизительно равное сопротивлению шунтирующей цепи. Для схемы на рис. 38.20

$$\text{Показание омметра} = \frac{100 \cdot 20}{100 + 20} = \frac{2000}{120} = 19 \text{ кОм.}$$

Отметим, что значение сопротивления исследуемого элемента, зарегистрированное прибором, всегда будет или равно, или меньше, но ни в коем случае не больше (из-за шунтирования), чем его реальное значение. Если зарегистрировано большее сопротивление, значит, этот элемент либо увеличил свое сопротивление, либо имеется разрыв цепи.

Во многих случаях шунтирующая цепь может включать *pn*-переход диода, а также эмиттерный или коллекторный переходы транзистора. На рис. 38.21 показан простой однокаскадный транзисторный усилитель. Предположим, что для проверки резистора R_2 положительный вывод омметра подключен к базе транзистора, а отрицательный — к шасси. Эмиттерный переход получает прямое смещение от батареи омметра, и образуется шунтирующая цепь (включая резистор R_4) с низким сопротивлением, как показано на рис. 38.21(а). В результате омметр покажет недостоверное значение сопротивления. Если изменить полярность под-

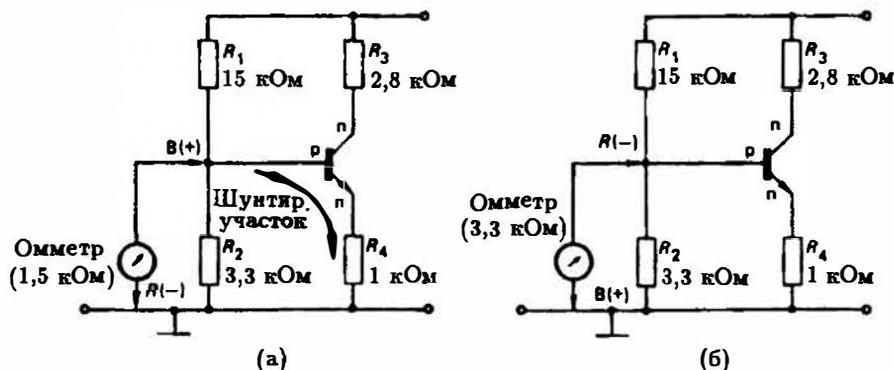


Рис. 38.21. Влияние шунтирования при внутрисхемном измерении сопротивления.

ключения выводов омметра: отрицательный вывод — к базе, а положительный — к шасси, как показано на рис. 38.21(б), то эмиттерный переход будет смещен в обратном направлении. Шунтирующая цепь теперь образована очень высоким обратным сопротивлением эмиттерного перехода (более 500 кОм) и последовательным резистором R_4 . В этом случае влияние шунтирующей цепи с таким высоким сопротивлением пренебрежимо мало.

Итак, при внутрисхемном измерении сопротивления выводы омметра следует подсоединять так, чтобы pn -переходы, которые могут образовать шунтирующую параллельную цепь, были смещены в обратном направлении. Это снижает влияние шунтирующих цепей. На практике снимают два отдельных показания омметра при его включении в том и другом направлениях. *Более высокое показание всегда является более точным.*

Катушки индуктивности

Катушки индуктивности (или трансформаторы) имеют очень малое сопротивление. Следовательно, только шунтирующая цепь с очень низким сопротивлением может оказать заметное влияние на точность показаний омметра.

Конденсаторы

Утечка может быть установлена и подтверждена внутрисхемной проверкой с помощью омметра только в том случае, если сопротивление шунтирующей цепи рассчитано с достаточно высокой точностью. При проверке электролитических конденсаторов следует соблюдать полярность подключения выводов омметра к конденсатору.

Диоды и транзисторы

При проверке подозреваемых на неисправность диодов или транзисторов измеряются прямое и обратное сопротивления переходов. Сопротивление переходов в прямом направлении мало, поэтому влияние шунтирующей цепи незначительно. Например, прямое сопротивление коллекторного перехода транзистора в схеме на рис. 38.21 составляет приблизительно 400 Ом. В обратном направлении сопротивление перехода очень велико, и омметр будет показывать главным образом сопротивление шунтирующей цепи. При измерении обратного сопротивления коллекторного перехода транзистора на рис. 38.21 омметр покажет сопротивление, равное примерно $R_3 + R_1 = 2,8 \text{ кОм} + 15 \text{ кОм} = 17,8 \text{ кОм}$.

Отметим, что при внутреннем обрыве перехода как прямое, так и обратное сопротивления будут одинаковыми (17,8 кОм при обрыве коллекторного перехода транзистора в схеме на рис. 38.21).

Упражнения II

По материалам глав 20–38. Ответы см. в приложении 7 в конце книги.

- Обратное сопротивление германиевого диода равно 2 МОм при температуре окружающей среды 25°C. Если эта температура поднимется до 70°C, обратное сопротивление будет примерно равно
 - 1 кОм,
 - 100 кОм,
 - 2 МОм,
 - 5 МОм.
- Рассмотрим схему на рис. 39.1. Если D_1 — кремниевый диод, то предполагаемое напряжение между точками А и В будет
 - 0 В,
 - 0,3 В,
 - 0,6 В,
 - 5 В.
- Снова обратимся к схеме на рис. 39.1. Падение напряжения на резисторе R_1 равно
 - 0 В,
 - 0,6 В,
 - 5 В,
 - 10 В.
- Рассмотрим схему на рис. 39.2. Если среднеквадратическое значение напряжения в сети равно 240 В, то амплитуда обратного напряжения на каждом диоде приблизительно равна
 - 170 В,
 - 240 В,
 - 350 В,
 - 700 В.
- Анодный ток однооперационного триодного тиристора может быть выключен, если подать

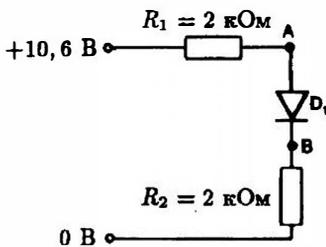


Рис. 39.1.

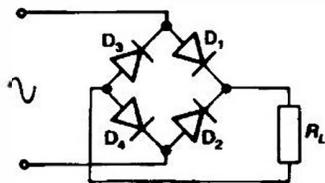


Рис. 39.2.

- а) отрицательное напряжение на затвор,
- б) положительное напряжение на затвор,
- в) отрицательное напряжение на катод,
- г) отрицательное напряжение на анод.

6. Рассмотрим схему на рис. 39.3. Ток через стабилитрон равен

- а) 20 мА, б) 18 мА, в) 2 мА, г) 0.

7. Снова обратимся к схеме на рис. 39.3. Если сопротивление нагрузочного резистора R увеличится до 10 кОм, то ток через стабилитрон

- а) уменьшится на 1 мА,
- б) останется прежним,
- в) увеличится на 1 мА,
- г) увеличится на 2 мА.

8. В цепи, состоящей из последовательно соединенных L , R и C , ток достигнет максимального значения, когда

- а) величины L и C равны,
- б) величины X_L и X_C равны,
- в) X_L имеет наибольшую величину,
- г) R имеет наибольшую величину.

9. Линия передачи имеет потери 6 дБ. Если передаваемый по линии сигнал на ее входе имеет величину 1 В, то напряжение на другом конце линии составит

- а) 1/6 В, б) 1/3 В, в) 1/2 В, г) 1 В.

10. На рис. 39.4 изображена основная схема расщепителя фаз. Отношение величин R_1 и R_2 в ней должно быть

- а) 1 : 2, б) 1 : 1, в) 2 : 1, г) 6 : 1.

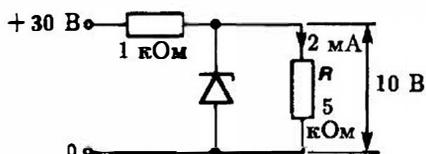


Рис. 39.3.

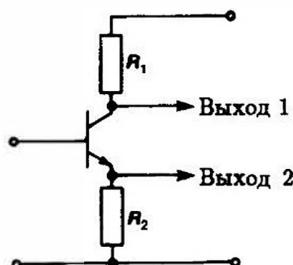
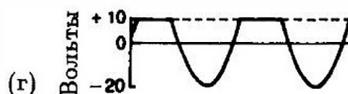
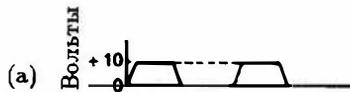


Рис. 39.4.

11. Если настраиваемую нагрузку усилителя радиочастоты (УВЧ) зашунтировать сопротивлением, то в результате увеличится
- коэффициент усиления усилителя,
 - ширина полосы частот усилителя,
 - избирательность усилителя,
 - частота настройки усилителя.
12. Амплитудно-частотная характеристика усилителя в области низких частот значительно улучшится, если связь выполнена с помощью
- резистора и конденсатора,
 - трансформатора,
 - дросселя и конденсатора,
 - непосредственного соединения.
13. Если типовой бытовой радиоприемник настроен на частоту 1100 кГц и имеет промежуточную частоту 470 кГц, то частота гетеродина составляет
- 470 кГц, б) 1100 кГц, в) 1570 кГц, г) 10 МГц.
14. Рассмотрим схему на рис. 39.5. Если считать, что диод идеальный, то сигнал на выходе схемы имеет форму



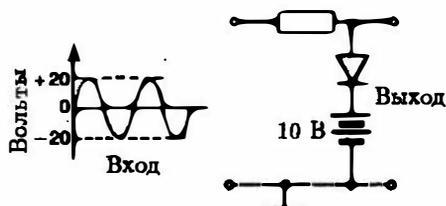


Рис. 39.5.



Рис. 39.6.

15. Рассмотрим схему на рис. 39.6. Двоичный счетчик установлен в нулевое состояние. После подачи на вход одиннадцати импульсов на выходе счетчика будет состояние

Выходы

4 3 2 1

- а) 1 0 1 1
 б) 1 1 0 0
 в) 1 1 0 1
 г) 0 0 0 1

16. Двоичный счетчик, построенный только на бистабильных элементах, должен считать до 12 импульсов. Для этого минимальное число бистабильных элементов, входящих в состав счетчика, должно быть равным

- а) 3, б) 4, в) 6, г) 12.

17. Если площадь обкладок (пластин) конденсатора и расстояние между ними увеличить вдвое, то емкость конденсатора

- а) уменьшится на $1/3$,
 б) останется неизменной,
 в) увеличится втрое,
 г) увеличится в 6 раз.

18. Рассмотрим график на рис. 39.7. Мгновенное значение напряжения через $1/4$ периода будет

- а) 0 В, б) +50 В, в) +70 В, г) +100 В.

