

МВД России
Санкт-Петербургский университет

Д. И. Якушев

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

ЧАСТЬ 2

Санкт-Петербург
2019

УДК 621.3
ББК 31.211:32.85
Я 49

Якушев Д. И.

Я 49 Основы электротехники и радиоэлектроники: учебное пособие. Ч. 2. — СПб.: Изд-во СПб ун-та МВД России, 2019. — 64 с.

ISBN 978-5-91837-183-1

Учебное пособие соответствует темам 9–18 программы учебной дисциплины «Основы электротехники и радиоэлектроники».

В содержании рассмотрены некоторые нелинейные элементы электрических цепей, элементы цифровой электроники и основы передачи данных.

Предназначено для обучающихся Санкт-Петербургского университета МВД России по специальности: 10.05.05 — «Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере».

УДК 621.3
ББК 31.211:32.85

Рецензенты:

Локтионов О. В., кандидат технических наук
(ГУ МВД России по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области);

Клюев С. Г., кандидат технических наук, доцент
(Краснодарский институт МВД России)

ISBN 978-5-91837-183-1

© Санкт-Петербургский университет
МВД России, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений.....	4
Введение	5
1. Нелинейные электрические цепи	7
§ 1.1. Полупроводниковые диоды	7
§ 1.2. Полупроводниковые транзисторы	12
§ 1.3. Обратная связь.....	15
§ 1.4. Операционные усилители	16
§ 1.5. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи ...	22
§ 1.6. Логические функции.....	26
§ 1.7. Цифровые комбинационные устройства	28
§ 1.8. Цифровые устройства с памятью	30
§ 1.9. Микропроцессорные устройства.....	35
2. Электротехника и электроника в системах связи.....	39
§ 2.1. Линии и каналы связи.....	39
§ 2.2. Радиоволны	42
§ 2.3. Модуляция	43
§ 2.4. Цифровое кодирование.....	48
§ 2.5. Мультиплексирование каналов связи.....	51
§ 2.6. Радиопередающие и радиоприемные устройства	54
§ 2.7. Радиоприемники.....	57
Заключение.....	59
Список рекомендуемой литературы	60

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

БВН — метод цифрового кодирования «без возвращения к нулю».

БИК — биполярный импульсный код.

БКАИ — биполярного кодирование с альтернативной инверсией.

УКВ — ультракороткие волны.

ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Начало систематического научного изучения электромагнитных процессов следует отнести ко второй половине XVII века, когда были опубликованы работы И. Ньютона, Р. Гука и Х. Гюйгенса по теории света. Это время совпадает с началом эпохи Просвещения — эпохи расцвета научной, философской и общественной мысли. Со второй половины XIX века электричество начинает находить применение в повседневной жизни, промышленности и связи. Первая половина XX века характеризовалась дальнейшим расширением номенклатуры электротехнических изделий, их стандартизацией (например, в Великобритании в конце 1920-х годов насчитывалось 28 типоразмеров электрических розеток), а также промышленным применением электричества и развитием радиосвязи. Вторую половину XX века можно охарактеризовать как эпоху всеобъемлющего вхождения электричества в повседневную жизнь, промышленное производство и средства связи. Нельзя также обойти вниманием такие два направления развития электротехники как электроника и компьютерная техника.

Оба эти направления неразрывно связаны с бурным развитием информационных систем и технологий — технологий получения, хранения и передачи информации. Физическая и техническая основа информационных систем и технологий потребовала перехода от десятичной системы счисления, принятой при передаче информации в системе субъект-субъект, к двоичной — при передаче информации в системе объект-объект. Заметим, что «объект» здесь обозначает не только информационную систему, но и любую исследуемую или контролируемую физическую величину, интенсивность которой также должна быть представлена в двоичной системе. Таким образом, информатизация потребовала представления в двоичном (цифровом) виде не только чисел и текста, но и аналоговых величин, к которым относятся практически все явления окружающей действительности. Так в 2014 году последние аналоговые приборы на международной космической станции были заменены цифровыми.

Нельзя не отметить также и развитие техники связи. Сети сотовой связи, вошедшие в нашу жизнь с 1990-х годов, своим появлением также обязаны развитию электротехники, электроники и цифровых технологий обработки и передачи информации. Сложно представить современную систему, к какой бы отрасли человеческой деятельности она ни относилась, не содержащую элементов электротехники.

Поэтому знание и понимание процессов, определяющих функционирование этих элементов, является актуальной задачей вне зависимости от области их приложения. В соответствии с п. 1 ст. 11 Федерального закона от 07.02.2011 № 3-ФЗ «О полиции», полиция в своей деятельности обязана использовать достижения науки и техники, информационные системы, сети связи, а также современную информационно-телекоммуникационную инфраструктуру. Физической основой информационных систем, сетей связи, а также современной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры являются средства электротехники и радиоэлектроники.

В этом учебном пособии рассмотрены вопросы, входящие в темы 9–18 программы дисциплины «Основы электротехники и радиоэлектроники».

В результате освоения данного курса у обучающихся закладываются основы теоретической подготовки в области электротехники и радиоэлектроники, позволяющей будущим специалистам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей им возможность использования электротехнических и радиоэлектронных средств в правоохранительной сфере; формируется научное мышление в части понимания границ применимости электротехнических и радиоэлектронных средств; вырабатываются навыки решения конкретных задач применения электротехнических и радиоэлектронных средств в правоохранительной сфере.

Изучение дисциплины отталкивается от знаний в области электромагнитных явлений, полученных курсантами в рамках школьного курса физики, и переходит к функционированию конкретных электротехнических и радиоэлектронных устройств. Представляется, что большая часть используемого математического аппарата известна обучающимся из курса математики, освоенного в школе и на первых курсах университета. Основная же сложность состоит в приобретении навыков его применения к решению конкретных задач в области электротехники и радиоэлектроники.

В целях более полного усвоения материала и повышения его понятности для обучающихся изложение построено от простого к сложному с подробным объяснением осуществляемых технических и логических переходов. В конце каждого параграфа приведен список контрольных вопросов, способствующих лучшему усвоению материала.

1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Нелинейной называется электрическая цепь, в которой присутствует хотя бы один элемент, вольт-амперная характеристика (зависимость напряжения от тока) которого при принятых допущениях не может быть аппроксимирована прямой линией.

§ 1.1. Полупроводниковые диоды

Диод — полупроводниковый двухполюсный прибор, имеющий один p - n -переход. Упрощенная структура диода показана на рис. 1.1а, а его условное графическое изображение на схемах — на рис. 1.1б. Электрод диода, подключенный к p -области, называют анодом (А), а электрод, подключенный к n -области — катодом (К). Если на анод подано положительное напряжение, а на катод — отрицательное, то считают, что на диод подано прямое напряжение, а ток диода при этом называют прямым. Если на анод подано отрицательное напряжение, а на катод — положительное, то считают, что на диод подано обратное напряжение, а ток диода при этом называют обратным.

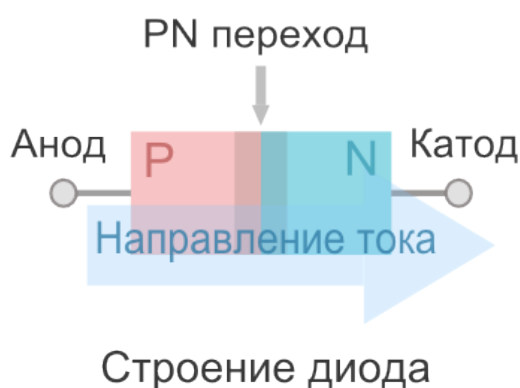


Рис. 1.1а. p - n переход в диоде



Рис. 1.1б. Обозначение диода на схеме

Рассмотрим вольт-амперную характеристику диода (рис. 1.2). Видно, что она не может быть аппроксимирована (приближена) прямой линией без значительных погрешностей. Именно поэтому диоды относят к нелинейным элементам электрических цепей. Часть вольт-амперной характеристики, находящаяся в первом квадранте, называется прямой ветвью (соответствует прямому напряжению), а часть, находящаяся в третьем квадранте — обратной (соответствует обратному напряжению).

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода соответствует открытому состоянию диода и используется в выпрямительных диодах. Частично она может быть аппроксимирована прямой линией. Отрезок, отсекаемый этой линией на оси абсцисс, равен пороговому напряжению U_0 , а котангенс угла φ , под которым эта линия пересекает ось абсцисс, представляет собой дифференциальное сопротивление R_∂ . Считается, что при значениях прямого напряжения больших U_0 вольт-амперная характеристика диода линейна:

$$U_{np} = U_0 + I_{np} \times R_\partial,$$

где U_{np} — прямое падение напряжения на диоде; U_0 — пороговое падение напряжения; I_{np} — значение прямого тока; $R_\partial = \text{ctg}\varphi$ — дифференциальное сопротивление.

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики, используемая в специальных диодах, делится на два участка:

— от 0 до U_{BR} , отображающему закрытое состояние диода. Независимо от напряжения на этом участке ток остается практически постоянным;

— менее U_{BR} , отображающему так называемый лавинный пробой, то есть лавинообразное увеличение носителей заряда в $p-n$ переходе. U_{BR} называется напряжением пробоя. На этом участке в широком диапазоне изменения тока напряжение остается практически постоянным. Это свойство диода применяется в стабилитронах — полупроводниковых приборах, используемых для стабилизации постоянного напряжения на нагрузке. Если нагрузка R_H подключена параллельно стабилитрону, то напряжение на ней будет равно напряжению на стабилитроне, то есть постоянным.

Одним из основных применений диодов является выпрямление напряжения, то есть преобразование переменного напряжения синусоидальной формы в постоянное напряжение. Для осуществления этого преобразования применяются выпрямители напряжения, которые чаще всего исполняются на полупроводниковых диодах.

На рис. 1.3 изображены схема и временная диаграмма выпрямления напряжения однофазным однополупериодным выпрямителем.

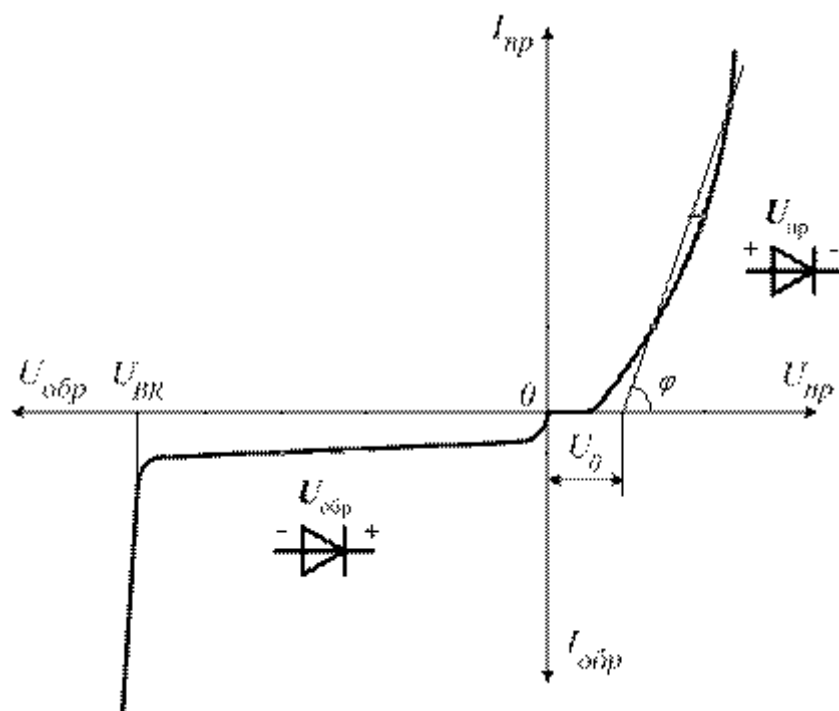


Рис. 1.2. Вольт-амперная характеристика диода



Рис. 1.3. Схема и временная диаграмма выпрямления напряжения однофазным однополупериодным выпрямителем (прямое включение)

Однофазным он называется потому, что предназначен для выпрямления напряжения только одной фазы трехфазного напряжения; однополупериодным — потому, что использует только половину периода синусоидального напряжения. Если «перевернуть» диод, то отсекается будет не отрицательная, а положительная полуволна. Среднее значение напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{cp} = U_{max}/\pi = 0.318 U_{max}.$$

Однополупериодные выпрямители используются в качестве выпрямителей сетевого напряжения в схемах, потребляющих слабый ток, а также в качестве выпрямителей импульсных источников пита-

ния. Они не пригодны в качестве выпрямителей сетевого напряжения синусоидальной формы для устройств, потребляющих большой ток.

Наиболее распространенными являются однофазные двухполупериодные выпрямители. Рассмотрим мостовую схему однофазного двухполупериодного выпрямителя, выполненного на основе диодного моста, и его работу (см. рис. 1.4).

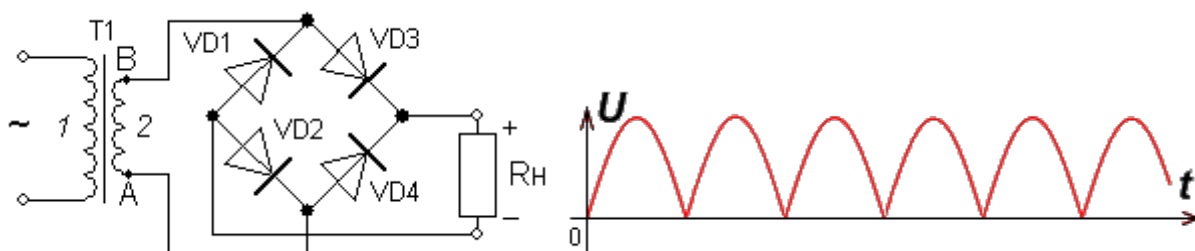


Рис. 1.4. Мостовая схема и временная диаграмма выпрямления напряжения однофазным двухполупериодным выпрямителем

Допустим, что фазовый провод подключен к точке *B*. Положительная полуволна через диод *VD3* (диод *VD1* ее не пропустит), нагрузку *R_н* и диод *VD2* попадает в точку *A*. Отрицательная полуволна через диод *VD1* (диод *VD3* ее не пропустит), нагрузку *R_н* и диод *VD4* попадает в точку *A*. Если фазовый провод подключить к точке *A*, временная диаграмма выпрямления напряжения не изменится.

