

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

В. В. Курганов, Д. И. Зализный

ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

КУРС ЛЕКЦИЙ

для студентов специальностей

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,

1-43 01 07 «Техническая эксплуатация

электрооборудования организаций»

дневной и заочной форм обучения

В двух частях

Часть 1

Основы промышленной электроники

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2010

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73
К93

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 29.06.2009 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника»
ГГТУ им. П. О. Сухого Ю. В. Крышнев

Курганов, В. В.

К93

Электроника и информационно-измерительная техника : курс лекций для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электро-снабжение (по отраслям)», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация электрооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения. В 2 ч. Ч. 1. Основы промышленной электроники / В. В. Курганов, Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 83 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-940-1.

Рассмотрена компонентная база электроники с физическими основами функционирования полупроводниковых электронных компонентов. Даны основные положения по микропроцессорной технике.

Для студентов дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.859я73

ISBN 978-985-420-940-1 (ч. 1)
ISBN 978-985-420-941-8

© Курганов В. В., Зализный Д. И., 2010
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2010

Предисловие

Современные системы электроснабжения и теплоснабжения имеют сложную инфраструктуру, в которой электронные устройства являются неотъемлемыми элементами. Измерение, учет, управление, защита, диагностика – все эти задачи энергетики в подавляющем большинстве случаев решаются с применением электроники.

С развитием элементной базы электроники возрастает надежность и функциональность электронных устройств, что способствует их постоянному внедрению в различные сферы энергетики.

Современный инженер-энергетик в процессе проектирования систем электроснабжения или теплоснабжения должен уметь квалифицированно и корректно применять готовые электронные средства, понимать все потенциальные возможности этих средств. Для этого необходимо знать принципы работы электронных компонентов и основы функционирования электронных схем.

Часто требуется применить электронное устройство, которое промышленностью не выпускается. В этом случае инженер-энергетик должен уметь составлять техническое задание для инженеров-электронщиков или программистов, что, в свою очередь, также требует знаний основ электроники.

Этот курс лекций предназначен для студентов энергетических специальностей и представляет собой первый раздел дисциплины «Электроника и информационно-измерительная техника», который называется «Основы промышленной электроники». В нем изучаются основные электронные компоненты, а также простейшие электронные схемы и устройства.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

В зависимости от области применения электроника имеет две составляющие: радиоэлектроника и промышленная электроника.

Радиоэлектроника – это раздел электроники, изучающий электронные устройства, позволяющие передавать или принимать информацию посредством радиоволн.

Промышленная электроника – это раздел электроники, изучающий применение электронных устройств в промышленности, на транспорте, в энергетике. Промышленная электроника, в свою очередь, условно имеет два раздела: информационная электроника и силовая электроника.

Информационная электроника изучает электронные системы и устройства, связанные с измерением, контролем и управлением промышленными объектами и технологическими процессами. При этом в электронных устройствах напряжения и токи имеют небольшие значения (слаботочные электронные устройства).

Силовая электроника, которую также называют энергетической электроникой, или преобразовательной техникой, изучает способы преобразования электроэнергии для целей электропривода, электрической тяги, электроэнергетики и т. д. При этом в электронных схемах значения напряжений могут достигать до 10 000 В, а значения токов до 2000 А.

Любое электронное устройство содержит корпус и печатную плату.

Печатная плата (*printed circuit board*) – это конструкционная основа из изоляционного материала, на которой располагаются электронные компоненты, соединительные проводники и вспомогательные элементы. Печатные платы выполняют из фольгированного стеклотекстолита. Если проводники располагаются на одной стороне печатной платы, то она называется односторонней, если на двух сторонах, то двухсторонней, а если и внутри нее, то такая плата называется многослойной.

На печатной плате могут располагаться следующие электронные компоненты: резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, тиристоры, интегральные микросхемы и др. К вспомогательным элементам относят сокет, слоты, разъемы и радиаторы.

Сóкет (*socket*) – это посадочное место для интегральной микросхемы.

Слот (*slot*) – это посадочное место на печатной плате для вспомогательной печатной платы.