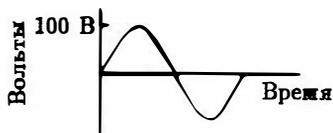


Рис. 39.7.

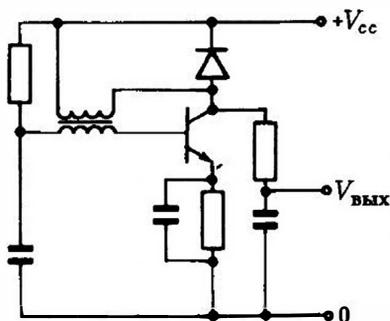


Рис. 39.8.

19. Одним из применений однопереходного транзистора является

- а) усилитель напряжения,
- б) дифференциатор,
- в) генератор импульсов,
- г) генератор с фазосдвигающей цепью обратной связи.

20. Если три конденсатора разной величины соединены между собой последовательно и подключены к источнику напряжения постоянного тока 60 В, то напряжение на каждом конденсаторе будет

- а) 20 В,
- б) 60 В,
- в) обратно пропорционально величине его емкости,
- г) прямо пропорционально величине его емкости.

21. Максимальная отдаваемая мощность транзистора может быть увеличена

- а) если понизить напряжение питания,
- б) если поставить радиатор,
- в) на короткий промежуток времени,
- г) если использовать его в двухтактном режиме.

22. Рассмотрим схему на рис. 39.8. Изображенный на нем генератор называется

- а) генератором Хартли,
- б) генератором с настраиваемым коллектором,
- в) генератором с настраиваемой базой,
- г) блокинг-генератором.

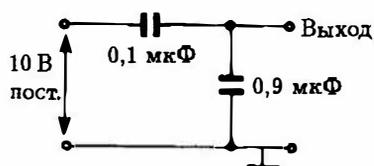


Рис. 39.9.

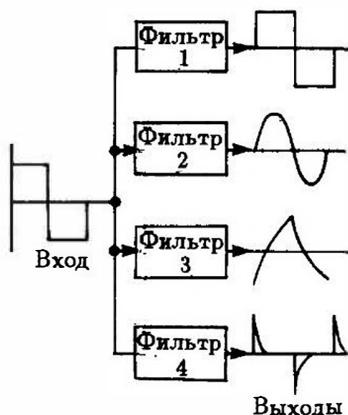


Рис. 39.10.

23. Сигнал на выходе схемы на рис. 39.8 имеет форму

- а) синусоиды,
- б) пилы,
- в) меандра,
- г) импульса.

24. При измерении было обнаружено, что электролитический конденсатор не имеет тока утечки. Это означает, что конденсатор

- а) накоротко замкнут,
- б) хороший,
- в) имеет обрыв,
- г) имеет низкое рабочее напряжение постоянного тока.

25. Рассмотрим схему на рис. 39.9. Если напряжение на входе равно 10 В постоянного тока, то на выходе будет напряжение постоянного тока величиной

- а) 0 В, б) 1 В, в) 9 В, г) 10 В.

26. Полевой транзистор, включенный по схеме с общим истоком, имеет

- а) низкое входное и низкое выходное сопротивления,
- б) низкое входное и высокое выходное сопротивления,
- в) низкое входное и среднее выходное сопротивления,
- г) высокое входное и среднее выходное сопротивления.

27. Рассмотрим схему на рис. 39.10. Сигнал, имеющий форму меандра, подается на входы четырех фильтров нижних частот (ФНЧ). Который из фильтров имеет самую высокую частоту отсечки?

- а) 1, б) 2, в) 3, г) 4.

28. Измерения показали, что напряжение на выходе источника питания при отключенной нагрузке равно 100 В, а при полной нагрузке — 90 В. следовательно, изменение напряжения стабилизации равно

- а) 5%, б) 9%, в) 10%, г) 11%.

29. Какую схему соединения следует использовать, чтобы согласовать высокое выходное сопротивление схемы с низким сопротивлением нагрузки?

- а) схему с общим эмиттером,
б) схему с заземленной сеткой,
в) эмиттерный повторитель,
г) схему с общим истоком.

30. Амплитудно-частотная характеристика усилителя звуковых частот на полевом транзисторе в области нижних частот ограничена

- а) разделительным конденсатором,
б) током утечки,
в) межэлектродными емкостями,
г) величиной нагрузочного резистора.

31. В схеме, изображенной на рис. 39.11, мощность рассеяния на резисторе R_1 равна

- а) 1/8 Вт, б) 1/4 Вт, в) 1/2 Вт, г) 4/5 Вт.

32. В схеме на рис. 39.12 напряжение на базе транзистора равно

- а) -10 В, б) -9,9 В, в) -5 В, г) -0,1 В.

33. Еще раз обратимся к схеме на рис. 39.12. Напряжение на выходе А равно -7 В. Коэффициент усиления транзистора по току равен

- а) 100; б) 200; в) 300; г) 400.

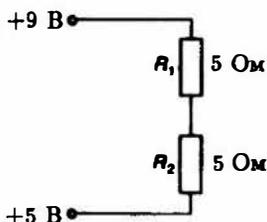


Рис. 39.11.

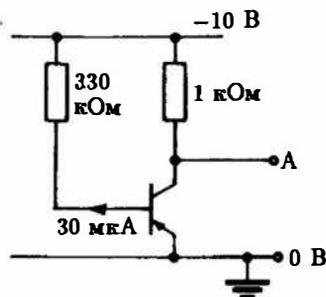


Рис. 39.12.

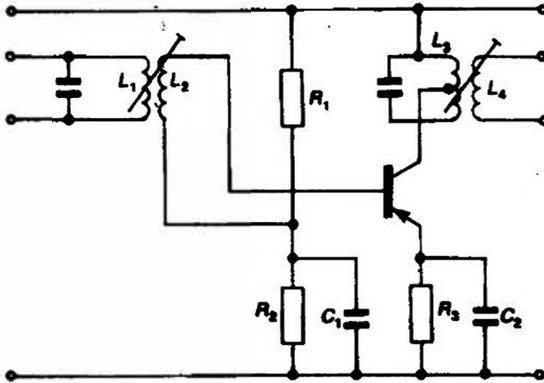


Рис. 39.13.

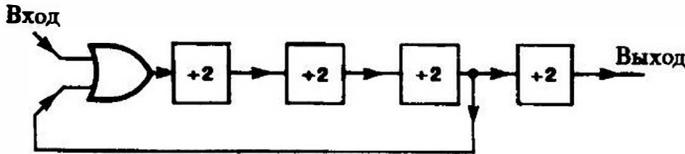


Рис. 39.14.

34. В схеме на рис. 39.13 конденсатор C_1 предназначен для

- а) фильтрации колебаний высокой частоты,
- б) подавления радиопомех,
- в) соединения каскадов,
- г) развязки смещения.

35. Точка отвода на L_3 (схема на рис. 39.13) предназначена для

- а) увеличения ширины полосы,
- б) улучшения избирательности,
- в) настройки усилителя,
- г) обеспечения обратной связи.

36. Счетчик, изображенный на рис. 39.14, делит на

- а) 6, б) 8, в) 14, г) 16.

37. На вход n -канального полевого транзистора, работающего в режиме С, подается синусоидальное напряжение. Какую часть периода будет протекать ток стока?

- а) часть положительной полуволны напряжения,
- б) в течение всей положительной полуволны напряжения,

- в) за все время действия положительной и отрицательной полуволны напряжения,
- г) часть отрицательной полуволны напряжения.

38. В операционном усилителе, изображенном на рис. 39.15, резистор R имеет номинал

- а) 1 кОм, б) 10 кОм, в) 100 кОм, г) 1 МОм.

39. Конденсатор C_3 в схеме на рис. 39.16 предназначен для

- а) связи между каскадами,
- б) развязки по переменному току,
- в) выравнивания коэффициента усиления по промежуточной частоте,
- г) обеспечения смещения по постоянному току.

40. Конденсатор C_2 на рис. 39.16 должен иметь емкость

- а) 20 пФ, б) 0,01 мкФ, в) 0,1 мкФ, г) 10 мкФ.

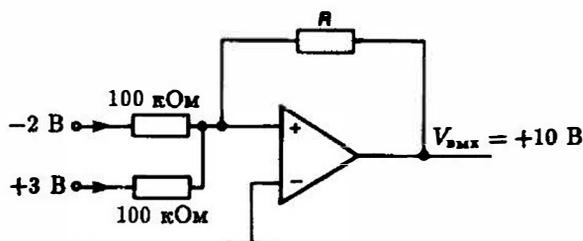


Рис. 39.15.

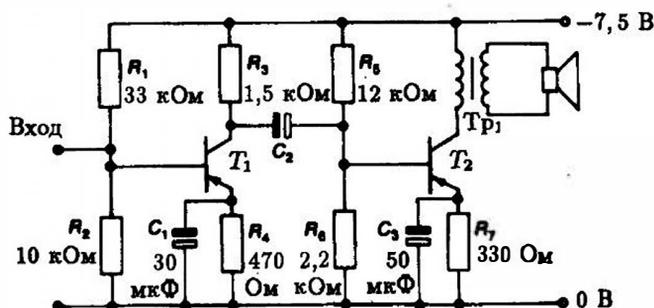


Рис. 39.16.

41. Рассмотрим схему на рис. 39.16. Если напряжение на коллекторе транзистора T_1 составляет 4,5 В, то ток через T_1 равен
- а) 5 мА, б) 2 мА, в) 1 мА, г) 0,5 мА.
42. Триггер имеет
- а) одно устойчивое состояние,
 б) два устойчивых состояния,
 в) три устойчивых состояния,
 г) ни одного устойчивого состояния.
43. Какая из перечисленных ниже логических схем с двумя входами реализует функцию $F = \overline{A \cdot B}$?
- а) И, б) ИЛИ, в) И-НЕ, г) ИЛИ-НЕ.
44. При уменьшении уровня напряжения на 3 дБ во сколько раз изменится выходная мощность?
- а) 1/3, б) 1/2, в) 2, г) 3.
45. Какая из приведенных ниже таблиц истинности соответствует логической схеме, изображенной на рис. 39.17?

P	Q	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

(а)

P	Q	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(б)

P	Q	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(в)

P	Q	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(г)

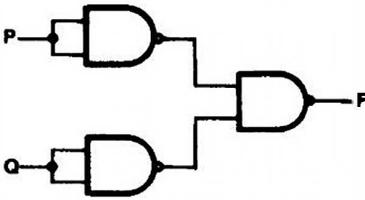


Рис. 39.17.



Рис. 39.18.

46. Логический элемент, изображенный на рис. 39.18, представляет логическую функцию

а) И, б) ИЛИ-НЕ, в) Исключающее ИЛИ, г) Исключающее ИЛИ-НЕ.