Среднее значение напряжения на выходе двухполупериодного выпрямителя соответствует значению:

$$U_{cp} = 2 \times U_{max} / \pi = 0.636 U_{max}$$

Для выпрямления полученного напряжения параллельно нагрузке включают конденсатор, который, фактически, берет на себя функции фильтра нижних частот. Модуль комплексного сопротивления конденсатора: $|Z_c| = \frac{1}{\omega C}$. На нулевой частоте (постоянный ток) сопротивление конденсатора стремится к бесконечности, поэтому весь постоянный ток пойдет через сопротивление нагрузки. При увеличении частоты сопротивление конденсатора падает, и в бесконечности стремится к нулю, поэтому высокочастотные составляющие тока пойдут уже не через сопротивление нагрузки, а через конденсатор, что и требуется получить.

Схема выпрямления напряжения на выходе диодного моста в однофазном двухполупериодном выпрямителе представлена на рис. 1.5.

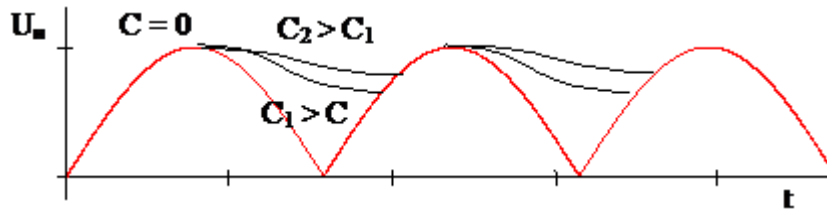


Рис. 1.5. Мостовая схема и временная диаграмма двухполупериодного выпрямителя с конденсатором

Чем больше емкость конденсатора, тем ближе к постоянному напряжению на выходе. В устройствах с повышенными требованиями к пульсациям и стабильности напряжения питания при изменении нагрузки используют выпрямители, включающими Г-образный LC -фильтр.

Если в выпрямительных диодах используется прямая ветвь вольт-амперной характеристики диода, то в специальных диодах используются другие ее участки.

Контрольные вопросы:

1. Что такое полупроводниковый диод?
2. На какие две группы делятся полупроводниковые диоды?
3. Нарисуйте обозначение диода на схеме.
4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику полупроводникового диода.
5. Нарисуйте мостовую схему диодного выпрямителя.
6. Какое устройство используют для выпрямления напряжения на выходе мостовой схемы?
7. Что такое стабилитрон?

§ 1.2. Полупроводниковые транзисторы

Транзистор — это полупроводниковый прибор, состоящий из двух смежных p - n переходов. Различают биполярные транзисторы, в которых используются кристаллы n и p типа, и униполярные (полевые) транзисторы, с одним типом проводимости.

Биполярные транзисторы — это полупроводниковые приборы, выполненные на кристаллах со структурой p - n - p -типа (а) или n - p - n -типа (б) с тремя выводами: коллектор (К), база (Б) и эмиттер (Э) (рис. 1.6).

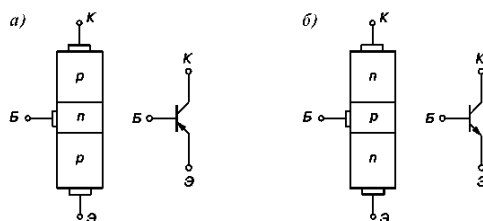


Рис. 1.6. Биполярные транзисторы p - n - p -типа (а) или n - p - n -типа (б)

В базах транзисторов p - n - p -типа ток формируется основными носителями зарядов — дырками, а в транзисторах n - p - n -типа — электронами. Транзисторы n - p - n -типа более распространены, чем транзисторы p - n - p -типа, так как обычно имеют лучшие характеристики зарядов, электроны обладают подвижностью в 2–3 раза выше, чем дырки.

База B — служит для смещения эмиттерного и коллекторного переходов. Толщина слоя базы должна быть меньше длины свободного пробега носителей заряда. Эмиттер \mathcal{E} и коллектор K — наружные слои. Эмиттер является источником носителей заряда с их концентрацией, значительно большей, чем в базе, а коллектор — приемником носителей заряда.

На переходы транзистора — (B - \mathcal{E}), (B - K) — можно подать либо прямое, либо обратное напряжение. Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном обратное, то такое включение транзистора считают нормальным, при противоположной полярности напряжений — инверсным. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

— режим отсечки — оба p - n -перехода закрыты, при этом через транзистор протекает сравнительно небольшой ток I_0 , обусловленный неосновными носителями зарядов;

— режим насыщения — оба p - n -перехода открыты;

— активный режим — один из p - n -переходов открыт, а другой закрыт.

В режимах отсечки и насыщения управление транзистором практически отсутствует. В активном режиме транзистор выполняет функцию активного элемента электрических схем усиления сигналов, генерирования колебаний, переключения и т. п.

Схему включения транзистора, при которой эмиттер является общим электродом для источников напряжения, называют схемой с общим эмиттером (рис. 1.7).

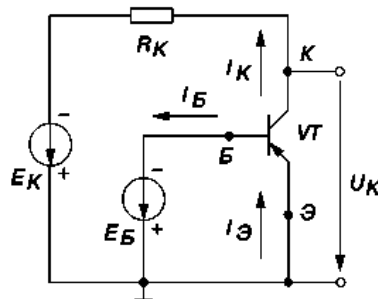


Рис. 1.7. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Для этой схемы входной характеристикой является зависимость $I_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}} = U_{\text{Б}})$ при $U_{\text{КЭ}} = U_{\text{К}} = \text{const}$, выходной — $I_{\text{К}} = f(U_{\text{КЭ}} = U_{\text{К}})$ при $I_{\text{Б}} = \text{const}$ (см. рис. 1.8).

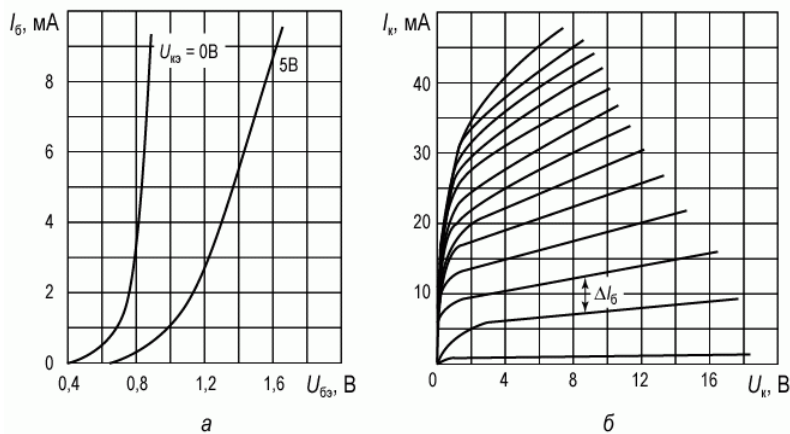


Рис. 1.8. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора при схеме включения с общим эмиттером

Физические эффекты, лежащие в основе схемы с общим эмиттером, аналогичны тем, которые лежат в основе включения транзистора в схеме с общей базой. Отличие состоит только в том, что ими удобнее пользоваться. Программы расчета цепей на компьютерах не учитывают то, по какой схеме включен транзистор. Амплитудно-частотная характеристика транзистора приведена на рис. 1.9.

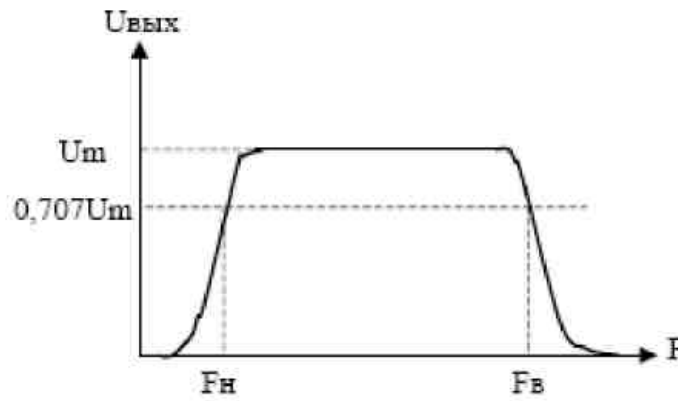


Рис. 1.9. Амплитудно-частотная характеристика усилителя с общим эмиттером

Транзисторы применяются, в основном, для усиления электрических сигналов, а также реализации переключения в электронных устройствах.

Контрольные вопросы:

1. Что такое полупроводниковый транзистор?
2. Как называются выводы полупроводникового транзистора?
3. Каковы назначения полупроводниковых транзисторов?
4. Какие схемы включения полупроводниковых транзисторов Вы знаете?

§ 1.3. Обратная связь

Обратная связь предполагает передачу части выходного сигнала электронного устройства через некоторую передаточную функцию на вход (рис. 1.10).

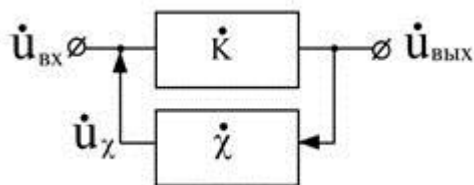


Рис. 1.10. Схема обратной связи

Коэффициент передачи цепи с обратной связью равен:

$$K_{oc} = \frac{u_{вых}}{u_{вх}} = \frac{K}{1 - K\chi}.$$

Величину $(1 - K\chi)$ называют глубиной обратной связи. Произведение $K\chi$ определяет характер и численное значение обратной связи и называется петлевым усилением. Если $K\chi < 1$, обратная связь называется положительной. Физически это означает, что при отсутствии напряжения на входе усилителя имеется напряжение на выходе. Усилитель самовозбуждается и превращается в генератор. Многие электротехнические устройства (усилители, автоколебательные системы, генераторы сигналов) базируются именно на применении положительной обратной связи. Электронные цепи, в которых возникает синусоидальное напряжение при отсутствии внешнего периодического сигнала, называются автономными автоколебательными цепями, а устройства, выполненные на их основе, — автогенераторами.

Если $K\chi > 1$, то обратная связь называется отрицательной. Такая связь уменьшает коэффициент передачи, что является недостатком. Однако при этом появляется возможность управлять другими параметрами и характеристиками устройства. Поэтому отрицательная обратная связь широко используется, а требуемая величина коэффициента усиления достигается за счет введения дополнительных каскадов усиления.

Контрольные вопросы:

1. Что такое автоколебательная система?
2. Какие виды обратной связи Вы знаете?
3. Напишите выражение для частоты автоколебаний с LC-контуром.

§ 1.4. Операционные усилители

Операционный усилитель (ОУ) — это электронное устройство, характеризующееся высоким коэффициентом усиления входного напряжения, достигающим 10^4 . Столь высокий коэффициент усиления достигается за счет применения дифференциальных каскадов (последовательно расположенных) усилителей на основе биполярных транзисторов.

Свое начало операционные усилители ведут от аналоговых компьютеров, где они применялись во многих линейных, нелинейных и частотно-зависимых схемах. Параметры схем с операционными усилителями определяются только внешними компонентами, а также небольшой температурной зависимостью или разбросом параметров при их производстве, что делает операционные усилители очень популярными элементами при конструировании электронных схем¹. С развитием электронных вычислительных машин и вытеснением аналоговых первоначальная функция ОУ была утрачена, но термин «операционный» за ними сохранился.

Реализовать высококачественный ОУ на дискретных элементах каскадов транзисторного усиления в промышленных масштабах практически невозможно. Поэтому широкое распространение ОУ получили лишь с широким использованием интегральной технологии, где несущественна сложность электрической схемы и легко решается проблема симметрии.

Предоставляемые операционными усилителями возможности по преобразованию сигналов являются востребованными как в бытовой электронике, так и в промышленности, и в приборостроении. Большинство стандартных операционных усилителей относительно дешевы (единицы рублей), но некоторые модели со специальными характеристиками, выпускаемые мелкими партиями, стоят дорого (тысячи рублей).

Изображения ОУ на принципиальных схемах приведены на рис. 1.11. В целях обеспечения удобочитаемости некоторые выводы микросхем ОУ (например, питание) на принципиальных схемах не отображаются.

¹ Схема включения с общей базой [Электронный ресурс] // Лекции.орг. URL: <https://lektsii.org/6-2277.html> (дата обращения: 20.03.2019).

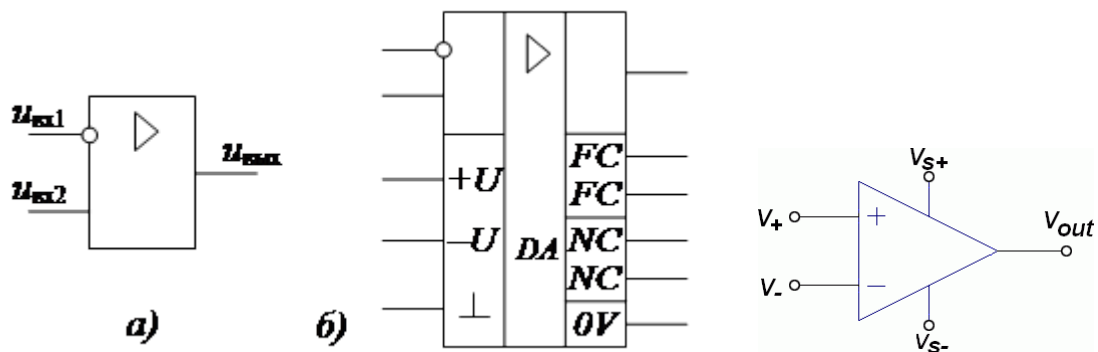


Рис. 1.11. Обозначение ОУ на схемах

Условные обозначения на схемах для ОУ, изображенных на рис. 1.11:

- неинвертирующий вход: $U_{\text{вх}2}$, V_+ ;
- инвертирующий вход: $U_{\text{вх}1}$, V_- (обозначается окружностью на входе);
- выход: $U_{\text{вых}}$, V_{out} ;
- плюс напряжения питания: $+U$, V_{S+} ;
- минус напряжения питания: $-U$, V_{S-} ;
- общий информационный вывод: $0V$;
- FC — выводы частотной коррекции. Частотная коррекция необходима, чтобы устранить возможные автоколебания при введении обратной связи;
- NC — выводы балансировки. Выводы балансировки предназначены для подключения подстроечного резистора с целью дополнительной, более точной балансировки плеч ОУ.