47. Усилитель на полевом транзисторе, в котором ток стока протекает в течение менее половины полупериода входного сигнала, относится к классу

а) А, б) В, в) АВ, г) С.

48. Булево выражение для функции Исключающее ИЛИ имеет вид

а) $(A + \bar{B}) \cdot (\bar{A} + B)$,

б) $\bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B}$,

в) $\overline{\bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B}}$,

г) $\bar{A} \cdot \bar{B} + A \cdot B$.

49. В семисегментном индикаторе в результате неисправности цифра 8 стала отображаться как 9. Какая еще ошибка из перечисленных ниже будет иметь место?

- а) 3 отображается как 9,
 б) 9 отображается как 3,
 в) 6 отображается как 5,
 г) пустой дисплей индикатора.

50. Принимающая антенна должна быть согласована с кабелем связи, чтобы

- а) увеличить импеданс антенны,
 б) сформировать стоячую волну,
 в) переместить пучность напряжения из антенны,
 г) переместить пучность напряжения в антенну.

51. Логические анализаторы применяются для проверки

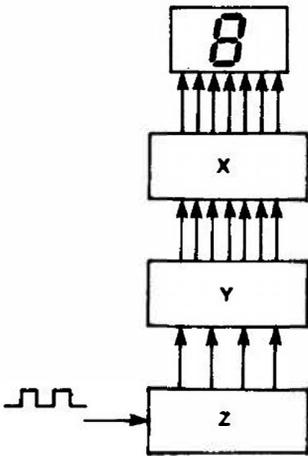


Рис. 39.19.

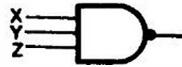


Рис. 39.20.

- а) усилителей звуковой частоты,
- б) видеосистем,
- в) радиоприемников,
- г) микропроцессорных систем.

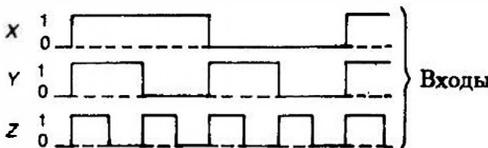
52. Блок Y на рис. 39.19, где изображено устройство цифрового индикатора, представляет собой

- а) двоично-десятичный 7-сегментный декодер,
- б) формирователь импульсов,
- в) счетчик,
- г) фиксатор.

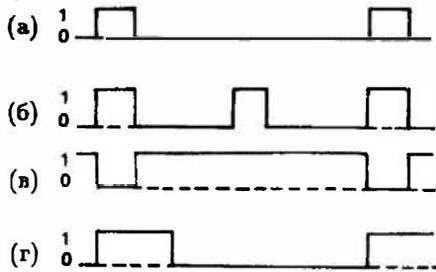
53. Блок питания работает в импульсном режиме. Минимальное напряжение на выходе будет получено при отношении длительности импульса к длительности паузы, равном

- а) 1 : 2, б) 1 : 4, в) 2 : 1, г) 4 : 1.

54. Рассмотрим схему на рис. 39.20. Если на ее входы поданы изображенные здесь сигналы X, Y, Z,



то выходной сигнал должен иметь вид



55. Какая комбинация входных двоичных сигналов, действующих на входе схемы на рис. 39.21, дает на ее выходе 1?

	A	B	C	D
а)	0	0	0	0
б)	1	0	1	0
в)	0	1	0	0
г)	1	1	0	0

56. Обратимся к схеме на рис. 39.22. Если на все входы поданы сигналы величиной 0,2 В, то напряжение на выходе будет равно

а) +0,8 В, б) -0,8 В, в) +8,0 В, г) -8,0 В.

57. Какая из нижеприведенных комбинаций реализуется на выходе RS -триггера, если на входе S действует логическая единица, а на входе R — логический ноль?

- а) $Q = 1, \bar{Q} = 1,$
 б) $Q = 0, \bar{Q} = 1,$
 в) $Q = 1, \bar{Q} = 0,$
 г) $Q = 0, \bar{Q} = 0.$

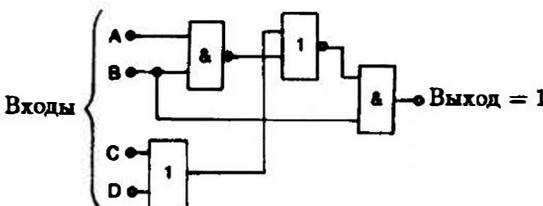


Рис. 39.21.

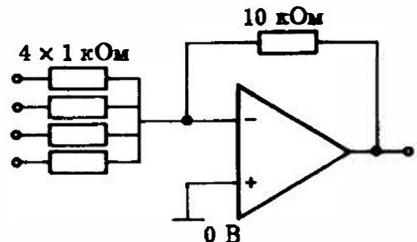
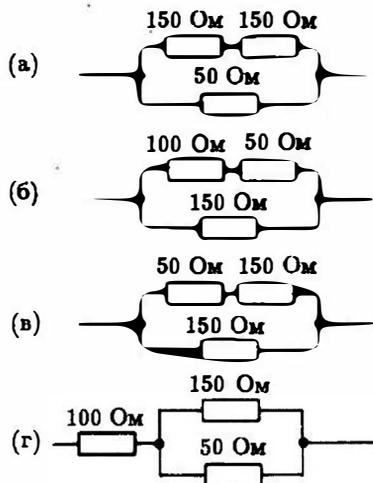


Рис. 39.22.

58. Какой из следующих вариантов соединения резисторов дает результирующее сопротивление 75 Ом?



59. Среднее значение напряжения синусоидального сигнала, показанного на рис. 39.23, равно

- а) 0 В, б) -5 В, в) 5 В, г) 10 В.

60. Реактивное сопротивление X_c конденсатора C выражается формулой

- а) ωC , б) $1/\omega C$, в) ω/C , г) $C\omega$.

61. Применение в усилителе отрицательной обратной связи

- а) уменьшит коэффициент усиления,
 б) увеличит коэффициент усиления,
 в) вызовет генерацию колебаний,
 г) сократит полосу частот.

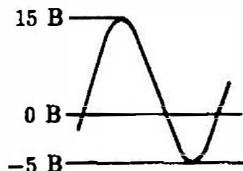
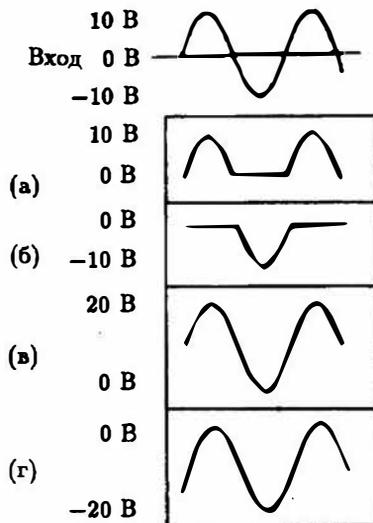


Рис. 39.23.

62. В устройствах автоматической регулировки усиления (АРУ) используются транзисторы, коэффициент усиления которых
- увеличивается с увеличением тока,
 - уменьшается с увеличением тока,
 - остаётся постоянным независимо от тока,
 - имеет очень малую величину.
63. Телевизоры высокой четкости имеют
- свыше 1000 строк на кадр,
 - большой размер экрана,
 - увеличенное напряжение на втором аноде,
 - более трех основных цветов.
64. Вольтметр с чувствительностью 20 000 Ом/В имеет ток отклонения стрелки прибора на всю шкалу
- 20 мкА, б) 50 мкА, в) 20 мА, г) 50 мА.
65. Усилитель мощности в схеме на рис. 39.24 имеет коэффициент усиления по напряжению, равный 2. Выходное напряжение этой схемы без нагрузки равно
- 240 В, б) 350 В, в) 480 В, г) 700 В.
66. Сигнал на выходе схемы, показанной на рис. 39.25, имеет вид



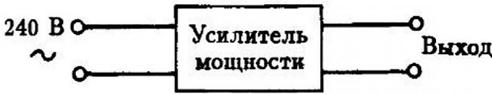


Рис. 39.24.

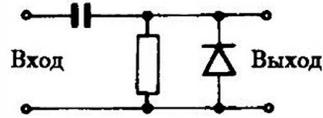


Рис. 39.25.

67. Межкаскадные конденсаторы связи в низкочастотных схемах на униполярных транзисторах имеют значительно меньшую емкость, чем аналогичные конденсаторы в схемах на биполярных транзисторах, так как биполярные транзисторы имеют

- а) низкое входное сопротивление,
- б) высокое входное сопротивление,
- в) большой ток утечки,
- г) низкий коэффициент усиления.

68. Максимальное безопасное напряжение, которое может быть приложено к точкам А и В в схеме на рис. 39.26, равно

- а) 5 В, б) 10 В, в) 15 В. г) 20 В.

69. Схема на рис. 39.27 представляет собой

- а) генератор Колпитца (емкостный трехточечный генератор с параллельным питанием),
- б) генератор Хартли (индуктивный трехточечный генератор),
- в) автоколебательный мультивибратор,
- г) бистабильный мультивибратор (триггер).

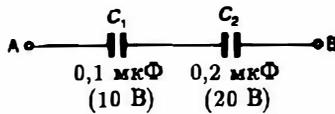


Рис. 39.26. В скобках указано рабочее напряжение конденсаторов.

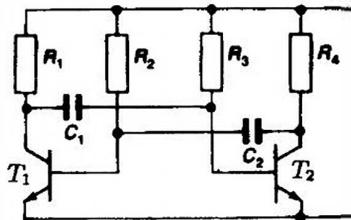


Рис. 39.27.

70. Обратимся еще раз к схеме на рис. 39.27. Если номинал резистора R_2 составляет половину номинала резистора R_3 и номинал конденсатора C_1 — половину номинала C_2 , то отношение длительности импульса к длительности паузы (коэффициент заполнения) будет равно

а) 1 : 2, б) 1 : 1, в) 2 : 1, г) 4 : 1.

71. На рис. 39.28 показаны передаточная характеристика усилителя и сигналы на его входе и выходе. Данный усилитель работает в режиме класса

а) А, б) В, в) АВ, г) С.

72. Фигуры Лиссажу используются для измерения

а) частоты, б) амплитуды, в) периода, г) силы тока.

73. На рис. 39.29 электроды управления яркостью и фокусировкой электронно-лучевой трубки обозначены соответственно номерами

а) 1 и 2, б) 2 и 3, в) 2 и 6, г) 1 и 7.

74. Прибор, испускающий электроны при падении на него света, называется

- а) фоторезистором,
- б) фотогальваническим элементом,
- в) фотодиодом,
- г) электровакуумным фотоэлементом.

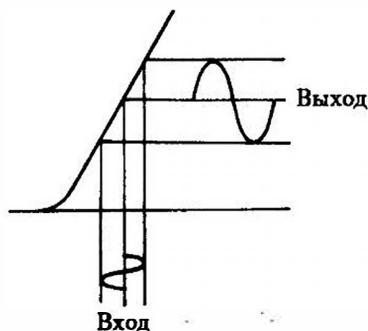


Рис. 39.28.

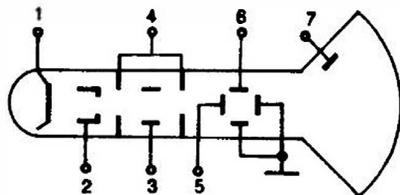


Рис. 39.29.

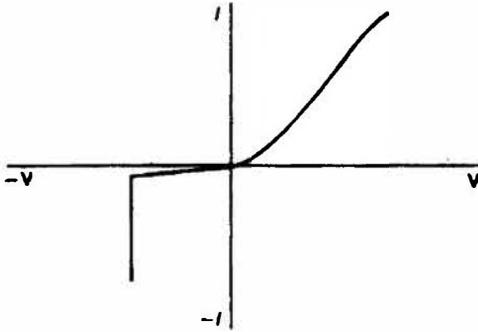


Рис. 39.30.

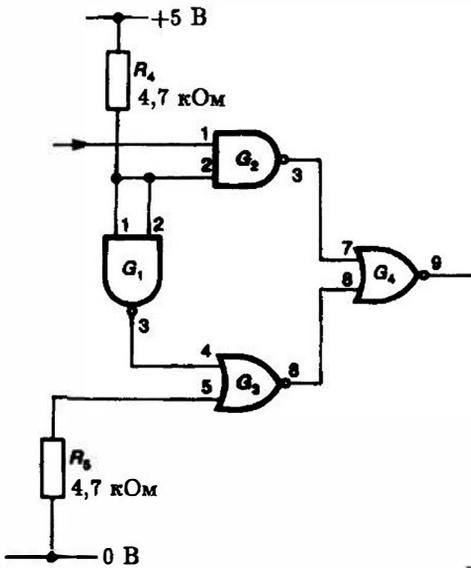


Рис. 39.31.

75. На рис. 39.30 изображена типичная характеристика

- а) однооперационного триодного тиристора,
- б) симметричного диодного тиристора,
- в) стабилитрона,
- г) транзистора.

76. Рассмотрим схему на рис. 39.31. Для получения на выходе 9 логической единицы логические уровни на входах 1 (G_2) и 5 (G_3) должны быть

- а) на входе 1 — низкий, на входе 5 — высокий,
 б) на входе 1 — низкий, на входе 5 — низкий,
 в) на входе 1 — высокий, на входе 5 — низкий,
 г) на входе 1 — высокий, на входе 5 — высокий.

77. Логической схеме на рис. 39.32 соответствует таблица истинности

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(а)

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(б)

A	B	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(в)

A	B	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(г)

78. Рассмотрим рис. 39.32, на котором изображена часть цифровой схемы. Для тестирования логической схемы G_3 были использованы логический пробник и импульсный генератор. С генератора на каждый вход по очереди подавался логический импульс, при этом состояние выхода схемы (точка б) контролировалось логическим пробником. Были получены следующие результаты:

Контакт ζ	4	5	6
Нормальное состояние	Высокое	Высокое	Высокое
Тест	Импульс	—	Изменение состояния есть
Тест	—	Импульс	Изменения состояния нет

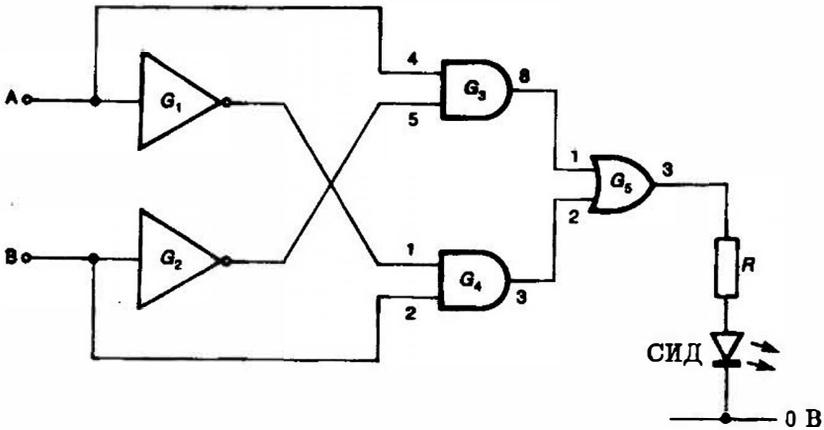


Рис. 39.32.

Дефектный контакт:

- а) точка 4: константный «0»,
- б) точка 4: константная «1»,
- в) точка 5: константный «0»,
- г) точка 5: константная «1».

79. Преимущество логических КМОП-схем перед логическими схемами типа ТТЛ заключается в том, что

- а) ТТЛ потребляет меньшую мощность,
- б) КМОП потребляет меньшую мощность,
- в) ТТЛ обладает большим быстродействием,
- г) КМОП-схема может иметь большее число входов.

80. Логические анализаторы используются для тестирования

- а) микропроцессорных систем,
- б) цифровых печатных плат,
- в) радиоприемников,
- г) электронагревателей.

Приложение 1

Резисторы

По сравнению с другими элементами резисторы встречаются в электронных схемах наиболее часто.

Стабильность. Все резисторы можно разделить на два типа: резисторы повышенной стабильности и резисторы общего назначения. Резисторы повышенной стабильности сохраняют свои изначальные характеристики в течение всего времени их использования. Резисторы общего назначения имеют свойство изменять свои характеристики с течением времени. Стабильность резистора обычно задается в процентах от номинального значения его характеристик.

Допуск. Допуск отражает точность, с которой даются характеристики резистора. Поскольку выпуск резисторов с точно выдержанными характеристиками является весьма дорогостоящим, в массовом производстве резисторы выпускаются с характеристиками, имеющими определенный допуск на отклонение от номинального значения. Допуск также выражается в процентах от номинального значения. Например, если резистор сопротивлением 1 кОм имеет допуск $\pm 10\%$, то это означает, что фактическое значение сопротивления этого резистора лежит в пределах от 0,9 кОм до 1,1 кОм. Поскольку 10% от 1 кОм составляют

$$\frac{10}{100} \cdot 1000 = 100 \text{ Ом},$$

то, следовательно, фактическое значение сопротивления лежит между $1000 - 100 = 900 \text{ Ом}$ и $1000 + 100 = 1100 \text{ Ом}$.

Номинальная мощность. Основным ограничением при эксплуатации резистора является его номинальная мощность. Номинальная мощность резистора — это мощность, которая может быть рассеяна в форме тепла на данном резисторе без его повреждения. Эта характеристика измеряется в ваттах, а ее величина может быть оценена по физическим размерам резистора. Резисторы больших размеров способны рассеять без перегрева гораздо большую мощность, чем резисторы, имеющие небольшие размеры.

Пример. На какой максимальный ток рассчитан резистор сопротивлением 100 Ом, если его номинальная мощность равна 0,5 Вт?

Так как мощность $= I^2 R$, то $0,5 \text{ Вт} = I^2 \cdot 100 \text{ Ом}$, откуда

$$I^2 = \frac{0,5}{100} = \frac{5}{1000} = \frac{1}{200},$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{200}} = \frac{1}{\sqrt{200}} = \frac{1}{10\sqrt{2}} = \frac{1}{10 \cdot 1,4} = \frac{1}{14}.$$

Таким образом, $I = 0,07$ А. или $0,07 \cdot 1000 = 70$ мА.

Типы резисторов

Типы резисторов	Номинальная мощность	Точность	Допуск	Другие характеристики
Проволочные	Высокая (до 300 Вт)	Высокая (1%)	5%	Большие размеры. Высокая стоимость
Композиционные	Низкая (до 3 Вт)	Низкая (20%)	5-20%	Низкая стоимость. Небольшие размеры. Широкое применение
Металлопленочные, металлооксидные (прецизионные)	Низкая (менее 2 Вт)	Высокая (1%)	Очень малый	Высокая стоимость. Небольшие размеры
Металлопленочные, металлооксидные (мощные)	Высокая (до 300 Вт)	Высокая (1%)	Небольшой	Большие размеры. Высокая стоимость

Удельное сопротивление. Различные материалы оказывают различное сопротивление протекающему через них электрическому току. Такие проводящие материалы, как серебро, медь или алюминий, содержат большое количество «оторванных», или свободных, электронов и поэтому могут пропускать ток практически неограниченной величины. Такие материалы, как сухое дерево, резина, стекло, напротив, имеют очень мало свободных электронов, и их сопротивление протеканию электрического тока достаточно велико. Материалы, занимающие промежуточное положение между этими двумя крайностями, имеют вполне определенное сопротивление. Свойство материалов иметь различное сопротивление характеризуется удельным сопротивлением. Удельное сопротивление определяется как сопротивление кубика со стороной единичной длины, сделанного из данного материала.

Пусть кусок проволоки длиной 10 см имеет сопротивление 1 Ом. Кусок этой же проволоки длиной 20 см будет иметь вдвое большее сопротивление, т. е. 2 Ом. Таким образом, сопротивление проводника с увеличением его длины возрастает. Другими словами, сопротивление R пропорционально длине l .

Сопротивление проволоки также зависит от площади ее поперечного сечения a . Пусть в предыдущем примере площадь поперечного сечения $a = 1 \text{ мм} \times 1 \text{ мм} = 1 \text{ мм}^2$. Если теперь площадь поперечного сечения удвоить, т. е. она будет равна 2 мм^2 , то получается, что мы как будто

поместили рядом два первоначальных куска проволоки. Теперь уже ток должен протекать через сечение вдвое большей площади. Таким образом, сопротивление проволоки уменьшится в два раза.

В общем, при увеличении площади поперечного сечения проводника его сопротивление уменьшается. Следовательно, сопротивление R обратно пропорционально площади поперечного сечения. Таким образом,

$$R \propto 1/a.$$

Влияние нагрева на свойства резисторов. Сопротивление практически всех материалов возрастает с увеличением температуры. Например, сопротивление таких материалов, как медь, серебро, алюминий, при их нагревании возрастает. В этом случае говорят, что эти материалы имеют *положительный температурный коэффициент сопротивления* (ТКС).

Углерод, широко используемый при изготовлении резисторов, является единственным простым веществом, имеющим *отрицательный температурный коэффициент сопротивления*. Сопротивление углерода при нагревании уменьшается.