Принцип действия ОУ. Дифференциальный вход ОУ состоит из двух выводов: $U_{\text{вх}1}$ и $U_{\text{вх}2}$. Функции ОУ состоят в усилении разницы напряжений на дифференциальном входе, которая называется дифференциальным напряжением на входе. Напряжение на выходе ОУ определяется формулой:

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ОУ}} (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}),$$

где $U_{\text{вх}2}$ — напряжение на неинвертирующем (прямом) входе, $U_{\text{вх}1}$ — напряжение на инвертирующем входе, и $K_{\text{ОУ}}$ — коэффициент усиления ОУ при отсутствии обратной связи.

Для расчета схем на ОУ с обратной связью принимают ОУ идеальным:

- $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$, т. е. $I_{\text{вх}1} = I_{\text{вх}2}$.
- $R_{\text{вых}} = 0$, т. е. ОУ со стороны выхода является идеальным источником напряжения.

— $K_{OУ} \rightarrow \infty$, а дифференциальное напряжение на входе равно 0: $\Delta u_{ВХ} = U_{ВХ2} - U_{ВХ1} = 0$ (при этом короткое замыкание входов ОУ не допускается).

— В режиме насыщения напряжение на выходе равно по модулю напряжению питания, а знак определяется полярностью входного напряжения.

Рассмотрим электронную схему инвертирующего усилителя на основе ОУ (см. рис. 1.12).

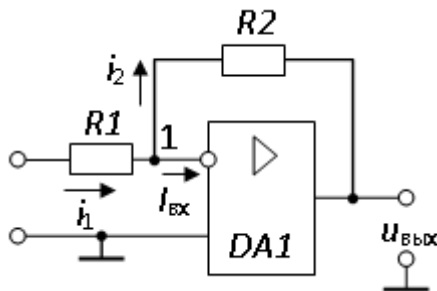


Рис. 1.12. Инвертирующий усилитель на основе ОУ

Неинвертирующий вход ОУ заземлен, поэтому напряжение на нем $U_{ВХ2} = 0$. Так как $\Delta U_{ВХ} = 0$, то напряжение на инвертирующем входе $U_{ВХ1} = 0$. Поскольку $R_{ВХ} \rightarrow \infty$, $I_{ВХ} = 0$, тогда $I_2 = I_1$ или, выразив токи через закон Ома, получим:

$$\frac{u_{вх} - 0}{R_1} = \frac{0 - u_{ввых}}{R_2}, \text{ откуда } K_U = \frac{u_{ввых}}{u_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Знак « \rightarrow » означает, что полярность выходного напряжения $U_{ВВЫХ}$ будет противоположна полярности входного $U_{ВВХ}$ (отсюда и название «инвертирующий»). Коэффициент усиления K_U такого усилителя определяется соотношением сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и не зависит от $K_{OУ}$.

Неинвертирующий усилитель на основе ОУ представлен на рис. 1.13.

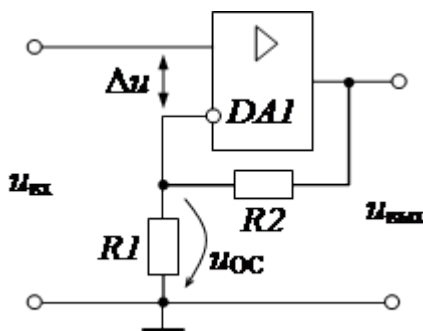


Рис. 1.13. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

Так как $\Delta U_{\text{вх}} = 0$, то

$$u_{\text{вх}} = u_{\text{оc}} = \frac{u_{\text{ввх}}}{R_1 + R_2} R_1,$$

$$K_U = \frac{U_{\text{ввх}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Коэффициент усиления напряжения также определяется соотношением сопротивлений резисторов R_1 и R_2 . Кроме того, полярность выходного напряжения совпадает с полярностью входного (отсюда — неинвертирующий).

Если на инвертирующий вход подать полностью все напряжение $U_{\text{ввх}}$, что соответствует $R_2 = 0$, то получится повторитель напряжения ($K_U = 1$). Его применяют тогда, когда требуется получить высокое входное сопротивление и/или минимальное выходное.

Замена резистора R_2 на конденсатор (рис. 1.14) дает интегрирующий усилитель, а вместо резистора R_1 — дифференцирующий усилитель.

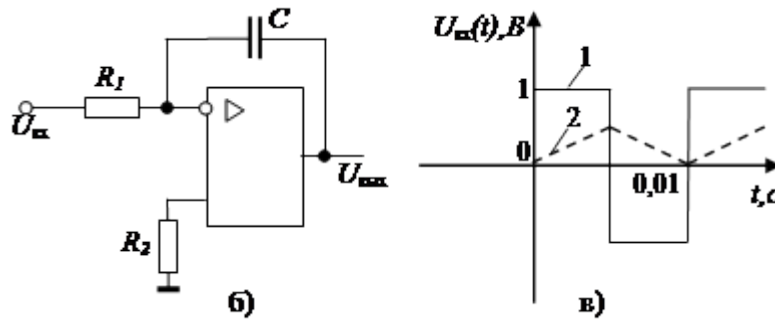


Рис. 1.14. Интегрирующий усилитель (б).

Графики входного 1 — $U_{\text{вх}}$ и выходного 2 — $U_{\text{вых}}$ напряжений (в)

На основе ОУ рассмотрим схему сумматора (рис. 1.15):

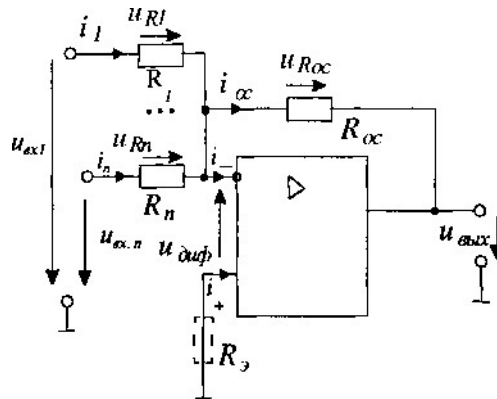


Рис. 1.15. Сумматор на основе ОУ

Предположим, что операционный усилитель работает в режиме усиления, тогда $\Delta U_{\text{ВХ}} = 0$.

Учитывая, что $I_- = I_+ = 0$, получим $\sum_{j=1}^n I_j = I_{\text{OC}}$.

Поскольку $\Delta U_{\text{ВХ}} = 0$, получим

$$U_{R_j} = U_{\text{вх}j}, \quad j = 1, \dots, n; \quad U_{\text{ROC}} = U_{\text{вх}}$$

На основании этих выражений можно получить:

$$U_{\text{вх}} = -R_{\text{OC}} * \sum_{j=1}^n \frac{U_{\text{вх}j}}{R_j}.$$

Для уменьшения влияния входных токов операционного усилителя в цепь неинвертирующего входа включают резистор с сопротивлением:

$$R_3 = R_1 || R_2 || \dots || R_n || R_{\text{OC}}.$$

Компаратор на основе операционного усилителя

Компаратор — это электронное устройство, предназначенное для сравнения двух входных сигналов.

Если неинвертирующий вход заземлить ($U_{\text{ВХ}2} = 0$), а на инвертирующий подать напряжение $U_{\text{ВХ}}$ (рис. 1.16), то при синусоидальной форме входного сигнала, на выходе компаратора сигнал будет иметь прямоугольную форму (меандр). В компараторе напряжение $U_{\text{ВХ}}$ сравнивается с нулем и в моменты, когда напряжение $U_{\text{ВХ}} = 0$ происходит инверсия сигнала.

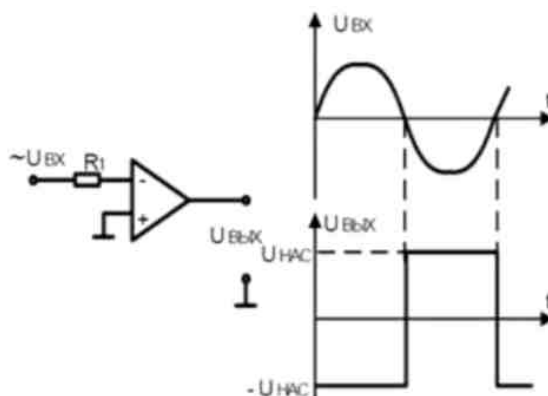


Рис. 1.16. Схема компаратора нулевого уровня

Из временной диаграммы видно, что сдвиг по фазе между входным сигналом составляет 180° ($\Delta\phi = \pi$). Если подавать напряжение $U_{\text{ВХ}}$ на неинвертирующий вход, а $U_{\text{ВХ}} = 0$ на инвертирующий, то сдвиг по фазе составит ноль градусов ($\Delta\phi = 0$).

Компаратор ненулевого уровня

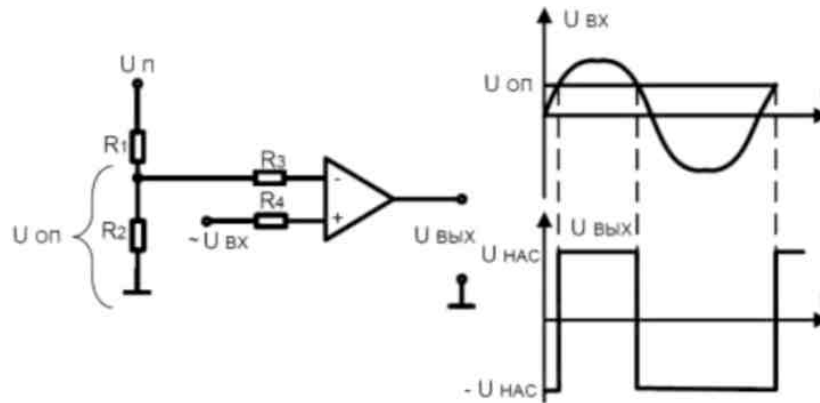


Рис. 1.17. Схема компаратора ненулевого уровня.

В схеме (рис. 1.17) входное напряжение сравнивается с ненулевым опорным напряжением ($U_{оп} \neq 0$). Опорное напряжение подается с резистивного делителя напряжения, выполненного на резисторах R_1 и R_2 . Необходимую величину опорного напряжения легко получить с помощью подбора резисторов R_1 и R_2 . В моменты, когда входное напряжение сравнивается с опорным напряжением, происходит переключение компаратора.

Относительная продолжительность включения γ — это отношение продолжительности t_1 состояния выхода компаратора с положительным напряжением $U_{вых} > 0$ к периоду T выходного напряжения $\gamma = t_1/T$.

Относительную продолжительность включения можно изменять с помощью регулирования опорного напряжения.

На основе ОУ реализуются также многие другие электронные устройства.

Контрольные вопросы:

1. Что такое операционный усилитель?
2. Каковы пределы усиления у операционных усилителей?
3. Нарисуйте обозначение операционного усилителя на схемах.
4. Какие допущения принимают при расчете схем с операционными усилителями?
5. Нарисуйте электрическую схему инвертирующего усилителя на основе ОУ.
6. Нарисуйте электрическую схему неинвертирующего усилителя на основе ОУ.
7. Нарисуйте электрическую схему компаратора на основе операционного усилителя.
8. Нарисуйте электрическую схему компаратора на основе операционного усилителя.

§ 1.5. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи

Сигналы в окружающей нас природе являются аналоговыми величинами, характеризующимися непрерывностью по времени и по амплитуде. Чувства человека, как часть природы, также воспринимают аналоговые величины. В то же время техника получения, передачи, обработки и хранения данных является цифровой, то есть рассчитана на операции с данными, представленными в двоичном коде. Отсюда возникает необходимость преобразования аналоговых величин в двоичный код и, наоборот, двоичного кода в аналоговую величину. Для этих целей служат аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи. И у тех, и у других, и на входе, и на выходе электрическая величина — напряжение.

Допустим, объектом обработки являются звуковые колебания, которые представляют собой изменение давления $p(t)$. Поскольку давление не является электрической величиной, то до проведения аналогово-цифрового преобразования эту величину необходимо преобразовать в напряжение $u(t)$. Устройство, реализующее это преобразование, называется микрофон. В микрофоне колебания давления, каким является звук, переходят в колебания мембраны — упругого элемента, а колебания мембраны, являющейся частью электрической схемы, вызывают изменение амплитуды напряжения. Устройство, реализующее преобразование неэлектрической величины в электрическую называется первичным преобразователем (датчиком). В случае работы со звуком в качестве первичного преобразователя выступает мембрана. Далее аналоговое напряжение $u(t)$ необходимо преобразовать в цифровой сигнал, так же являющийся напряжением, но со своими особенностями.

В цифровом сигнале возможны два значения: «0» и «1». Это двоичный сигнал, в котором других значений нет. Вследствие неидеальности электронных устройств для обеспечения надежности обработки информации для цифровых сигналов принято, что если напряжение может изменяться в диапазоне $[0; U_{max}]$, тогда:

$$\begin{cases} u < U_{max}/2 \Rightarrow u = 0 \\ u > U_{max}/2 \Rightarrow u = 1 \end{cases}$$

С помощью подобной избыточности цифрового сигнала обеспечивается его помехоустойчивость и, соответственно, надежность сохранности информации.

Устройство, реализующее преобразование напряжения из аналоговой формы в цифровую, называется аналогово-цифровым преобразователем.

Существует несколько основных типов архитектуры АЦП, хотя в пределах каждого типа существует также множество вариаций. В рамках этого курса рассмотрим АЦП последовательного приближения.

На вход АЦП подается аналоговое напряжение ($U_{вх}$), которое необходимо преобразовать в двоичный код (рис. 1.13). Все дальнейшие операции происходят по сигналу генератора тактовых импульсов (ГТИ). Исходным является состояние, в котором все разряды регистра (RG) установлены в 0. Затем в старший разряд заносится 1. При этом код, содержащийся в регистре равен половине диапазона. Этот двоичный код подается на ЦАП ($\#/A$), аналоговый выходной сигнал с которого, пропорциональный входному коду ЦАП, с помощью компаратора сравнивается с входным аналоговым сигналом ($U_{вх}$). Если при этом $U_{вх} > U_{ЦАП}$, то старший разряд остается равным 1, в противном случае он сбрасывается в 0. Затем устройство управления заносит 1 в следующий разряд и цикл повторяется до тех пор, пока не будет отработан младший разряд. После чего в регистре (RG) остается n -разрядный двоичный код, приближенно равный мгновенной амплитуде аналогового сигнала.