Цветовая маркировка резисторов. Номинальные характеристики резистора, а также его допуск могут обозначаться с помощью цветовой маркировки. На корпус резистора может быть нанесено до четырех цветных полос, как показано на рис. П1.1. Первые три полосы содержат информацию о номинальном значении сопротивления резистора, а четвертая полоса — о величине допуска (см. табл. П1.1).

Если резистор имеет сопротивление менее 10 Ом, цветовой код множителя (третья полоса) бывает следующих цветов:

золотистый 10^{-1} (или 0,1);
серебристый 10^{-2} (или 0,01).

В качестве примера на рис. П1.2 показана цветовая маркировка резистора, имеющего номинал 2,2 Ом.



Рис. П1.1 Цветовая маркировка резистора.

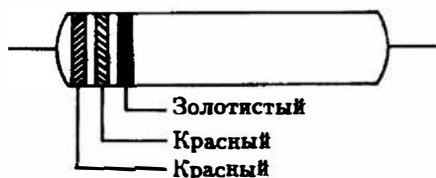


Рис. П1.2. Цветовая маркировка резистора сопротивлением 2,2 Ом.

Таблица П1.1.

Цвет	Полоса 1 (первая цифра, единицы)	Полоса 2 (вторая цифра, десятки)	Полоса 3 (количество нулей, множитель)	Полоса 4 (допуск)
Черный	0	0	0	
Коричневый	1	1	1	
Красный	2	2	2	
Оранжевый	3	3	3	
Желтый	4	4	4	
Зеленый	5	5	5	
Синий	6	6	6	
Фиолетовый	7	7	7	
Серый	8	8	8	
Белый	9	9	9	
Золотистый				5%
Серебристый				10%
Нет полосы				20%

Резисторы переменного сопротивления. На рис. П1.3. условно изображен резистор переменного сопротивления (называемый также потенциометром), который имеет три вывода: А, В и С. Сопротивление между выводами А и В постоянно и равно полному сопротивлению резистора. Переменным является сопротивление участков между центральным и одним из боковых выводов: либо А, либо В. Сопротивление можно изменять, перемещая подвижной контакт по виткам катушки.



Рис. П1.3. Резистор переменного сопротивления.

Приложение 2

Конденсаторы

Типы конденсаторов

Тип	Емкость	Диапазон рабочих частот	Другие характеристики
Бумажные	0,001–1 мкФ	Средние (50 Гц–1 МГц)	Низкая стоимость
Полистироловые	0,0001–1 мкФ	Средние	Средняя стабильность (1–5%)
Керамические	До нескольких микрофард	ОВЧ и УВЧ	Небольшие размеры. Высокая стабильность
Слюдаые и слюдяные с обкладками в виде серебряной металлизации	От нескольких пикофард до 0,05 мкФ	Радиочастоты (200 МГц и выше)	Небольшие размеры. Устойчивость к сильным внешним воздействиям. Высокая стабильность. Высокая стоимость
С воздушным диэлектриком	Очень низкая (менее 0,0005 мкФ)	ОВЧ и УВЧ	Широко используются как конденсаторы переменной емкости для настройки
Электролитические	Высокая (тысячи микрофард)	Низкие (от постоянного тока до звуковых частот)	Низкая стоимость. Большой допуск (более 50%). Широкое применение

Номинальное, или рабочее, напряжение. Номинальное напряжение конденсатора — это максимальное напряжение, которое может быть подано на конденсатор и при котором еще не наступает пробой диэлектрика. Если на конденсатор подается переменное напряжение, то его амплитуда должна быть ниже значения номинального напряжения, иначе конденсатор может выйти из строя.

Диапазон рабочих частот. Кроме ограничений по напряжению для хорошей работы конденсатора необходимо также иметь в виду ограничения по частоте подаваемого сигнала. Диапазон рабочих частот — это такой набор частот, при которых конденсатор может работать без внесения существенных потерь и искажения сигнала.

Электролитический конденсатор. Электролитические конденсаторы обладают малыми размерами, низкой стоимостью, а также большой емкостью. Поэтому они находят широкое применение. Они имеют строго определенную полярность, которую следует соблюдать при подключении конденсатора в схему.

Приложение 3

Единицы системы СИ

Вес	ньютон (Н)
Время	секунда (с)
Давление	Н/м ²
Длина или расстояние	метр (м)
Емкость	фарада (Ф)
Заряд	кулон (Кл)
Импеданс (полное сопротивление цепи)	ом (Ом)
Индуктивность	генри (Гн)
Магнитный поток	вебер (Вб)
Масса	килограмм (кг)
Момент	ньютон · метр (Н · м)
Мощность	ватт (Вт)
Плотность магнитного потока	тесла (Тл)
Работа	джоуль (Дж)
Сила	ньютон (Н)
Сила тока	ампер (А)
Скорость	м/с
Скорость угловая	рад/с
Сопротивление активное	ом (Ом)
Сопротивление реактивное	ом (Ом)
Угол	радиан
Частота	герц (Гц)
Электродвижущая сила или электрический потенциал	вольт (В)
Энергия	джоуль (Дж)

Приложение 4

Компоненты и их условные обозначения

Резисторы

	Резистор с переменным сопротивлением
	Резистор с переключаемым сопротивлением
	Делитель напряжения (потенциометр)

Термистор: сопротивление изменяется при изменении температуры; обычно имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС); используется для компенсации изменения сопротивления резисторов при изменении температуры (например, в автомобильных радиоприемниках).

	Резистор с отрицательным ТКС (например, композиционные резисторы)
	Резистор с положительным ТКС (например, проволочные резисторы)
	Варистор: поддерживает постоянное падение напряжения при увеличении силы тока, протекающего через него

Катушки индуктивности

	Обычная катушка индуктивности
	Катушка индуктивности с магнитным сердечником
	Катушка индуктивности с переменной индуктивностью
	Катушка индуктивности с переключаемой индуктивностью

Трансформаторы

	Стандартное обозначение трансформатора (повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1 : 2)
	Трансформатор с магнитным сердечником (понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации 5 : 1)
	Трансформатор с двумя вторичными обмотками (коэффициент трансформации между первичной и любой вторичной обмоткой составляет 1 : 5)

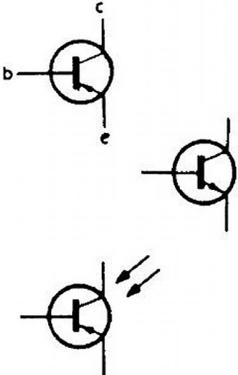
Конденсаторы

	<p>Электролитический конденсатор</p>
	<p>Конденсатор переменной емкости</p>
	<p>Конденсатор с переключаемой емкостью (подстроечный конденсатор)</p>
	<p>Конденсатор, емкость которого зависит от приложенного напряжения</p>
	<p>Конденсатор, емкость которого зависит от температуры (например, керамический)</p>

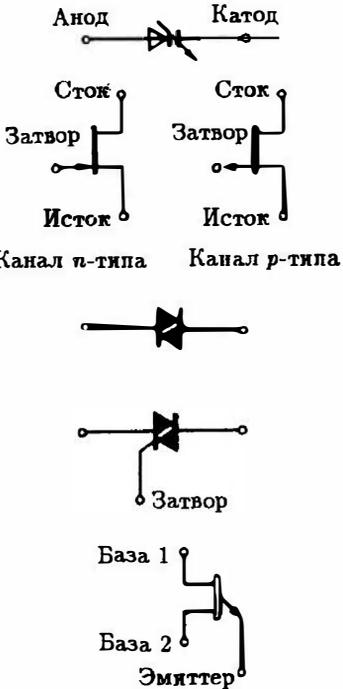
Полупроводниковые диоды

	<p>Стандартное обозначение диода</p>
	<p>Фотодиод (диод, чувствительный к световым лучам)</p>
	<p>Стабилитрон (всегда смещается в обратном направлении напряжением, равным напряжению пробоя; это напряжение остается постоянным даже при очень больших изменениях тока, протекающего через стабилитрон; применяется для стабилизации напряжения)</p>

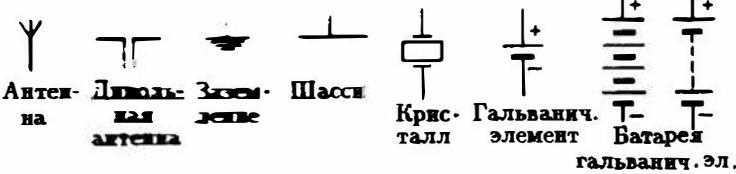
Транзисторы

	<p><i>pnp</i>-транзистор</p> <p><i>npn</i>-транзистор</p> <p>Фототранзистор</p>
---	---

Другие компоненты схем

	<p>Варактор — диод, имеющий переменную емкость перехода. Емкость изменяется в зависимости от величины подаваемого напряжения обратного смещения</p> <p>Полевые транзисторы</p> <p>Симметричный динистор (диодный тиристор)</p> <p>Симистор (симметричный триодный тиристор)</p> <p>Однопереходный транзистор (двухбазовый диод)</p>
	<p>Тиристор (кремниевый управляемый выпрямитель, SCR)</p>

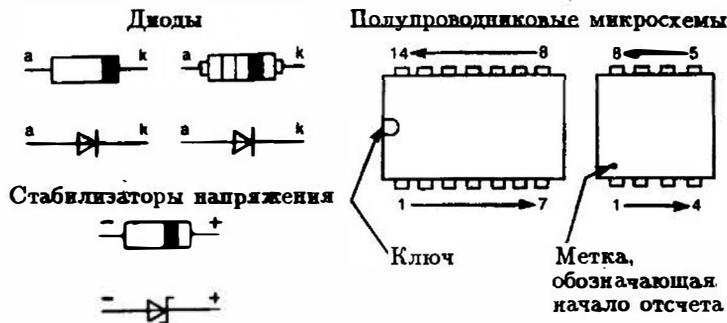
Операционный усилитель



Соединения и переключатели



Ориентация компонентов



Приложение 5

Краткое руководство по ВЫЧИСЛЕНИЯМ

Проценты

Число процентов — это числитель дроби, знаменателем которой всегда является число 100. Например, $47\% = \frac{47}{100}$.

$$1) 5\% \text{ от } 100 = \frac{5}{100} \cdot 100 = 5.$$

$$2) 10\% \text{ от } 20 \text{ В} = \frac{10}{100} \cdot 20 = 2 \text{ В}.$$

3) Резистор сопротивлением 1 кОм имеет допуск $\pm 10\%$. Каковы максимальное и минимальное значения сопротивления, которое он может иметь?

$$10\% \text{ от } 10 \text{ кОм} = \frac{10}{100} \cdot 10 = 1 \text{ кОм}.$$

$$\text{Максимальное значение сопротивления} = 10 + 1 = 11 \text{ кОм}.$$

$$\text{Минимальное значение сопротивления} = 10 - 1 = 9 \text{ кОм}.$$

Возведение в квадрат и извлечение квадратного корня

Когда число умножается само на себя, говорят, что оно возводится в квадрат. Например, $2 \cdot 2 = 2^2$ (два «в квадрате»), что равно 4. Говорят, что 4 — это квадрат числа 2. Количество раз, которое число умножается само на себя, называется степенью числа. В нашем случае степень равна 2. При обратном вычислении мы можем сказать, что 2 — это квадратный корень из числа 4, или $2 = \sqrt{4}$.