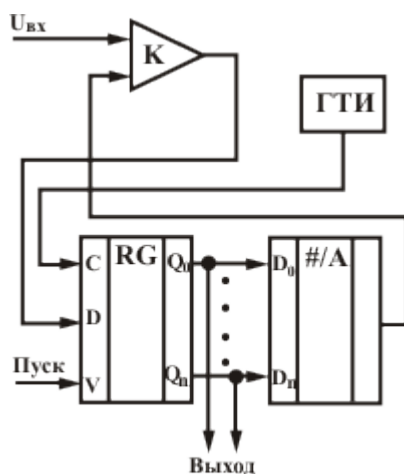


Рис. 1.13. Схема АЦП последовательного приближения

Абсолютная погрешность АЦП при таком преобразовании будет:

$$\Delta u = u_q - u_a \leq \frac{U_{\max}}{2^n}.$$

Для n -разрядного преобразования требуется n тактов, что снижает допустимую частоту дискретизации. Ее повышение возможно при реализации способа параллельного кодирования. Однако при этом значительно увеличивается количество элементов АЦП и связей между ними, а также потребляемая мощность. Например, для восьмиразрядного АЦП параллельного типа требуется 255 компараторов и около $3 \cdot 10^4$ активных

элементов, потребляющих примерно 2.5 Вт. При этом частота дискретизации может достигать 100 МГц. Однако увеличение сложности ведет к снижению надежности и увеличению стоимости АЦП.

Цифро-аналоговые преобразователи обеспечивают прием от цифрового устройства двоичного кода и преобразование его в аналоговое напряжение. Так же, как и в случае АЦП существует несколько схем построения ЦАП. Рассмотрим параллельный ЦАП с суммированием весовых токов (см. рис. 1.14).

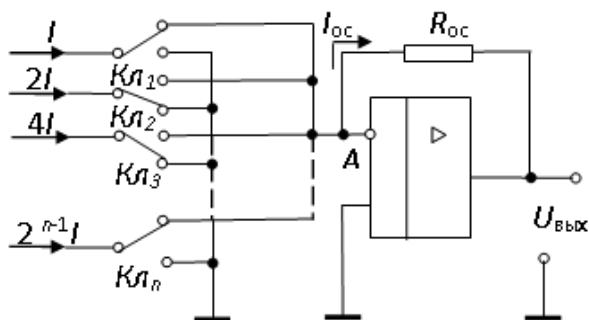


Рис. 1.14. Параллельный ЦАП с суммированием весовых токов

Входной ток ОУ равен 0, поэтому сумма токов, входящих в узел A , по первому закону Кирхгофа, равна току $\sum_{i=1}^n I_i = I_{oc}$, вытекающему из узла A . Поскольку неинвертирующий вход ОУ заземлен, $U_{вх2} = 0$. Поскольку $\Delta U_{вхОУ} = 0$, напряжение в узле A равно 0: $U_A = 0$. Тогда:

$$\sum_{i=1}^n I_i = I_{oc} = \frac{0 - U_{вых}}{R_{oc}} \Rightarrow U_{вых} = -R_{oc} \sum_{i=1}^n I_i.$$

С помощью ключей $Кл_i$ к точке A могут быть поданы токи, значения которых пропорциональны весу разрядов двоичного кода. Если значение разряда установлено в «1» — ключ замкнут, если в «0» — разомкнут. Тогда сумма токов $\sum_{i=1}^n I_i$, а значит, и $U_{вых}$ окажутся пропорциональны двоичному коду. Для создания токов, пропорциональных весу двоичных разрядов, используется решетка $R-2R$ (рис. 1.15), которую подключают к источнику опорного напряжения $U_{оп}$.

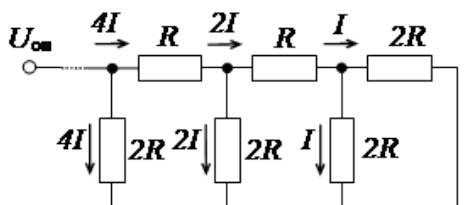


Рис. 1.15. Фрагмент решетки $R-2R$

Для каждого узла матрицы сопротивление всей цепи, расположенной правее узла, всегда равно $2R$. Поэтому ток, втекающий в узел, разделяется поровну между резистором $2R$ (вниз) и параллельной ему цепью (вправо). В следующем узле опять происходит деление втекающего тока пополам, но поскольку он в два раза меньше, чем ток, втекающий в предыдущий узел, то и через резистор $2R$ будет течь в два раза меньший ток. Таким образом, токи, текущие через резисторы $2R$, будут пропорциональны весу двоичных разрядов 2^{i-1} .

В случае применения решетки $R-2R$ возникает ограничение разрядности ЦАП, накладываемое точностными параметрами резисторов. Их можно оценить исходя из соотношения старшего и младшего разрядов: погрешность старшего разряда не должна превышать половины младшего:

$$\Delta U_{\text{ст.р.}} \leq \frac{U_{\text{мл.р.}}}{2} \Rightarrow \delta U_{\text{ст.р.}} \leq \frac{U_{\text{мл.р.}}}{2U_{\text{ст.р.}}} = \frac{1}{2^{n+1}}.$$

Если $n = 8$, то $\delta U_{\text{ст.р.}} \leq 2^{-9} \approx 1/500 = 0.002 = 0.2 \%$.

Если $n = 16$, то $\delta U_{\text{ст.р.}} \leq 2^{-17} \approx 8 \cdot 10^{-4} \%$.

Если $n = 24$, то $\delta U_{\text{ст.р.}} \leq 2^{-25} \approx 3 \cdot 10^{-6} \%$.

В настоящее время с лазерной подгонкой резисторов на одной подложке достигается точность 20–22 бита.

Контрольные вопросы:

1. Что такое цифро-аналоговый преобразователь?
2. Опишите принцип работы цифро-аналогового преобразователя с суммированием эталонных величин различных значений.
3. Каковы основные параметры, определяющие точность цифро-аналогового преобразования?
4. Что такое аналогово-цифровой преобразователь?
5. Опишите принцип работы аналогово-цифрового преобразователя с последовательным преобразованием входной величины.
6. Каковы основные параметры, определяющие точность аналогово-цифрового преобразования?
7. Каково быстродействие современных ЦАП и АЦП в интегральном исполнении?

¹ Потапов Л. А., Максимцев Е. И. Основы Промышленной электроники. Брянск: Изд-во БГТУ, 2010. 191 с.

§ 1.6. Логические функции

Логической называется переменная, которая может принимать одно из двух значений: ИСТИНА или ЛОЖЬ.

Логическая функция — функция одной или нескольких логических переменных. Следовательно, логическая функция, как и логическая переменная может принимать одно из двух значений: ИСТИНА или ЛОЖЬ. Таблица истинности — это таблица, описывающая логическую функцию (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Табличное задание логических функций

А	В	Конъюнкция	Дизъюнкция	Сложение по модулю 2 (исключающее ИЛИ)	Импликация	Эквиваленция	Штрих Шеффера	Стрелка Пирса	Отрицание
		$A \wedge B$	$A \vee B$	$A \oplus B$	$A \rightarrow B$	$A \leftrightarrow B$	$A B$	$A \downarrow B$	\bar{A}
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
1	1	1	1	0	1	1	0	0	0

Некоторое множество функций алгебры логики называется базисом, если любую функцию алгебры логики возможно выразить формулой с использованием функций этого множества. Минимальным является такой базис, для которого удаление хотя бы одной из функций, его составляющих, превращает систему функций в неполную. Булевыми функциями множество, состоящее из двух бинарных операций — конъюнкции и дизъюнкции — и унарной операции отрицания, являющееся минимальным базисом. Теоретически возможно уменьшение количества функций в базисе до двух, однако это вызывает неудобство на практике.

Физическая реализация функций булевой алгебры осуществляется на основе транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Транзисторно-транзисторная логика — разновидность цифровых логических микросхем, построенных на основе биполярных транзисторов и резисторов. Название транзисторно-транзисторный возникло из-за того, что транзисторы используются как для выполнения логических функций И, ИЛИ, НЕ, так и для усиления выходного сигнала (в отличие от резисторно-транзисторной и диодно-транзисторной логики).

Логические функции могут быть представлены в виде цифровых сигналов. В частности, булевы функции физически реализуются с помощью следующих логических элементов (см. рис. 1.16):

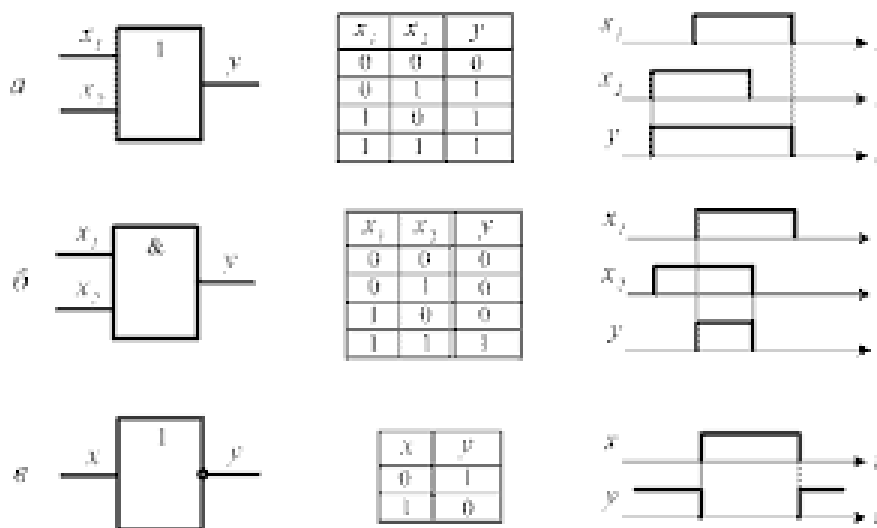


Рис. 1.16. Обозначения, таблицы истинности и временные диаграммы логических элементов: а) ИЛИ; б) И; в) отрицание

Контрольные вопросы:

1. Что такое логические функции?
2. Как задаются логические функции?
3. Каков базис алгебры логики?
4. Приведите условные обозначения логических элементов.
5. Что такое цифровые комбинационные устройства?
6. Опишите принцип работы мультиплексора.
7. Опишите принцип работы демультиплексора.
8. Опишите принцип работы шифратора.
9. Опишите принцип работы дешифратора.
10. Опишите принцип работы сумматора.

§ 1.7. Цифровые комбинационные устройства

Устройство называют комбинационным, если его выходные сигналы определяются входными сигналами. Цифровые комбинационные устройства не содержат элементов памяти. Далее рассмотрим некоторые виды цифровых комбинационных устройств.

Мультиплексором называется устройство, передающее информацию с нескольких входов на один выход. На принципиальных схемах мультиплексоры обозначают как *MUX* или *MS*. Кроме информационных входов в мультиплексоре имеются адресные входы и, как правило, разрешающие (стробирующие). Сигналы на адресных входах определяют, какой конкретно информационный канал подключен к выходу.

Рассмотрим функционирование мультиплексора с двумя входами и одним выходом, который условно изображен на рис. 1.17 в виде коммутатора, а состояние его входов X_1 , X_2 и выхода Y приведено в таблице истинности:

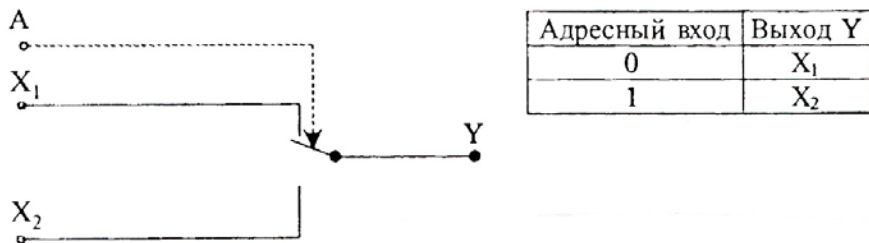


Рис. 1.17. Схема мультиплексора и таблица истинности

Исходя из таблицы истинности, можно записать следующее уравнение:

$$Y = X_1 \wedge \bar{A} \vee X_2 \wedge A.$$

Схема такого устройства и его условное графическое обозначение приведены на рис. 1.18:

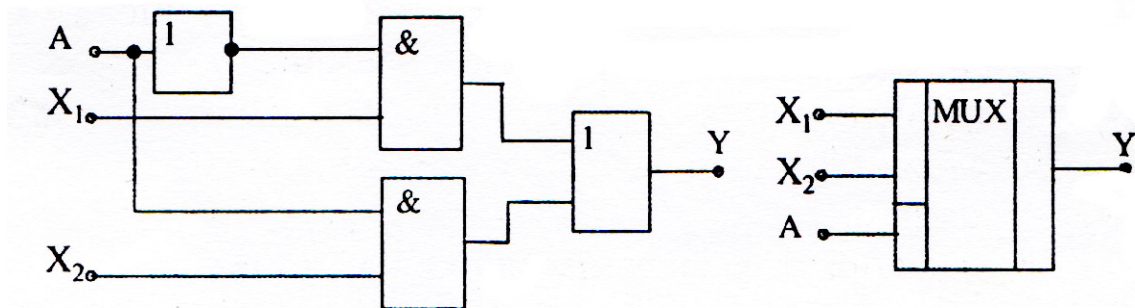


Рис. 1.18. Схема мультиплексора и его условное обозначение

Количество входов называется количеством каналов мультиплексора, а количество выходов называется числом разрядов мультиплексора. Число каналов мультиплексоров, входящих в стандартные серии, составляет от 2 до 16, а число разрядов — от 1 до 4. Применение мультиплексоров позволяет передавать данные от нескольких источников по одному каналу связи.

К цифровым комбинационным устройствам также относятся:

— демультимплексор — устройство, в котором сигналы с одного входа поступают на несколько выходов, то есть производит действие обратное действию мультиплексора. Номер выхода зависит от кода на адресной шине;

— шифратор — устройство, преобразующее десятичные числа в двоичный код;

— дешифратор — устройство, преобразующее двоичный код в десятичное число;

— другие устройства.