Другие степени

Куб числа 2 равен $2^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$. Число 5 в степени 4 равно $5^4 = 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 = 625$.

Отрицательные степени

Общее правило: $a^{-2} = \frac{1}{a^2}$; $a^{-3} = \frac{1}{a^3}$ и т. д. Например, $3^{-2} = \frac{1}{3^2} = \frac{1}{9}$. Отрицательные степени меняют знак (становятся положительными), когда у основания степени мы меняем местами числитель и знаменатель.

$$2^{-3} = \frac{1}{2^3} = \frac{1}{8}, \quad \frac{1}{3^{-2}} = 3^2 = 9.$$

Любое число, возведенное в нулевую степень, равно единице: $2^0 = 1$; $10^0 = 1$.

Степени числа 10

Одним из способов облегчения вычислений при работе с числами, имеющими много десятичных разрядов, является использование степеней числа 10.

$$10^0 = 1 \quad 10^{-1} = \frac{1}{10} = 0,1$$

$$10^1 = 10 \quad 10^{-2} = \frac{1}{100} = 0,01$$

$$10^2 = 100 \quad 10^{-3} = \frac{1}{1000} = 0,001$$

$$10^3 = 1\,000 \quad 10^{-4} = \frac{1}{10\,000} = 0,0001$$

$$10^4 = 10\,000 \quad 10^{-5} = \frac{1}{100\,000} = 0,00001$$

$$10^5 = 100\,000 \quad 10^{-6} = \frac{1}{1\,000\,000} = 0,000001$$

$$10^6 = 1\,000\,000$$

Например, $2000 \text{ В} = 2 \cdot 1000 \text{ В} = 2 \cdot 10^3 \text{ В}$ и $0,01 \text{ А} = 10^{-2} \text{ А}$.

При умножении степени числа 10 складываются:

$$10^2 \cdot 10^1 = 10^{2+1} = 10^3; \quad 10^4 \cdot 10^{-1} = 10^{4-1} = 10^3.$$

Кратные и дольные множители единиц измерения

Множитель		Приставка	Обозначение
1 000 000 000	10^9	Гига	Г
1 000 000	10^6	Мега	М
1 000	10^3	кило	к
0,001	10^{-3}	милли	м
0,000 001	10^{-6}	микро	мк
0,000 000 001	10^{-9}	нано	н
0,000 000 000 001	10^{-12}	пико	п

Пример 1

Через резистор сопротивлением 4,7 кОм протекает ток 2 мА. Каково падение напряжения на резисторе?

$$4,7 \text{ кОм} = 4,7 \cdot 10^3 \text{ Ом},$$

$$2 \text{ мА} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

$$V = IR = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 4,7 \cdot 10^3 = 2 \cdot 4,7 \cdot 10^0 = 2 \cdot 4,7 \cdot 1 = 2 \cdot 4,7 = 9,4 \text{ В}.$$

Приложение 6

Децибел

Децибел — это логарифмическая единица, используемая для выражения отношения двух мощностей, например коэффициента усиления по мощности. Децибел является более удобной единицей для выражения коэффициента усиления, нежели обычное числовое выражение отношения мощностей, так как при логарифмическом представлении мы получаем меньшие числовые значения. Логарифмическое представление удобнее использовать, например, при расчетах в акустике, поскольку чувствительность человеческого уха в зависимости от интенсивности звука также меняется по логарифмическому закону.



Рис. Пб.1. $P_{вх}$ и $P_{вых}$ — соответственно входная и выходная мощности.

Для усилителя, показанного на рис. Пб.1, коэффициент усиления по мощности G_p в децибелах выражается следующим образом:

$$G_p = 10 \lg \frac{\text{Выходная мощность}}{\text{Входная мощность}} = 10 \lg \frac{P_{вых}}{P_{вх}} \text{ [дБ]}.$$

Следовательно, если коэффициент усиления по мощности равен $P_{вых}/P_{вх}$, то его выражение в децибелах будет $10 \lg G_p$.

Заметим, что децибел используется для выражения отношения мощностей и не является мерой уровня мощности.

Коэффициент усиления, выраженный в децибелах, может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Положительное значение соответствует отношению мощностей, большему единицы ($P_{вых}$ больше, чем $P_{вх}$), а отрицательное значение свидетельствует о том, что отношение мощностей меньше единицы ($P_{вых}$ меньше, чем $P_{вх}$, т. е. мы имеем дело с потерей мощности). Чтобы вычислить коэффициент усиления в децибелах по формуле, которая приведена выше, необходимо знание логарифмов. Поэтому полезно запомнить некоторые основные соотношения, приведенные в табл. Пб.1.

Таблица П6.1

Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент усиления по мощности
0	1
3	2
10	10
20	100 (10^2)
30	1000 (10^3)

Пользуясь таблицей П6.1, можно, как будет показано в дальнейшем, осуществлять переходы от одного представления к другому, что нередко требуется в расчетах.

Следует заметить, что: а) при коэффициенте усиления, равном 1, коэффициент усиления в децибелах равен 0; б) при увеличении коэффициента усиления в 10 раз (например, от 100 до 1000) его значение в децибелах возрастает на 10 дБ (с 20 до 30). В случае ослабления коэффициент усиления в децибелах принимает отрицательное значение. Например, коэффициенту усиления $1/2$ соответствует значение -3 дБ, коэффициенту $1/10$ — значение -10 дБ и т. д.

Примеры

1) Если усилитель имеет коэффициент усиления 3 дБ и на его вход подается сигнал мощностью 10 мВт, то мощность выходного сигнала можно вычислить следующим образом:

3 дБ соответствуют коэффициенту усиления 2, следовательно,
 Выходная мощность = 2 · Входная мощность = 2 · 10 мВт = 20 мВт.

2) Обратимся к рис. П6.2. Вычислим мощность входного сигнала.

10 дБ соответствуют коэффициенту усиления 10, следовательно,
 Входная мощность = $\frac{\text{Выходная мощность}}{10} = \frac{100 \text{ мВт}}{10} = 10 \text{ мВт}$.

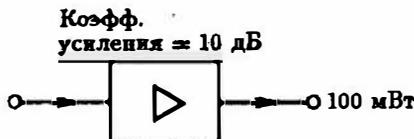


Рис. П6.2.

Коэффициенты усиления по напряжению и по току

Коэффициенты усиления по току и по напряжению также могут выражаться в децибелах при условии, что входное сопротивление равно сопротивлению нагрузки.

$$\text{Коэффициент усиления в дБ} = 20 \lg \frac{v_{\text{вых}}}{v_{\text{вх}}} = 20 \lg \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}},$$

где $v_{\text{вых}}$ и $i_{\text{вых}}$ — значения напряжения и тока на выходе, а $v_{\text{вх}}$ и $i_{\text{вх}}$ — на входе. Из таблицы П6.2 находим, что 3 дБ соответствует значению $1/1,4 = 0,7$, или 70%. Например, если на 3-дБ аттенюатор (т. е. дающий ослабление 3 дБ) подано напряжение 10 мВ, то на выходе мы получим $0,7 \cdot 10 = 7$ мВ.

Таблица П6.2

Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент усиления по напряжению или по току*
0	1
3	$\sqrt{2} = 1,4$
6	2
20	10
40	100
60	1000

* Подразумевается равенство сопротивлений.

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя

Одним из преимуществ использования логарифмических единиц является то, что если усилитель имеет более одного каскада, то общий коэффициент усиления в децибелах попросту равен сумме коэффициентов усиления отдельных каскадов, выраженных в децибелах. На рис. П6.3 показана блок-схема двухкаскадного усилителя. Первый каскад имеет коэффициент усиления 10 дБ (т. е. коэффициент усиления мощности равен 10), а второй каскад — коэффициент усиления 3 дБ (что соответствует усилению мощности 2). Общий коэффициент усиления составляет

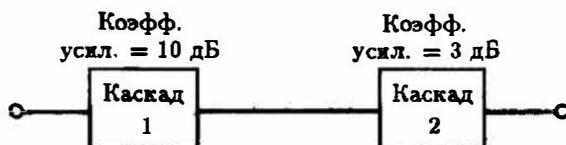


Рис. П6.3.



Рис. П6.4.

$10 + 3 = 13$ дБ. Численное значение коэффициента усиления мощности равно произведению коэффициентов каскадов, т. е. $10 \cdot 2 = 20$.

Пример

Обратимся к рис. П6.4.

Коэффициент усиления каскада $A = 100/10 = 10$, или 20 дБ
(в предположении, что $R_{\text{вх}} = R_{\text{н}}$).

Коэффициент усиления каскада $B = 70/100 = 0,7$, или -3 дБ.

Общий коэффициент усиления усилителя равен $70/10 = 7$.

Общий коэффициент усиления в децибелах равен $20 - 3 = 17$ дБ.

Переход от децибелов к численным отношениям, и наоборот, для величин, отсутствующих в приведенных таблицах, можно производить посредством деления на подходящие составные части. Например, 13 дБ можно представить как 10 дБ+3 дБ. 10 дБ соответствуют коэффициенту усиления 10, а 3 дБ — коэффициенту усиления 2. Следовательно, суммарное усиление составляет $10 \cdot 2 = 20$ (см. рис. П6.3).

Примеры

3) На вход схемы подается 10 мВт. Выходная мощность равна 1 Вт. Чему равен коэффициент усиления в децибелах?

Решение

Коэффициент усиления равен $\frac{1 \text{ Вт}}{10 \text{ мВт}} = \frac{1000 \text{ мВт}}{10 \text{ мВт}} = 100$. Этому значению соответствует коэффициент усиления 20 дБ.



Рис. П6.5.

4) Обратимся к рис. П6.5. Требуется найти:

- а) общий коэффициент усиления;
- б) общий коэффициент усиления в децибелах;
- в) коэффициент усиления каскада В как в децибелах, так и в виде численного отношения.

Решение

а) Общий коэффициент усиления равен $\frac{v_{\text{вых}}}{v_{\text{вх}}} = \frac{100 \text{ мВ}}{50 \text{ мВ}} = 2$.