Связь состояний на входах и выходах каждого логического устройства определяется таблицей истинности.

Контрольные вопросы:

1. В чем отличие между цифровыми комбинационными устройствами и цифровыми устройствами с памятью?
2. Что такое триггер?
3. Какие типы триггеров Вы знаете?
4. В чем заключается основной недостаток RS-триггеров?
5. В чем состоит преимущество JK-триггеров перед другими типами триггеров?
6. Что такое регистры, и каково их назначение?
7. Какие типы счетчиков Вы знаете?
8. Какова структура десятичного счетчика?

§ 1.8. Цифровые устройства с памятью

Одним из классов цифровых устройств с памятью являются триггеры.

Триггеры — класс электронных устройств, способных устойчиво сохранять состояния выходов, скачкообразно сменяя их при изменении сигналов на входе. Обычно, триггеры имеют два выхода: прямой и инверсный. Если у триггера есть синхронизирующий вход, то он называется синхронизируемым или тактируемым, если нет — асинхронным. В цифровой технике приняты следующие обозначения входов триггеров:

S — отдельный вход установки в единичное состояние, характеризующийся напряжением высокого уровня на прямом выходе Q ;

R — отдельный вход установки в нулевое состояние, характеризующийся напряжением низкого уровня на прямом выходе Q ;

D — информационный вход, на который подается информация, предназначенная для занесения в триггер;

C — вход синхронизации;

T — счетный вход.

Наиболее распространены RS -триггер с двумя установочными входами, тактируемый D -триггер и счетный T -триггер. Работа триггеров, как логических устройств, полностью определяется таблицей истинности. Далее подробно рассмотрим функциональные возможности асинхронного RS -триггера.

В зависимости от логической структуры различают RS -триггеры с прямыми и инверсными входами. Их схемы и условные обозначения приведены на рис. 1.19. Триггеры такого типа построены на двух логических элементах 2ИЛИ-НЕ — триггер с прямыми входами (А), 2И-НЕ — триггер с инверсными входами (Б).

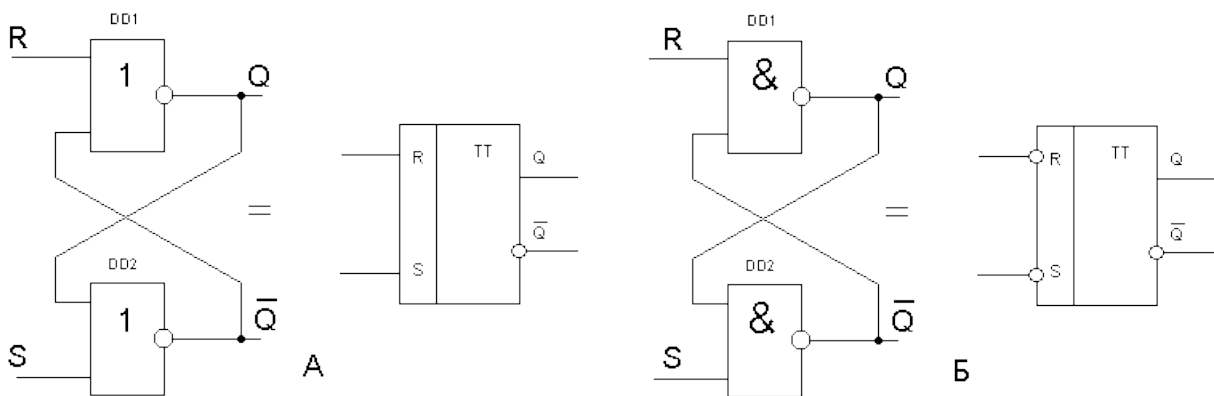


Рис. 1.19. RS -триггеры с прямыми (А) и инверсными (Б) входами

Выход каждого из элементов подключен к одному из входов другого элемента. Ниже приведены таблицы истинности для каждого из этих триггеров (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2

Таблицы истинности RS-триггеров с прямыми и инверсными входами

RS-триггер с прямыми входами						RS-триггер с инверсными входами					
S	R	Q^t	\overline{Q}^t	Q^{t+1}	\overline{Q}^{t+1}	S	R	Q^t	\overline{Q}^t	Q^{t+1}	\overline{Q}^{t+1}
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	*	*
1	1	0	1	*	*	1	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	*	*
1	1	1	0	*	*	1	1	1	0	0	1

В табл. 1.2 Q^t и \overline{Q}^t обозначают уровни, которые были на выходах триггера до подачи на его входы так называемых активных уровней. Активным называют логический уровень, действующий на входе логического элемента и однозначно определяющий логический уровень выходного сигнала (независимо от логических уровней, действующих на остальных входах). Для элементов ИЛИ-НЕ за активный уровень принимают высокий уровень, а для элементов И-НЕ — низкий уровень. Уровни, подача которых на один из входов не приводит к изменению логического уровня на выходе элемента, называют пассивными. Уровни Q^{t+1} и \overline{Q}^{t+1} обозначают логические уровни на выходах триггера после подачи информации на его входы.

Для триггера с прямыми входами $Q^{t+1} = 1$ при $S = 1$ и $R = 0$; $Q^{t+1} = 0$ при $S = 0$ и $R = 1$; $Q^{t+1} = Q^t$ при $S = 0$ и $R = 0$. При $R = S = 1$ состояние триггера будет неопределенным, так как во время действия информационных сигналов логические уровни на выходах триггера одинаковы ($Q^{t+1} = \overline{Q}^{t+1} = 0$), а после окончания их действия триггер может равновероятно принять любое из устойчивых состояний. Поэтому такая комбинация является запрещенной и может вывести триггер из строя.

Режим $S = 1, R = 0$ называют режимом записи 1 (так как $Q^{t+1} = 1$); режим $S = 0$ и $R = 1$ — режимом записи 0. Режим $S = 0, R = 0$ называется режимом хранения информации, так как информация на выходе

остается неизменной. Для триггера с инверсными входами режим записи логической 1 реализуется при $\bar{S} = 0, \bar{R} = 1$, режим записи логического 0 — при $\bar{S} = 1, \bar{R} = 0$. При $\bar{S} = \bar{R} = 1$ обеспечивается хранение информации. Комбинация $S = R = 0$ является запрещенной. Следует отметить, что самостоятельно RS -триггеры в устройствах цифровой техники практически не используются из-за их низкой помехоустойчивости¹.

Тактируемый D -триггер имеет информационный выход и вход синхронизации. Ниже приведена таблица истинности D -триггера (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Таблица истинности D-триггера

D	C	Q^{t+1}
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	1

В сериях выпускаемых микросхем есть также универсальные JK -триггеры. При соответствующем подключении входной логики JK -триггер может выполнить функции триггера любого другого типа.

Регистр — устройство, используемое для хранения n -разрядных двоичных данных и выполнения преобразований над ними. Обозначение регистров на принципиальной схеме изображено на рис. 1.20.

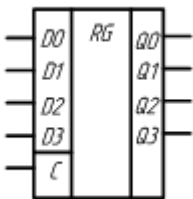


Рис. 1.20. Обозначение регистров на схеме

¹ Узлы цифровых устройств; триггеры, шифраторы, дешифраторы, преобразователи кодов, мультиплексоры и демультиплексоры, регистры, счетчики, запоминающие устройства [Электронный ресурс] // Киберпедия. URL: <https://cyberpedia.su/14xa24.html> (дата обращения: 20.03.2019).

Регистр представляет собой упорядоченный набор триггеров, число n которых соответствует числу двоичных разрядов в слове. Основой построения регистров являются D -триггеры и RS -триггеры.

Регистры делятся на:

— накопительные, которые представляют собой набор из n синхронных триггеров. Ввод и считывание информации производится одновременно во всех разрядах параллельным кодом. Запись обеспечивается тактовым импульсом, с приходом которого происходит ввод информации;

— сдвигающие, в которых помимо записи происходит перезапись информации в следующий триггер.

Счетчик — устройство, предназначенное для подсчета числа входных сигналов в двоичном коде. Каждый разряд счетчика включает в себя триггер. По назначению счетчики делятся на суммирующие и вычитающие. Кроме того, счетчики одновременно являются и делителями частоты в 2^n раз.

Суммирующий счетчик работает по принципу суммирования сигналов, поступающих на его вход (см. табл. 1.4).

Таблица 1.4

Таблица истинности трехразрядного суммирующего двоичного счетчика

Номер импульса	Состояние триггеров		
	Q1	Q2	Q3
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
8	0	0	0

Реверсивные счетчики позволяют выполнять операции суммирования и вычитания импульсов. В зависимости от сигнала управления $\pm U$ счетные входы последующих триггеров соединяются или с прямыми, или с инверсными информационными выходами предыдущих.

Десятичный счетчик состоит из декадных счетчиков, причем число декадных счетчиков равно максимальному разряду десятичных чисел, которые счетчик может считать. Каждый декадный счетчик является двоично-десятичным. Он считает в двоично-десятичном коде от 0 до 10. При поступлении на вход декадного счетчика десятого импульса все его выходы устанавливаются в нулевое состояние.

Контрольные вопросы:

1. Что такое микропроцессор?
2. Перечислите принципы микропрограммного управления.
3. Перечислите структурные составляющие микропроцессора.
4. Перечислите структурные составляющие операционного устройства.
5. Каковы функции арифметико-логического устройства?
6. Каковы функции управляющего устройства?
7. Назовите два подхода к проектированию микропроцессоров.
8. Какие подходы к проектированию микропроцессоров обеспечивают максимальное быстродействие устройства?

§ 1.9. Микропроцессорные устройства

Элементы электрических цепей и рассмотренные выше электронные устройства физически могут исполняться как отдельные компоненты для последующего монтажа на печатные платы или в другие места установки. Однако подобная технология дорогостоящая, поскольку подразумевает большое количество всевозможных операций. Поиски путей удешевления производства и монтажа электронных компонентов привели к появлению интегральных микросхем.

Интегральная микросхема — это микроэлектронное изделие, выполняющее функцию преобразования и обработки сигнала и имеющее не менее пяти элементов, созданных в кристалле полупроводника (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов), которые нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое. Заметим, что индуктивные элементы в интегральных микросхемах практически не используются вследствие невозможности уменьшения катушек до приемлемых размеров.

Впервые идея объединения множества стандартных электронных компонентов в монолитном кристалле полупроводника была выдвинута британским радиотехником Д. Даммером в 1952 году. Однако только после решения таких технологических проблем как, электрическая изоляция компонентов, сформированных на одном кристалле полупроводника, способ электрического соединения компонентов интегральных микросхем технология их серийного производства в 1960 году представилось возможным создать первую работоспособную полупроводниковую интегральную микросхему.

В настоящее время различают несколько уровней разработки интегральных микросхем:

— топологический — топологические фотошаблоны для производства.

— физический — методы реализации транзисторов в виде легированных зон на кристалле;

— электрический — принципиальная электрическая схема (резисторы конденсаторы, диоды, транзисторы и их соединения);

— схемотехнический — триггеры, компараторы, шифраторы, дешифраторы, арифметические логические устройства и другие;

— логический — логическая схема и реализующие ее логические элементы;

— программный — программирование разрабатываемого устройства.

Основными параметрами интегральных микросхем являются плотность упаковки и степень интеграции. Плотность упаковки — это число элементов в одном кубическом сантиметре объема. Степень интеграции определяется количеством элементов в одном кристалле:

- малая интегральная схема — до 100;
- средняя интегральная схема — до 1000;
- большая интегральная схема — до 10 000;
- сверхбольшая интегральная схема — > 10 000.

Переход к большим и сверхбольшим интегральным схемам позволяет:

- снизить себестоимость каждой микросхемы за счет уменьшения стоимости монтажа и ремонта;
- повысить число функций на кристалл;
- повысить надежность;
- увеличить количество и качество выполняемых функций при одновременном снижении объема и массы;
- уменьшить длину соединений и повысить быстродействие.

Перечисленные преимущества достигаются, во многом, за счет следующих операций:

- значительные начальные капитальные затраты;
- удлиненное время разработки, проектирования и изготовления;
- высокие затраты времени и средств при необходимости внесения изменений в топологию;
- уменьшение выхода годных изделий с увеличением размеров системы;
- повышенные затраты на технологическую оснастку, контрольное и испытательное оборудование.

Однако перечисленные финансовые и временные затраты, как показывает практика, окупаются преимуществами применения интегральных микросхем. Для внедрения их преимущественно подходят те области применения, где необходимо использовать определенный тип схем в большом количестве, например, микропроцессоры и процессоры для компьютеров.

Микропроцессор — это устройство, выполняющее команды, записанные в машинном коде и реализованное в виде одной микросхемы.

Функциональная и структурная организация микропроцессоров, базируется на принципах микропрограммного управления:

1. Любая операция, реализуемая устройством, рассматривается как сложное действие, которое разделяется на последовательность элементарных действий над словами информации, называемых микрооперациями.

2. Для управления порядком следования микроопераций используются логические условия, которые, в зависимости от значений слов, преобразуемых микрооперациями, принимают значения «истина» или «ложь» (1 или 0).

3. Процесс выполнения операций в устройстве описывается в форме алгоритма, представляемого в терминах микроопераций и логических условий и называемого микропрограммой. Микропрограмма определяет порядок проверки значений логических условий и следования микроопераций, необходимый для получения требуемых результатов.

4. Микропрограмма используется как форма представления функции устройства, на основе которой определяются структура и порядок функционирования устройства во времени¹.

Существует два подхода к проектированию микропроцессоров, основанных на схемной и на программируемой логике. В первом случае большинство процессов обработки данных и управления, которые должно выполнять разрабатываемое устройство, стремятся реализовать в «железе» — с помощью отдельных элементов и специально разработанных для решаемой задачи микросхем. Подобный подход позволяет обеспечить наивысшее быстродействие при выбранной элементной базе. Однако ориентация подобной разработки на конкретную задачу многократно повышает затраты на решение, по сравнению с использованием стандартных образцов, выпускаемых большими партиями.

Второй подход, основанный на использовании программной логики, предполагает написание программы на языке, обычно, высокого уровня для серийно выпускаемой микросхемы, например, процессора. Этот подход характеризуется значительно более низкими затратами, чем первый, а также значительным сокращением времени на исполнение. Платить за эти плюсы приходится быстродействием, по-

¹ Шарапов А. В. Основы микропроцессорной техники: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2008. 240 с.

сколько помимо программы процессор будет загружен исполнением служебных команд.

Выбор того или иного подхода при решении конкретной задачи зависит от ответа на вопрос: насколько важно быстродействие разработанного устройства?

Контрольные вопросы:

1. Что такое микропроцессор?
2. Перечислите принципы микропрограммного управления.
3. Перечислите структурные составляющие микропроцессора.
4. Перечислите структурные составляющие операционного устройства.
5. Каковы функции арифметико-логического устройства?
6. Каковы функции управляющего устройства?
7. Назовите два подхода к проектированию микропроцессоров.
8. Какие подходы к проектированию микропроцессоров обеспечивают максимальное быстродействие устройства?

2. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ СВЯЗИ

§ 2.1. Линии и каналы связи

Информация — сведения о лицах, предметах, фактах, событиях, явлениях и процессах независимо от формы их представления¹.

Передача и хранение информации осуществляется с помощью сигналов, позволяющих представить ее в некоторой форме.

Сообщение — это совокупность сигналов, отображающих ту или иную информацию. Передача сообщений на расстояние осуществляется с помощью материальных носителей (например, бумаги, флэш-карты и т. д.) или физических процессов (например, звуковых или электромагнитных колебаний и т. д.).

Носитель информации — любой материальный объект, способный достаточно длительное время сохранять зафиксированную на нем информацию.

Сигнал — это физический процесс, содержащий передаваемое сообщение. В качестве сигналов в настоящее время в технике, в основном, используются электрические и оптические сигналы. Сигнал передает сообщение во времени, то есть всегда является функцией времени. Сигналы формируются путем изменения тех или иных параметров физического носителя в соответствии с передаваемым сообщением.

Каналом связи называется совокупность технических средств, предназначенных для передачи электрического сигнала, содержащего сообщение.

Линия связи — это совокупность технических средств, служащих для организации на единой технической основе одного или нескольких каналов связи.

В качестве проводного канала связи используются кабели, различные виды которых будут рассмотрены далее.

Витая пара — это кабель, состоящий из пары скрученных изолированных медных проводов в единой диэлектрической оболочке. Он достаточно гибкий и удобный для прокладки. Скручивание проводов позволяет возвести к минимуму индуктивные наведения кабелей друг на друга и снизить влияние переходных процессов. Еще одним преимуществом витой пары является ее дешевизна.

¹ Ст. 2 Федерального закона от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации».

Обычно в кабель входит две (рис. 2.1) или четыре скрученных пары.

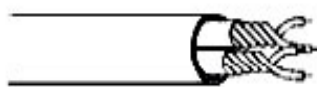


Рис. 2.1. Витая пара

Неэкранированная витая пара характеризуется слабой защищенностью, как от внешних помех, так и от перехвата информации. Перехват информации возможен как с помощью контактного метода, так и с помощью бесконтактного метода, например, перехват излучаемых кабелем электромагнитных полей. Для устранения этих недостатков применяется экранирование кабелей. Экранирование производится путем обмотки каждой витой пары в заземленную металлическую оболочку. Характеристики затухания у витой пары не позволяют ее использование на расстоянии более 100 м. Скорость передачи информации по витой паре до 4 Мбит/с, однако современные модификации витой пары позволяют передавать данные со скоростью до 10 Гбит/с.

Коаксиальный кабель до 2000-х годов был одним из самых распространенных типов кабеля (рис. 2.2), что объяснялось дешевизной, легким весом, гибкостью, удобством в установке и безопасностью. Коаксиальный кабель состоит из изолированной медной жилы, по которой передаются данные, экрана в виде металлической оплетки, защищающего данные от внешних электромагнитных сигналов, и внешней оболочки. Существует два типа коаксиальных кабелей: \varnothing 5 мм и \varnothing 10 мм, различающихся сечением медной жилы. Выбор того или иного типа кабеля зависит от потребностей конкретной сети: тонкий коаксиальный кабель способен передавать сигнал на расстояние до 185 м без его заметного искажения, вызванного затуханием, а толстый — до 500 м. Пропускная способность 100 Мбит/с.

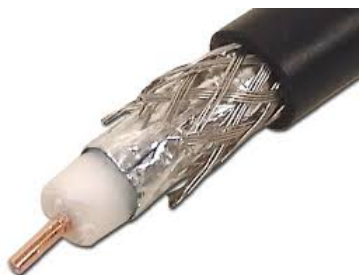


Рис. 2.2. Коаксиальный кабель

Волоконно-оптический кабель (рис. 2.3) состоит из нескольких волоконных световодов с упрочняющими элементами, заключенных в защитную оболочку. Волоконно-оптический кабель характеризуется невосприимчивостью к внешним помехам и низкими потерями, что позволяет доводить расстояния между передающим и приемным устройствами до 400–800 км. Скорость передачи данных при этом — до 3 Тбит/с. Наибольшее распространение получили волоконно-оптические кабели для передачи информационных сигналов по междугородным и трансконтинентальным линиям связи.



Рис. 2.3. Волоконно-оптический кабель

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте структурную схему технических систем связи.
2. Приведите классификацию технических систем связи.
3. Что такое канал связи?
4. Какие виды линий связи Вы знаете?
5. Приведите основные характеристики кабеля на основе витой пары.
6. Приведите основные характеристики коаксиального кабеля.
7. Приведите основные характеристики волоконно-оптического кабеля.

§ 2.2. Радиоволны

В случае беспроводной среды распространения используется передача информации с помощью радиоволн: 3–30 кГц (сверхдлинные волны — СДВ); 30–300 кГц — километровые волны (длинные волны — ДВ); 0.3–3 МГц — гектометровые (средние волны — СВ); 3–30 МГц — декаметровые (короткие волны — КВ); 30–300 МГц — метровые ультракороткие (УКВ); 300 МГц–3 ГГц — дециметровые УКВ; 3–30 ГГц — сантиметровые УКВ; 30–400 ГГц — миллиметровые УКВ.

Поскольку радиоволны распространяются со скоростью света, соотношение между частотой и длиной волны определяется известным соотношением: $\lambda = \frac{c}{\nu}$, где λ — длина волны, $c=3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, ν — частота радиоволны.

Особенности взаимодействия со средой распространения зависят от длины волны. Например, распространяться на большие расстояния в водной среде могут только сверхдлинные волны. Это свойство используется, например, для связи с подводными лодками, погруженными на глубину в сотни метров. Известно, что для приема радиосигнала длина антенны не должна быть меньше $\frac{1}{4}$ длины волны. Отсюда, чтобы принять информацию при длине волны 1 км, длина антенны должна быть не менее 250 м.

Радиоволны с длиной волны более 1 километра могут огибать Землю, отражаясь при своем распространении от ее поверхности, с одной стороны, и от нижних слоев атмосферы — с другой. В этом диапазоне частот может быть обеспечена уверенная связь на расстояниях в тысячи километров.

С уменьшением длины волны отражение волн от атмосферы ослабляется — и для УКВ атмосфера становится прозрачной, что позволяет использовать радиоволны этого диапазона для спутниковой связи. Кроме того, УКВ могут использоваться для передачи информации в зоне прямой видимости. Для увеличения дальности связи антенны УКВ устанавливают на высокие опоры. Дальность прямой видимости (D , км) определяется как $D = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$, где h_1 и h_2 — высоты опор, м.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите диапазоны радиоволн.
2. На каких волнах может производиться радиосвязь с подводными объектами?
3. Каковы характеристики распространения радиоволн УКВ диапазона?
4. Как определить дальность прямой видимости по высоте над поверхностью?

§ 2.3. Модуляция

В случае, когда требуется передать информацию на значительное расстояние, используются технические каналы связи. Каждый из каналов связи характеризуется, в числе прочего, частотным диапазоном, т. е. частотами, которые он способен передавать. В случае, когда частотный диапазон информационного сообщения не соответствует частотному диапазону канала связи, возможно воспользоваться модуляционным преобразованием.

Модуляция — изменение параметров несущего сигнала в соответствии с изменением информативного сигнала.

При модуляции используются два сигнала — несущий и информативный. В случае, когда несущим сигналом является синусоида, различаются амплитудная, частотная и фазовая модуляция (см. рис. 2.4). В качестве несущего сигнала используются синусоидальные колебания высокой частоты. Параметры этих колебаний: амплитуда, частота или фаза, а, в случае света, и поляризация, модулируются передаваемым сигналом.

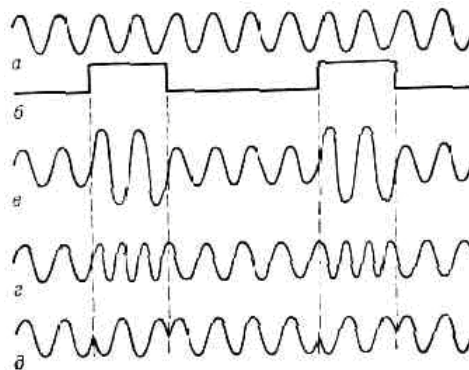


Рис. 2.4. а — гармонические колебания несущей частоты;
б — модулирующий сигнал; в — амплитудно-модулированное колебание;
г — частотно-модулированное колебание;
д — фазово-модулированное колебание

В простейшем случае модуляции амплитуды A синусоидальным сигналом модулированное колебание может быть записано в виде:

$$x(t) = A_0(1 + m\cos\Omega t)\cos(\omega_0 t + \varphi),$$

где A_0 — амплитуда, ω_0 циклическая частота исходного колебания — (несущая), Ω — циклическая частота модуляции (информационная); m — коэффициент (глубина) модуляции и характеризует степень изменения амплитуды:

$$m = (A_{max} - A_{min}) / (A_{max} + A_{min}).$$

Циклическая частота модуляции (Ω) характеризует скорость изменения амплитуды колебаний. Эта частота должна быть во много раз меньше, чем несущая частота ω_0 .

Формула колебания может быть преобразована:

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) + \frac{A_0 m}{2} \cos((\omega_0 + \Omega)t) + \frac{A_0 m}{2} \cos((\omega_0 - \Omega)t),$$

Таким образом, амплитудно-модулированное колебание представляет собой сумму трех гармонических колебаний с частотами ω_0 , $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$. Частота ω_0 называется несущей, две остальные — боковыми частотами (сателлитами). Амплитуда каждой из них равна $A_0 m/2$. В соответствии со сказанным, амплитудный спектр амплитудно-модулированного колебания выглядит следующим образом (рис. 2.5):

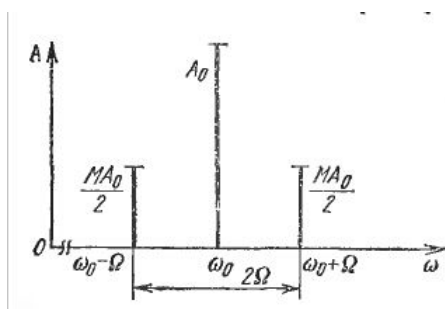


Рис. 2.5. Амплитудный спектр амплитудно-модулированного колебания

Радиостанция, передающая в режиме амплитудной модуляции, излучает не одну частоту, а спектр частот. В простейшем случае модуляции синусоидальным сигналом этот спектр содержит лишь три составляющие — одну несущую и две боковые. Если же модулирующий сигнал будет сложным, то частотный состав боковых полос также усложнится. Таким образом, каждая передающая станция занимает определенный частотный диапазон. Во избежание взаимных помех несущие частоты различных станций должны отстоять друг от друга на расстоянии, большем, чем сумма боковых полос. Ширина боковой полосы зависит от характера передаваемого сигнала; для радиовещания — 10 кГц, для телевидения — 6 МГц. Исходя из ширины боковой полосы, выбирают интервал между несущими частотами различных станций¹.

¹ Модуляция колебаний [Электронный ресурс] // Большая Советская Энциклопедия. URL: <https://litresp.ru/chitat/ru/%D0%91/bse-bse/boljshaya-sovetskaya-enciklopediya-mo> (дата обращения: 20.03.2019).

Для получения амплитудно-модулированного колебания несущей частоты ω_0 и модулирующий сигнал частоты Ω подают на специальное устройство — модулятор. После модулирования и передачи сигнала на передающей стороне встает задача восстановления информативного сигнала из модулированного колебания, или его детектирования, на принимающей стороне. Задача детектирования состоит в том, чтобы выделить из амплитудно-модулированного сигнала составляющую низкой частоты Ω . Для этого применяются детекторы, которые могут быть реализованы, в частности, в виде фильтра нижних частот.

При амплитудной модуляции полезная информация заключена только в верхней или нижней боковых полосах спектра. Основная спектральная составляющая — несущая, не несет полезной информации, т. е. мощность передатчика большей частью расходуется на передачу несущей частоты.

В случае частотной модуляции синусоидальным сигналом частота колебаний меняется по закону:

$$\omega = \omega_0 + D_\omega \cos \Omega t,$$

где D_ω — девиация частоты. При частотной модуляции полоса частот модулированного колебания зависит от величины $\beta = D_\omega / \Omega$ — индекса частотной модуляции. При $\beta < 1$ справедливо приближенное соотношение:

$$x(t) \approx A_0 (\sin \omega_0 t + \beta \times \sin \Omega t \times \cos \omega_0 t).$$

В этом случае частотно-модулированное колебание, так же, как и амплитудно-модулированное, состоит из несущей частоты ω_0 и двух спутников с частотами $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$. Поэтому при малых β полосы частот, занимаемые амплитудно- и частотно-модулированными сигналами, одинаковы. При больших индексах β спектр боковых частот значительно увеличивается (см. рис. 2.6). Кроме колебаний с частотами $\omega_0 \pm \Omega$ появляются колебания, частоты которых равны $\omega_0 \pm 2\Omega$, $\omega_0 \pm 3\Omega$ и т. д.

Полная ширина полосы частот, занимаемая частотно-модулированным колебанием с девиацией D_ω и частотой модуляции Ω , приближенно равна $2D_\omega + 2\Omega$, т. е. шире, чем при амплитудной модуляции.