б) Коэффициенту усиления по напряжению, равному 2, соответствует значение 6 дБ.

в) Коэффициент усиления каскада В равен 6 дБ – 9 дБ = –3 дБ. В численном выражении это $1/1,4 = 0,7$.

Приложение 7

Ответы к упражнениям

Упражнения I (гл. 19)

1 (б)	21 (в)	41 (а)	61 (б)
2 (г)	22 (г)	42 (а)	62 (б)
3 (б)	23 (а)	43 (в)	63 (в)
4 (а)	24 (в)	44 (б)	64 (г)
5 (б)	25 (в)	45 (б)	65 (б)
6 (в)	26 (б)	46 (в)	66 (а)
7 (а)	27 (в)	47 (в)	67 (в)
8 (г)	28 (а)	48 (б)	68 (в)
9 (в)	29 (г)	49 (г)	69 (а)
10 (б)	30 (б)	50 (в)	70 (г)
11 (г)	31 (г)	51 (г)	71 (а)
12 (в)	32 (б)	52 (а)	72 (б)
13 (б)	33 (а)	53 (б)	73 (б)
14 (а)	34 (б)	54 (в)	74 (б)
15 (б)	35 (б)	55 (в)	75 (в)
16 (в)	36 (в)	56 (б)	76 (г)
17 (б)	37 (в)	57 (а)	77 (б)
18 (б)	38 (б)	58 (в)	78 (а)
19 (а)	39 (а)	59 (а)	79 (а)
20 (г)	40 (в)	60 (а)	80 (б)

Упражнения II (гл. 39)

1 (б)	21 (б)	41 (б)	61 (а)
2 (в)	22 (г)	42 (б)	62 (б)
3 (в)	23 (б)	43 (в)	63 (а)
4 (в)	24 (в)	44 (в)	64 (б)
5 (г)	25 (б)	45 (в)	65 (в)
6 (б)	26 (г)	46 (г)	66 (в)
7 (в)	27 (а)	47 (г)	67 (а)
8 (б)	28 (г)	48 (б)	68 (в)
9 (в)	29 (в)	49 (в)	69 (в)
10 (б)	30 (а)	50 (в)	70 (б)
11 (б)	31 (г)	51 (г)	71 (а)
12 (г)	32 (г)	52 (а)	72 (а)
13 (в)	33 (а)	53 (б)	73 (б)
14 (г)	34 (г)	54 (в)	74 (г)
15 (а)	35 (б)	55 (г)	75 (в)
16 (б)	36 (в)	56 (г)	76 (в)
17 (б)	37 (а)	57 (в)	77 (б)
18 (г)	38 (г)	58 (б)	78 (г)
19 (в)	39 (б)	59 (в)	79 (б)
20 (в)	40 (г)	60 (б)	80 (а)

Предметный указатель

- Автоматическая подстройка частоты
122
- регулировка усиления (APY) 120,
122, 360
- Автоматическое управление скоростью двигателя 100
- Автотрансформатор 69
- Адрес 309
- Акцептор 166
- Ампер 9
- Амплитуда 20
- Анализатор логический 318, 356, 365
- сигнатурный 318
- Антенна 73, 356
- APY см. Автоматическая регулировка усиления
- Атом 8, 165
- Барьер потенциальный 167
- Би-би-си радиостанция 120
- Блокннг-генератор 286-288
- Булева алгебра 292
- Буферный каскад 57
- Варикап 215
- Варистор 373
- Ватт 18
- Векторное представление 41
- Видеосигнал 133
- Возведение в квадрат 378
- Вольт 9
- Вольтметр 360
- Волны радио, спектр 107
- электромагнитные 106-107
- спектр 107, 138
- Восстановление постоянной составляющей см. Фиксация уровня
- Выборка 124
- Выпрямитель двухполупериодный 83,
149, 153, 231
- мостовой 232
- однополупериодный, 231
- Выпрямление двухполупериодное 80
- однополупериодное 79
- Гармоники 29
- пилообразного сигнала 31
- прямоугольного сигнала 31
- Генератор 49, 56-78, 283-284, 350
- импульсный 364
- логический 318
- кварцевый 285
- Колпитца 284-285
- несинусоидальных сигналов 286
- НЧ 57
- на однопереходном транзисторе 288
- пилообразного напряжения 288-289
- развертки 157
- тактовый 311
- УВЧ 286
- с фазосдвигающей цепью 284
- Хартли 284-285
- Генри 38
- Герц 25
- Гетеродин 348
- Громкоговоритель 75-76, 263

- Двигатель, автоматическое управление скоростью вращения 100
 Двоичная система счисления 93
 Девиация частоты 161
 Декодер 144
 Делитель напряжения 11-13
 Демодуляция 106
 Демпфирование 61
 Детектор токовый 317
 Децибел 381-385
 Диагностика микропроцессорных систем 328
 - цифровых схем 327
 Диод германиевый 346
 - кремниевый 346
 - переключаемый 211
 - плоскостной 167
 - - обедненный слой 167
 - - характеристики 167-169
 - - рп-переход 169
 - полупроводниковый 165
 - условное обозначение 375
 Дифференциатор 81-82, 220
 Дифференцирующий элемент 147
 Диффузия 167
 Добротность 61
 Донор 166

 Единицы измерения 9,27,33,38
 - - множители 380
 - системы СИ 372
 Емкость 32

 Запоминающее устройство (ЗУ) 98
 - - оперативное (ОЗУ) 309
 - - постоянное (ПЗУ) 308
 Затвор 202
 Звук, качество 30
 - частота 27
 Звуковой канал 148

 Избирательность 60
 Извлечение корня 378
 Измерение напряжения 311
 - тока 311
 Измерительный прибор 313
 - - аналоговый 315
 - - внутреннее сопротивление 314
 - - для регистрации логического состояния 317
 - - типы 316
 - - цифровой 315
 Изолятор 165-166
 Инвертор 85, 244
 Индикатор 163
 Индикатор жидкокристаллический 302, 304-307
 - на светодиодах 302-303
 - семисегментный 356
 - цифровой 302, 357
 Индуктивность 32, 37
 - катушка 374
 Интегральная схема 217-218, 290
 - - КМОП 290
 - - ТТЛ 290, 365
 - - степень интеграции 290
 Интегратор 81, 221-222
 Интерфейс 98
 - ввода/вывода 310
 Искажения амплитудные 51-52
 - частотные 52
 Исток 202
 Источник питания 83, 150, 231
 - - импульсный 244-246
 - - нагрузочная характеристика 84
 - - постоянного тока 83
 - - стабилизированный 85, 238

 Кадр 132
 Кинескоп копланарный 142
 - масочный, дельта 141
 Кирхгофа законы 16-18

- Клиппирование *см.* Ограничение
- КМОП-схемы 365
- Колебания затухающие 62–63
- синусоидальные 20
- Команда 97
- Конвертор 85–86, 244
- Конденсатор
- емкость 33
 - зарядка 32
 - накопительный 233
 - рабочая частота 371
 - рабочее напряжение 36, 371
 - развязывающий 187–188
 - разделительный 185
 - разрядка 33
 - соединение параллельное 34
 - - последовательное 34, 162, 350
 - типы 370
 - условное обозначение 375
 - электролитический 351, 371
 - энергия 33
- Контроль внутрисхемный 343–345
- Коррекция частотная 273
- Коэффициент заполнения 27, 156
- усиления 49
 - - двух каскадов 49
 - - переменного сигнала 271
- Линия передачи 347
- Лиссажу фигуры 362
- Логика комбинаторная 293
- отрицательная 290
 - положительная 290
- Логическая схема 152
- - И 87–88, 290
 - - ИЛИ 89
 - - ИЛИ-НЕ 89–90
 - - И-НЕ 87–88
 - - Исключающее ИЛИ 90
 - - - ИЛИ-НЕ 90
 - - комбинированная 92
- - стандарты 91
 - - цифровая 87
- Логический элемент 150, 154, 163
- Магнитофон 101
- Микропроцессор 97–98, 308
- архитектура 310
 - центральный 308
- Модуляция 106
- амплитудная 108, 147, 152
 - глубина 108–109
 - импульсная 123
 - импульсно-кодовая (ИКМ) 123
 - частотная 117–119
 - широтно-импульсная (ШИМ) 146
- Молекула 165
- Монитор 97
- Мощность 18
- рассеяния 194, 352
- Мультивибратор 274
- автоколебательный 280
 - бистабильный 274–278, 336–337
 - моностабильный 274, 278
- Напряжение 8
- максимальное обратное 235
 - холостого хода 234
- Наушники 75
- Нейтрон 8
- Несущая 108
- Носители основные 202
- неосновные 202
- Обработка сигнала цифровая 96
- Обратная связь 55, 259–261
- - отрицательная 56
 - - положительная 55
- Ограничение амплитудное 78
- диодное 223

- с помощью стабилизатора 225
- - транзистора 226
- Ограничитель 219
- Ом 9
- Ома закон 10
- Оптрон 200
- Осциллограф 126, 128-130, 153-154, 316-319
- развертка 130
- синхронизация 130
- Отсчет см. Выборка

- Память 309
- микросхема 309
- Перегрузка, цепь защиты 243
- Передача двухполосная 112
- однополосная 112
- Перемодуляция 109
- Период 25
- Пиковое значение 20-21
- Повторитель напряжения 268
- эмиттерный 197
- Поле магнитное 64, 66
- - направление 64
- - результирующее двух проводников 65
- - соленоида 65-66
- Полоса пропускания 60, 250
- - ширина 103, 111-112
- Полупроводник 166
- Постоянная времени RC-цепи 38
- - RL-цепи 39
- составляющая 22
- Потенциал, разность 8, 14
- Преобразователь аналого-цифровой (АЦП) 95
- информации 102
- цифро-аналоговый (ЦАП) 95
- Принтер 97
- Пробник логический 317, 364
- Пробой тепловой 178

- Проводимость электрическая 165
- Проводник 165-166
- Программа 97
- Проницаемость магнитная 71
- Протон 8
- Процесс 378

- Радиовещание АМ 115
- ЧМ 119
- Радиопередатчик АМ 113
- Радиоприемник 113
- АМ 113
- прямого усиления 113-114
- супергетеродинный 114, 116
- - блок-схема 115
- ЧМ 120-121
- Развертка, синхронизация 145
- чересстрочная 133
- Расщепитель фаз см. Фазорасщепитель
- Регистр сдвига 299
- Резистор 366
- соединение параллельное 14-15, 151
- - последовательное 10-13
- условное обозначение 373
- Резонанс 59
- параллельный 60
- последовательный 59