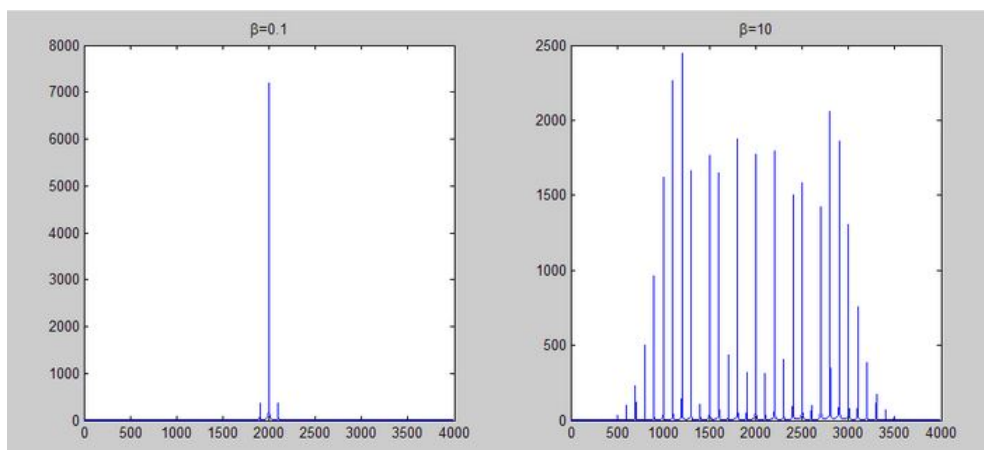


Рис. 2.6. Спектры частотно-модулированных колебаний с $\beta=0.1$ и $\beta=10$

Преимуществом частотной модуляции перед амплитудной является большая помехоустойчивость. Это качество проявляется при $\beta > 1$, когда полоса частот, занимаемая частотно-модулированным сигналом, во много раз больше 2Ω . Поэтому частотно-модулированные колебания используются для высококачественной передачи сигналов в диапазоне УКВ, где на каждую радиостанцию выделена полоса частот, в 15–20 раз большая, чем в диапазоне длинных, средних и коротких радиоволн, на которых работают радиостанции с амплитудной модуляцией. Частотная модуляция применяется также для передачи звукового сопровождения телевизионных программ. Частотно-модулированные колебания могут быть получены изменением частоты задающего генератора¹.

Основные преимущества частотно-модулированных, перед амплитудно-модулированными — энергоэффективность и помехоустойчивость. Однако, следует отметить, что при низком отношении сигнал/шум преимущества эти сходят на нет.

В случае синусоидального модулирующего сигнала фазовая модуляция близка к частотной модуляции. В случае же несинусоидального модулирующего сигнала различие между частотной и фазовой модуляцией более выражено. Существенный недостаток фазовой модуляции состоит в том, что ошибка в одном символе, может привести к некорректному приему всех последующих.

Во многих случаях модулирующий сигнал имеет вид импульса, а результирующий — цуг колебаний высокой частоты или радиоимпульсов (рис. 2.7). Цуг волн — это ряд возмущений с перерывами между ними.

¹ Большая Советская Энциклопедия (МО) [Электронный ресурс] // Электронная библиотека. URL: http://modernlib.net/books/bse/bolshaya_sovetskaya_enciklopediya_mo/read_9/ (дата обращения: 20.03.2019).



Рис. 2.7. Цуг колебаний

Радиоимпульсы используются, например, в радиолокации, иногда с дополнительной частотной модуляцией несущего сигнала. В многоканальных системах связи в качестве переносчика информации используется не гармоническое колебание, а периодическая последовательность радиоимпульсов. Такая последовательность определяется четырьмя параметрами: амплитудой, частотой следования, длительностью (шириной) и фазой. В соответствии с этим возможны четыре типа импульсной модуляции: амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, широтно-импульсная, фазово-импульсная. Импульсная модуляция обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению с модуляцией непрерывной синусоидальной несущей, но при этом полоса частот, занимаемая передающей радиостанцией с импульсной модуляцией, во много раз шире, чем при амплитудной модуляции.

В общем случае выбор метода модуляции зависит от требований, предъявляемых к системе. Например, если стоит задача массового производства радиоприемной аппаратуры, при котором основным критерием является низкая себестоимость, то выбирают амплитудную модуляцию, требующую для детектирования огибающих наиболее дешевых приемников.

Контрольные вопросы:

1. Что такое модуляция?
2. Какие виды модуляции Вы знаете?
3. Напишите аналитическое выражение для амплитудно-модулированного сигнала.
4. Напишите аналитическое выражение для частотно-модулированного сигнала.
5. Напишите аналитическое выражение для фазово-модулированного сигнала.
6. Опишите детектор для амплитудно-модулированного сигнала.
7. Опишите детектор для частотно-модулированного сигнала.

§ 2.4. Цифровое кодирование

Цифровое кодирование применяется для передачи двоичных кодов по каналам связи. При цифровом кодировании применяют потенциальные и импульсные коды. В потенциальных кодах для представления «1» и «0» используются только значение потенциала сигнала, а импульсные коды позволяют представить двоичные данные либо импульсами, либо перепадом потенциала.

При использовании прямоугольных импульсов для передачи двоичного кода необходимо выбрать такой способ кодирования, который одновременно достигал бы нескольких целей:

- наименьшая ширина спектра результирующего сигнала при одной и той же битовой скорости;
- отсутствие постоянной составляющей в сигнале.

Синхронизация между источником и приемником нужна для того, чтобы приемник точно определял время прихода очередного импульса. На небольших расстояниях применяют отдельную тактирующую линию связи. В сетях же использование ее вызывает трудности из-за неоднородности характеристик проводников, приводящих к неравномерности скорости распространения сигнала, что, в свою очередь, может привести к ошибкам при считывании информации. Не следует забывать и о стоимости прокладки отдельной тактирующей линии. Все вышесказанное привело к появлению так называемых самосинхронизирующихся кодов, в которых помимо передаваемой информации содержатся указания для передатчика о том, в какой момент времени нужно осуществлять считывание очередного бита.

Каждый из существующих кодов характеризуется своими преимуществами и недостатками, поэтому выбор какого-либо из них диктуется условиями решаемой задачи.

Метод потенциального кодирования, называется также кодированием Без Возвращения к Нулю (БВН). Формат БВН соответствует режиму работы логических схем — в пределах такта уровень не меняется, положительный перепад означает переход из 0 к 1, отрицательный — от 1 к 0. Отсутствие перепадов показывает, что значения предыдущего и последующего битов равны. При передаче последовательности единиц сигнал не возвращается к нулю в течении такта. Метод БВН прост в реализации, характеризуется высокой помехозащищенностью (всего два уровня сигнала 0 и 1), но не обладает свойством синхронизации. При высоких скоростях обмена данными и длинных после-

довательностей единиц или нулей рассогласование тактовых частот источника и приемника может привести к ошибке. Другим серьезным недостатком метода БВН является наличие низкочастотной составляющей, которая приближается к нулю при передаче длинных последовательностей единиц или нулей. Поэтому в сетях, обычно, используются различные модификации метода БВН, в которых устраняют как отсутствие самосинхронизации кода, так и наличие постоянной составляющей. Привлекательность кода БВН состоит еще и в достаточно низкой частоте основной гармоники $f_0 = V_6/2$ Гц, где V_6 — битовая скорость передачи данных (бит/с). У других методов кодирования, например, манчестерского, основная гармоника имеет более высокую частоту.

В методе Биполярного Кодирования с Альтернативной Инверсией (БКАИ) используются три значения сигнала — «-1» — отрицательный потенциал, «0» — нулевой потенциал и «+1» — положительный потенциал, что негативно сказывается на помехозащищенности, по сравнению с двухуровневым кодом, и требует увеличения мощности передатчика примерно на 3 дБ. При передаче любой битовой последовательности сигнал в линии не содержит постоянную составляющую. При передаче единиц основная гармоника сигнала находится на частоте $f_0 = V_6/2$ (Гц). В случае чередующегося набора единиц и нулей основная гармоника находится на частоте $f_0 = V_6/4$ (Гц), что в два раза меньше чем у кода БВН. Но остается проблема синхронизации при передаче последовательности нулей. В целом, использование кода БКАИ приводит к более узкому спектру сигнала, чем для кода БВН. Кроме того, код БКАИ предоставляет также некоторые возможности по распознаванию ошибочных сигналов.

$2B1Q$ — это потенциальный код с четырьмя уровнями сигнала для кодирования данных. Название отражает суть кодирования — каждые два бита ($2B$) передаются за один такт сигналом определенного уровня ($1Q$). Сигнал имеет четыре состояния: «00» соответствует потенциал -2.5 В (-3); «01» — потенциал -0.833 В (-1); «11» — потенциал $+0.833$ В ($+1$); «10» — потенциал $+2.5$ В ($+3$). Основная частота сигнала не превышает $f_0 = V_6/4$ Гц, что позволяет по одной и той же линии передавать данные в два раза быстрее, чем при БВН. Однако для реализации этого метода кодирования мощность передатчика должна быть выше, чтобы четыре значения потенциала четко различались приемником на фоне помех¹.

¹ Электронный ресурс // URL: <https://hopperletter.weebly.com/blog/potencialjni-kod-2b1q> (дата обращения: 20.03.2019).

Кроме потенциальных кодов в сетях используются импульсные коды, в которых данные представлены полным импульсом или же его частью — фронтом. Наиболее простым является Биполярный Импульсный Код (БИК), называемый также кодированием с возвратом к нулю, в котором единица представлена импульсом одной полярности, а ноль — импульсом другой полярности. Каждый импульс длится половину такта (битового интервала). В середине каждого битового интервала происходит возврат к нулевому потенциалу. БИК обладает свойством самосинхронизации — считывание синхронизируется по возврату к нулевому потенциалу в середине каждого такта. К недостаткам БИК относятся: наличие трех уровней сигнала, что требует увеличения мощности передатчика; спектр сигнала шире, чем у потенциальных кодов. Из-за широкого спектра сигнала БИК используется редко.

«При манчестерском кодировании каждый такт делится на две части. Информация кодируется перепадами потенциала в середине каждого такта. По стандарту *IEEE 802.3* единица кодируется перепадом от низкого уровня сигнала к высокому, а ноль — обратным перепадом. В начале каждого такта может происходить служебный перепад сигнала, если нужно представить несколько единиц или нулей подряд. Так как сигнал изменяется, по крайней мере, один раз за такт передачи одного бита данных, то манчестерский код обладает хорошими самосинхронизирующими свойствами. У манчестерского кода нет постоянной составляющей, а основная гармоника в худшем случае имеет частоту V_6 Гц, а в лучшем — $V_6/2$ Гц, как и у БВН. В среднем ширина спектра при манчестерском кодировании в два раза шире, чем при БВН кодировании»¹.

Контрольные вопросы:

1. Что такое цифровое кодирование сигнала?
2. Назовите требования к методам цифрового кодирования.
3. Какие виды цифровых кодов Вы знаете?

¹ Технология Ethernet [Электронный ресурс] // Лекции.ком. URL: <https://lektsii.com/2-83231.html> (дата обращения: 20.03.2019).

§ 2.5. Мультиплексирование каналов связи

Экономия количества проводов приводит к необходимости передачи нескольких потоков данных по каждому проводу. Мультиплексирование — это одновременная передача нескольких потоков данных по одному каналу связи, которая может быть реализована как аппаратными, так и программными методами (см. рис. 2.8). Принцип работы мультиплексоров разобран в § 1.7. Демультимплексор выполняет обратную функцию.

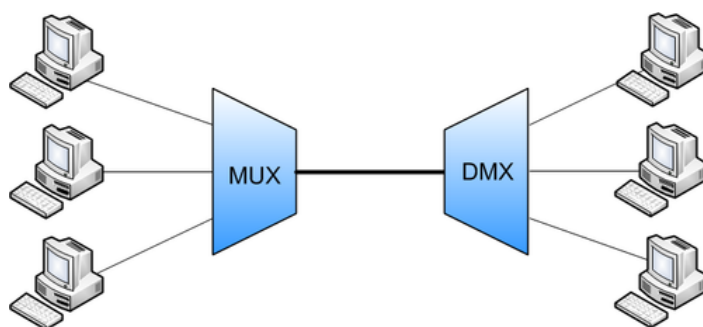


Рис. 2.8. Уплотненный канал связи

В настоящее время, для уплотнения канала связи, в основном используют:

- временное мультиплексирование;
- частотное мультиплексирование;
- волновое мультиплексирование;
- множественный доступ с кодовым разделением (*CDMA*) — каждый канал имеет свой код, наложение которого на групповой сигнал позволяет выделить информацию конкретного канала.

Технология временного мультиплексирования предусматривает объединение нескольких входных низкоскоростных каналов в один составной высокоскоростной канал (см. рис. 2.9).

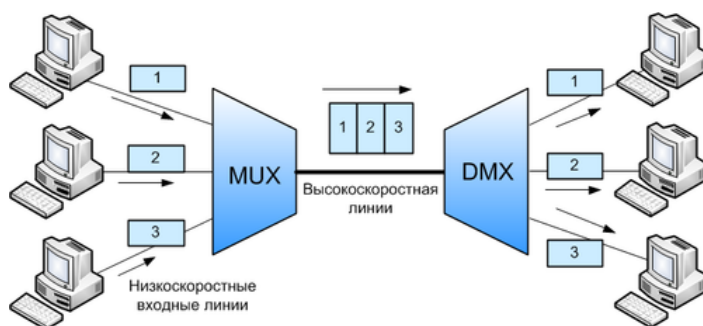


Рис. 2.9. Временное уплотнение канала связи

Мультиплексор принимает информацию по N входным каналам от конечных абонентов, каждый из которых передает данные по выходному каналу связи. Порядок байт в обойме соответствует номеру входного канала, от которого этот байт получен. Количество обслуживаемых мультиплексором абонентских каналов зависит от его быстродействия. Демультиплексор выполняет обратную задачу — он разбирает байты уплотненного кадра и распределяет их по своим нескольким выходным каналам, при этом он считает, что порядковый номер байта в обойме соответствует номеру выходного канала.

Техника частотного мультиплексирования разрабатывалась для телефонных сетей. Основная идея состоит в выделении каждому соединению собственного диапазона частот в общей полосе пропускания линии связи (см. рис. 2.10). Мультиплексирование выполняется с помощью смесителя частот, а демультиплексирование — с помощью полосового фильтра, ширина которого равна ширине диапазона канала¹.

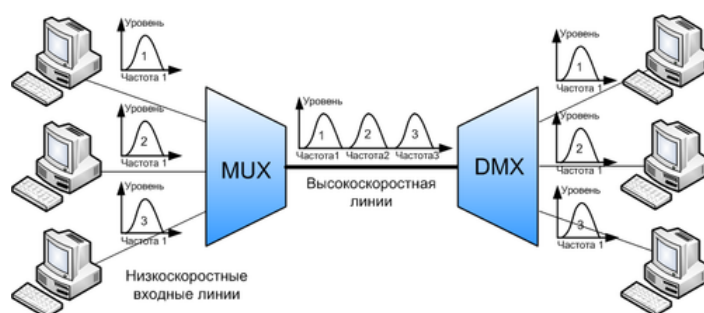


Рис. 2.10. Частотное уплотнение канала связи

В методе волнового мультиплексирования также используется принцип частотного разделения канала, но в другой области частот. Информационным сигналом является не электрический ток, а свет. Для организации каналов используются волны инфракрасного диапазона длиной от 850 до 1565 нм, что соответствует частотам от 196 до 350 ТГц.

В отличие от рассмотренных выше временного и частотного мультиплексирования каналов связи в технологии множественного доступа с кодовым разделением *CDMA* реализовано кодовое разделение каналов. В методе *CDMA* большая группа пользователей (до 50), одновременно использует общую относительно широкую полосу частот (не менее 1 МГц). Каналы трафика при таком способе разделе-

¹ Мультиплексирование [Электронный ресурс] // JustNetworks.ru. URL: <http://just-networks.ru/tekhnologii-fizicheskogo-urovnya/multipleksirovanie> (дата обращения: 20.03.2019).

ния среды создаются присвоением каждому пользователю отдельного кода, который распространяется по всей ширине полосы. В данном случае не существует временного разделения, ни частотного разделения в пределах используемой полосы. Все абоненты постоянно используют всю ширину канала. Вещание абонентов накладывается друг на друга, но поскольку их коды отличаются, они могут быть легко дифференцированы. *CDMA* мультиплексирование каналов связи широко используется в настоящее время в различных системах связи, например, сотовой телефонии.

Контрольные вопросы:

1. Что такое мультиплексирование каналов связи?
2. Какие виды мультиплексирования каналов связи Вы знаете?
3. В чем состоит различие между волновым и частотным мультиплексированием?
4. Объясните суть мультиплексирования *CDMA*.

§ 2.6. Радиопередающие и радиоприемные устройства

7 мая 1895 года на заседании Русского Физико-химического общества Александр Степанович Попов впервые продемонстрировал действие радиоприемника, а менее чем через год 24 марта 1896 года, на заседании того же общества им впервые была осуществлена передача телеграммы по радио на расстояние 250 м.

Любая система радиосвязи включает в себя передатчик, приемник и среду, в которой распространяются радиоволны от передающего к приемному устройству. Схема системы связи приведена на рис. 2.11.

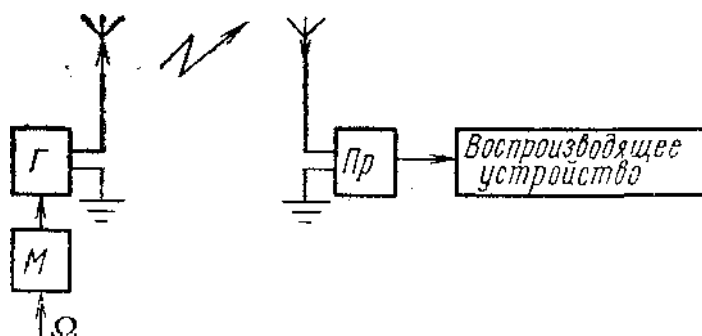


Рис. 2.11. Схема системы связи

Радиопередающие устройства (радиопередатчики) предназначены для формирования колебаний несущей частоты; модуляции их по закону передаваемого сообщения и излучения полученного радиосигнала в пространство или передачи его по физическим линиям связи.

Основные показатели радиопередатчиков:

1. Диапазон частот несущих колебаний $f_{\min} \div f_{\max}$.
2. Количество частот N внутри этого диапазона.
3. Шаг сетки рабочих частот, определяемый согласно выражению $\Delta f_{\text{ш}} = (f_{\max} - f_{\min}) / (N - 1)$. Радиопередатчик может работать на любой из фиксированных частот внутри диапазона f_1, \dots, f_N .
4. Нестабильность частоты несущих колебаний.
5. Выделенная полоса частот излучения.
6. Выходная мощность несущих колебаний — это активная мощность, поступающая от радиопередатчика в антенну.
7. Суммарная мощность, потребляемая передатчиком от источника или блока питания по всем цепям.
8. Коэффициент полезного действия — определяется как отношение выходной мощности радиопередатчика к потребляемой им мощности.

9. Вид модуляции и определяющие его параметры.

10. Параметры передаваемого сообщения.

11. Параметры, характеризующие допустимые искажения передаваемого сообщения.

12. Побочные излучения радиопередатчика¹.

Радиоприемные устройства предназначены для приема радиосигналов и преобразования их к виду, позволяющему использовать содержащуюся в них полезную информацию.

К основным характеристикам приемника относятся чувствительность, избирательность и помехоустойчивость.

Чувствительностью приемника называется его способность обеспечивать прием очень слабых полезных сигналов. Она оценивается мощностью входного радиосигнала, необходимой для получения требуемой мощности на выходе приемника при заданном отношении сигнал/шум.

Избирательность или селективность — способность приемника выделить полезный сигнал из множества других сигналов и помех, принятых антенной.

Под помехоустойчивостью приемника понимают способность приемника обеспечивать прием переданной или извлеченной информации с заданной достоверностью при выбранных видах сигналов (в том числе видов модуляции или кодирования) и наличии помех в радиоканале.

Устройства, предназначенные для излучения и приема электромагнитных колебаний, называются антеннами.

Антенны линейного типа характерны тем, что размеры поперечного сечения у них малы по сравнению с длиной волны. Обычно такие антенны выполняются из отрезка провода или нескольких проводов, либо в виде стержня. Длина антенны зависит от длины излучаемой (принимаемой) волны. Минимальная длина антенны равна $\frac{1}{4}$ длины волны. Если для коротких волн это соотношение не вызывает практических затруднений, то при изготовлении, транспортировке и размещении антенн для длинных волн (километровых и более длинных) возникают практические трудности.

Апертурные антенны имеют раскрыв (апертуру), через который проходит поток излучаемой (принимаемой) энергии.

¹ Радиопередающие и радиоприемные устройства [Электронный ресурс] // Пятифан. URL: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=40154> (дата обращения: 20.03.2019).

Антенная решетка — это совокупность идентичных излучающих (приемных) элементов, расположенных в определенном порядке и питаемых от одного или нескольких когерентных (разность фаз постоянна во времени) источников.

В последние годы, и, в первую очередь, в радиолокационных системах, широко применяются фазированные антенные решетки. Такие антенны представляют собой систему определенным образом расположенных в одной плоскости элементарных излучателей, питаемых через индивидуальные фазовращатели одним источником высокочастотных колебаний или системой когерентных источников. Электромагнитные поля, создаваемые каждым излучателем, суммируясь в пространстве вблизи антенны, образуют единый электромагнитный фронт волны с узкой диаграммой направленности. К важнейшему свойству фазированных антенных решеток относится возможность электронным способом с помощью компьютера и фазовращателей практически безынерционно изменять положение диаграммы направленности антенны в пространстве, что способствует быстрому нахождению целей в радиолокационном пространстве. Построение фазированных антенных решеток с помощью фазированных источников позволяет источникам малой мощности получать в пространстве электромагнитное поле большой мощности. Это очень важно в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн, где создание источников большой мощности затруднено. В последние годы фазированные антенные решетки применяют в мобильной и спутниковой связи в виде так называемых интеллектуальных антенн¹.

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте структурную схему радиопередачи.
2. Перечислите основные характеристики радиопередающих устройств.
3. Перечислите основные характеристики радиоприемных устройств.
4. Каковы основные факторы, влияющие на дальность радиосвязи?
5. Приведите характеристики передающих и принимающих антенн.
6. Опишите принцип действия фазированной антенной решетки.
7. Опишите характеристики фазированной антенной решетки.

¹ Антенная техника [Электронный ресурс] // Публичное акционерное общество «Радиофизика». URL: <http://www.radiofizika.ru/services/antenna-technique/> (дата обращения: 20.03.2019).

§ 2.7. Радиоприемники

Детекторный радиоприемник — это приемник, работающий за счет энергии радиоволн и не имеющий усилителя.

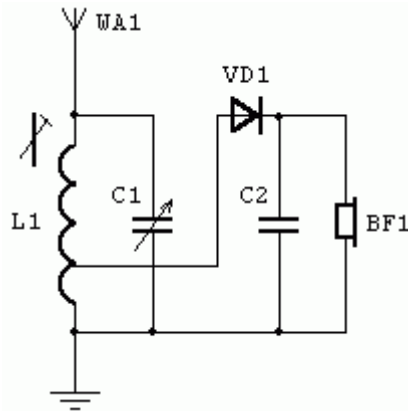


Рис. 2.12. Типовая схема детекторного радиоприемника

Радиотракт включает в себя входные цепи приемника: антенна, заземление, колебательный контур (см. рис. 2.12). Детектор представляет собой диод VD_1 и фильтрующий конденсатор C_2 . В качестве электроакустического преобразователя используются наушники или динамик.

За счет конденсатора переменной емкости колебательный контур (L_1 , C_1) настраивается на частоту принимаемой радиостанции и выделяет высокочастотный амплитудно-модулированный сигнал с частотой более 100 кГц. Из этого сигнала необходимо выделить (детектировать) колебания низкой частоты. Для этого служит диод VD_1 : положительные полуволны он пропустит, а отрицательные обнулит (см. § 1.1). Далее конденсатор C_2 шунтирует (включен параллельно) нагрузку. В этом случае он работает как фильтр нижних частот: высокочастотные составляющие сигнала пойдут через конденсатор, а низкочастотные — через нагрузку. В качестве нагрузки используется электроакустический преобразователь (BF_1) — наушники, который служит для преобразования электрического сигнала в звуковой.

Преимуществами детекторного приемника являются простота исполнения и отсутствие питания.

Недостатки классической схемы детекторного приемника:

- для согласования сопротивлений колебательного контура и диода используется катушка связи, которая уменьшает мощность, наводимую в контуре в 25–100 раз;

- используется энергия одного полупериода сигнала.

Радиоприемник прямого усиления — это тот же детекторный приемник с каскадами усиления сигнала высокой и низкой частоты. Радиоприемник прямого усиления состоит из колебательного контура, нескольких каскадов усиления высокой частоты, диодного детектора, а также нескольких каскадов усиления низкой частоты. В литературе приемники прямого усиления классифицируют по числу каскадов усилителей низкой и высокой частоты. Приемник с n -каскадами усиления высокой и m -каскадами усиления низкой частоты обозначают n - V - m , где V — обозначает детектор. Например, детекторный приемник, который можно рассматривать как частный случай приемника прямого усиления, обозначается как 0 - V - 0 . Главное преимущество приемника прямого усиления — простота конструкции. Кроме того, радиоприемники прямого усиления отличаются отсутствием паразитных излучений в эфир, что может быть важно, если необходима полная скрытость приемника. Основным недостатком приемников прямого усиления является малая избирательность, что определяет их работу в длинно- или средневолновом диапазоне.

Супергетеродинный радиоприемник — радиоприемник, в котором до детектирования принимаемого радиосигнала производится понижение его несущей частоты без изменения закона модуляции. Это наиболее распространенный вид радиоприемников. Супергетеродинный радиоприемник прост в настройке, которая, обычно, производится одной регулировочной ручкой, а также обеспечивает высокую селективность. Недостатком супергетеродинных радиоприемников является возникновение побочных каналов приема при преобразовании частоты.

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте электрическую схему детекторного радиоприемника.
2. Нарисуйте структурную схему радиоприемника прямого усиления.
3. Опишите принцип работы радиоприемника прямого усиления.
4. Опишите принцип работы супергетеродинного радиоприемника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройства, физической основой которых являются электромагнитные колебания, используются во всех сферах жизни современного общества. Это и электроснабжение зданий и сооружений, промышленное производство, сети связи, компьютерная техника и многие другие отрасли человеческого бытия. В рамках настоящего учебного пособия рассмотрены физические, математические и технологические основы проектирования и функционирования электротехнических и радиоэлектронных устройств. Особое внимание уделено переходу от линейных к нелинейным устройствам, являющихся базой для осуществления современной технологической революции. Рассмотрены также некоторые вопросы функционирования систем связи.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативные правовые акты¹:

Федеральный закон от 07.02.2011 № 3-ФЗ «О полиции».

Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации».

Федеральный закон от 07.07.2003 № 126-ФЗ «О связи».

Основная литература:

Кузовкин В. А., Филатов В. В. Электротехника и электроника: учебник для бакалавров. М.: Юрайт, 2013. — 431 с.

Якушев Д. И. Основы электротехники и радиоэлектроники. СПб.: Изд-во СПб ун-та МВД России, 2017. — 68 с.

Дополнительная литература:

Иванов И. И., Лукин А. Ф., Соловьев Г. И. Электротехника. Основные положения, примеры и задачи. 2-е изд. СПб.: Лань, 2002. — 192 с.

Частоедов Л. А. Электротехника: учебное пособие. 3-е изд. М.: Высшая школа, 1989. — 352 с.

Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. М.: Додэка-XXI, 2011. — 544 с.

¹ Нормативные правовые акты приведены в соответствии с официально действующим Интернет-порталом pravo.gov.ru.

Для заметок

Для заметок

Для заметок

Учебное издание

Якушев Денис Игоревич,
доктор технических наук

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

ЧАСТЬ 2

Редактор *Мамедова А. Х.*
Корректор *Фролова А. В.*
Компьютерная вёрстка *Фролова А. В.*

ISBN 978-5-91837-183-1



Подписано в печать 23.07.2019. Формат 60×84¹/₁₆

Печать цифровая. Объем 4 п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 96/19

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете МВД России
198206, Санкт-Петербург, ул. Летчика Пилютова, д. 1