- Сглаживание 235-236
- Стабилизатор 150
- Связь двунаправленная 97
- обратная 150
- по переменному току 78
- радио 106
- телеграфная 105
- телефонная 104
- электрическая 102
- Сила магнитодвижущая (МДС) 71
- электродвижущая (ЭДС) 67

- Сканирование изображения 132
 Смещение динамическое 249
 Согласование 73
 - с помощью трансформатора 74-75
 Сопротивление
 - входное 73
 - выходное 73
 - индуктивности 46
 - конденсатора 47
 - общее 11, 15
 - по постоянному току 41
 - реактивное 46
 - электрическое 9
 Среднее значение 22
 Среднеквадратическое значение 20-
 21, 23-24, 346
 Стабилизатор параллельный 238
 - последовательный 240-243
 Стабилизация 236
 Стабилитрон 210, 347
 Степень отрицательная 379
 - числа 10 379
 Сток 202
 Счетчик 295-297
 - двоичный 348, 349
 - делитель на 6 297
 - десятичный 298
 - кольцевой 299
 - частоты 94

 Таблица истинности 93, 364
 Таймер 555 274, 281-282
 Телевидение 132, 143
 - высокой четкости 143, 162, 360
 - цветное 137, 139
 - NICAM 142, 164
 Телевизор 135-136
 - блок-схема 140
 - с цифровой обработкой информации
 144
 Тембр, регулировка 263

 Термистор 373
 Тест динамический 319-320
 - статический 322
 - функциональный 319
 Тиристор однооперационный триод-
 ный 211-215, 346
 - симметричный диодный 216
 - - триодный 217
 - условное обозначение 376
 Ток электрический переменный 20
 - - постоянный 8
 - утечки 178-179
 Точки по уровню 3 дБ 50
 - - половинной мощности 50
 Тон, высота 29
 - инструментальный 29
 - чистый 29
 Транзистор биполярный 202
 - коэффициент усиления статический
 174
 - обеднение 207-209
 - обогащение 207-209
 - однопереходный 216, 350
 - паразитная емкость 251
 - полевой 202, 353
 - смещение 171
 - со структурой металл-оксид-полу-
 проводник 202, 206-209
 - тепловой пробой 179
 - униполярный 202
 - с управляющим р_n-переходом 202-
 206
 - условное обозначение 376
 - характеристики входные 172-173
 - - выходные 172-174
 - - передаточные 172, 175
 - р_{np}-типа 170
 - р_{nr}-типа 147, 170
 Трансформатор 64, 67
 - коэффициент приведения сопроти-
 вления 68-69

- КПД 68
- обмотка вторичная 67
- - первичная 67
- повышающий 68
- понижающий 68, 75
- согласующий 74
- с отводом от средней точки 70
- условное обозначение 374
- Триггер 355
- защелка 219
- Шмитта 226-227
- JK 299
- RS 300, 358
- Трубка электронно-лучевая 126, 362
- - - блок-схема 126
- - - конструкция 127
- - - система отклонения 126-127
- - - электронная пушка 127
- Уплотнение временное 125
- Усилитель 49
- графический анализ 190
- дифференцирующий 272
- - на комплементарных транзисторах 256-258
- двухкаскадный 149
- двухтактный 53, 253-255
- звуковой частоты (УЗЧ) 51, 352
- инвертирующий 266
- интегрирующий 269
- каскадный 262
- класс А 247
- класс В 247-248
- класс С 247-248
- линия нагрузки 189
- многокаскадный 250
- мощности 55, 252, 360
- напряжения 53
- неинвертирующий 269
- с общей базой 196
- с общим коллектором 197
- с общим эмиттером 176, 185
- операционный 265, 272-273, 354, 741, 748
- передаточная характеристика 175, 362
- на полевом транзисторе 356
- постоянного тока 259
- ПЧ 251
- радиочастоты 54, 261, 348
- суммирующий 267
- с трансформаторной связью 192
- характеристики входные 172-173
- - выходные 172-174
- широкополосный 54
- Hi-Fi 262
- с RC-связью 187
- Фаза, разность 42
- Фазорасщепитель 347
- Фиксатор уровня см. Триггер-защелка
- Фиксация уровня 78-79, 219, 227-230
- Фильтр верхних частот 80
- нижних частот 80
- полосовой 80
- сглаживающий 83
- RC 219-220, 351
- Форма сигнала 25
- - импульс 26
- - меандр 26
- - пилообразная 26
- - прямоугольная 26, 81-82
- - синусоида 26, 146
- - треугольная 26
- Фотогальванический элемент 199
- Фотодиод 199
- Фоторезистор 199
- Фототранзистор 199-200
- Фотоэлемент 199

Характеристика амплитудно-частотная (АЧХ) 50
- - - УЗЧ 51

Цвет основной 138
- передача 138
Цепь электрическая активная 83
- - пассивная 83
Цикл 25

Частота 25
- боковая 109-111
- девиация 117-118, 161
- диапазон 146
Часы цифровые 95

ЧМ-передача 147
- радиоприемник 152, 154

Шина 99, 311
- адресная 310

ЭДС см. Сила электродвижущая
Экранирование 71-72
Электромагнетизм 64
Электромагнит 66, 154
Электрон 8, 165
ЭЛТ см. Трубка электронно-лучевая

Ядро 165

Оглавление

Предисловие редактора	6
Предисловие	7
1 Постоянный ток	8
2 Переменный ток	20
3 Форма сигнала	25
4 Емкость и индуктивность в электрических цепях	32
5 Усилители и генераторы	49
6 Резонанс	59
7 Трансформаторы	64
8 Согласование	73
9 Преобразование формы сигнала	78
10 Источники питания I	83
11 Цифровые логические схемы и системы	87
12 Микрокомпьютеры и другие системы	97
13 Связь	102
14 Амплитудная модуляция	108
15 Частотная модуляция	117
16 Импульсная модуляция	123

17	Электронно-лучевой осциллограф	126
18	Телевидение	132
19	Упражнения I	146
20	Полупроводниковый диод	165
21	Транзисторы	170
22	Усилитель с общим эмиттером	176
23	Усилитель с общим эмиттером — режим усиления переменного тока	185
24	Усилители с общей базой и общим коллектором	196
25	Фотоэлектрические приборы	199
26	Полевые транзисторы	202
27	Другие твердотельные приборы	210
28	RC-фильтры, ограничители и фиксаторы уровня	219
29	Источники питания II	231
30	Усилители	247
31	Операционный усилитель	265
32	Мультивибраторы и таймеры	274
33	Генераторы	283
34	Логические схемы	290
35	Цифровые индикаторы	302
36	Применение микропроцессоров	308

37 Измерительные приборы	313
38 Поиск неисправностей в электронных схемах	319
39 Упражнения II	346
Приложения	366
1 Резисторы	366
2 Конденсаторы	370
3 Единицы системы СИ	372
4 Компоненты и их условные обозначения	373
5 Краткое руководство по вычислениям	378
6 Децибел	381
7 Ответы к упражнениям	386
Предметный указатель	388

Учебное издание

К. Ф. Ибрагим

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ:
ЭЛЕМЕНТЫ, СХЕМЫ, СИСТЕМЫ**

Ведущий редактор Т. Г. Хохлова

Художник В. И. Кейдан

Художественный редактор Н. В. Дубова

Технический редактор Е. В. Денюкова

Корректор В. И. Киселева

Оригинал-макет подготовлен С. А. Янковой
в пакете **ИТрХ** с использованием кириллических шрифтов,
разработанных в редакции АИП издательства «Мир»

Лицензия ЛР № 010174 от 20.05.97 г.

Подписано к печати 24.10.2000. Формат 70 × 100/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 12,50 бум. л.
Усл.-печ. л. 32,50. Уч.-изд. л. 24,07. Изд. № 6/9765.

Тираж 3000 экз. Заказ № 794

Издательство «Мир»

Министерства РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2.

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных диапозитивов
в ППП «Типография «Наука» 121099, Москва, Шубинский пер., 6

Издательство «Мир» предлагает

учебно-справочную литературу по электронике и измерительной технике

Харт Х. Введение в измерительную технику: Пер. с нем. — М.: Мир, 1999. — 391 с., ил.

Книга является одновременно учебником и краткой энциклопедией по метрологии и измерительной технике. В ней освещаются практически все актуальные вопросы современной измерительной техники.

В Германии книга выдержала пять изданий и стала популярным учебно-справочным пособием.

Для студентов и преподавателей технических вузов, а также для инженеров и научных работников.

Ибрагим К. Ф. Телевизионные приемники: Пер. с англ. — М., Мир, 2000. — 432 с., ил.

Книга английского автора полностью охватывает теорию и практику ТВ-приемников от основных принципов аналогового монохромного и цветного приема до цифрового телевидения. В ней освещены все новейшие ТВ-технологии: телетекст, спутниковое телевидение, соединитель SCART, ТВ-приемники с компьютерным управлением, цифровые устройства, применяемые в телевидении, а также цифровые звуковые стереосистемы NICAM и Dolby Surround. Отдельная глава посвящена техническому обслуживанию цифровых ТВ-приемников и декодеров. Многочисленные примеры практических схем современных ТВ-приемников познакомят читателя с новейшими решениями телевизионной схемотехники.

Книга носит характер учебника, не требующего от читателя глубоких знаний математики и электроники.

Для студентов средних и высших технических учебных заведений, техников по ремонту аппаратуры и преподавателей.

**Книги издательства «Мир»
можно приобрести по издательским ценам
в рекламно-коммерческом центре
издательства по адресу:**

Москва, 1-й Рижский пер., д. 2, корп. 2, комн. 55
(метро «Рижская», далее авт. 714 до остановки
«1-й Рижский пер.»)

тел. (095) 286-82-33

Иногородним покупателям (в пределах России)
книги высылаются наложенным платежом.
Заказы следует направлять в издательство по адресу:

129820, ГСП, Москва, И-110,
1-й Рижский пер., д. 2, коммерческая служба

тел. (095) 286-17-72

286-25-50

286-84-55

286-83-88

факс (095) 288-95-22

e-mail: victor@mir.msk.su

<http://www.mir-pubs.dol.ru>

К. Ф. Ибрагим

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ:
элементы, схемы, системы**

Дорогой читатель!

Вы держите в руках удивительную книгу. Это одновременно и учебник, и краткая энциклопедия по самому широкому спектру электронных устройств, и книга для специалистов, занимающихся обслуживанием и ремонтом электронной техники, и, наконец, отличная шпаргалка для студента, не рассчитавшего свое время перед экзаменами. Даже если Вы приступаете к ее чтению, имея за плечами познания физики и математики на уровне старших классов средней школы, и ничего не смыслите в электронике, то после прочтения сможете уверенно вступать в дискуссии о преимуществах той или иной системы ТВ или о том, как найти неисправность в схеме.



9 785030 033945