Разъем (*connector*) – это конструкционный элемент для соединения различных печатных плат (или устройств) между собой посредством гибких проводов. Разъемы бывают двух видов: вилки и розетки.

Радиатор (*radiator*) – это металлическая конструкция, предназначенная для отвода тепла от электронных компонентов.

Существует два основных способа монтажа электронных компонентов на печатной плате: классический монтаж и поверхностный (*SMD – Surface-Mountable Device*) монтаж. При классическом монтаже в плате сверлятся отверстия, затем в них вставляются выводы электронных компонентов и припаиваются. В случае SMD-монтажа выводы компонентов припаиваются на одной из сторон печатной платы без сверления отверстий. Как правило, при SMD-монтаже компоненты имеют значительно меньшие размеры, чем классические, что позволяет получать миниатюрные устройства. В подавляющем большинстве современных электронных устройств используют SMD-монтаж.

Электронные схемы делят на аналоговые, цифровые и аналого-цифровые. Соответственно, первые работают с аналоговыми сигналами, вторые – с цифровыми сигналами, а третьи – и с теми и с другими.

Аналоговым (*analog signal*) – называют сигнал, описываемый непрерывной или кусочно-непрерывной функцией. В первом случае сигнал называют аналоговым непрерывным, а во втором – аналоговым дискретным.

Цифровым (*digital signal*) – называют сигнал, который в любой момент времени может принимать только одно из двух значений, соответствующих логическому «0» и логической «1».

Примеры аналоговых и цифровых сигналов приведены на рис. 1.1.

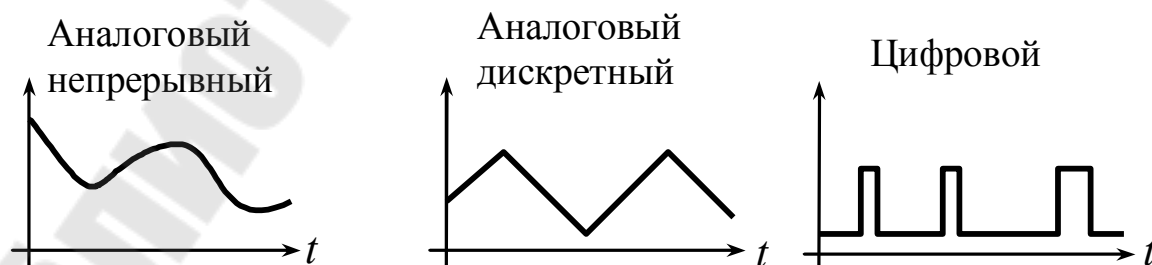


Рис. 1.1. Примеры аналоговых и цифровых сигналов

2. КОМПОНЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОНИКИ

2.1. Резисторы, конденсаторы, дроссели

Резистор (*resistor*) – это компонент электронной техники, предназначенный для создания активного сопротивления в цепи. Резисторы бывают постоянные и переменные. Переменные, в свою очередь, разделяются на регулировочные и подстроечные. Условные обозначения резисторов приведены на рис. 2.1.

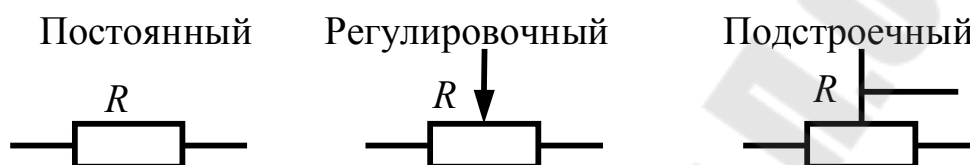


Рис. 2.1. Условные графические обозначения резисторов

Регулировочные резисторы применяются для изменения пользователем параметров устройства и выносятся на лицевую панель. Например, для изменения величины напряжения или тока выходного сигнала. Подстроечные резисторы предназначены для регулировки параметров устройства в процессе его наладки и располагаются на печатной плате. В современных устройствах переменные резисторы применяются все реже в силу своей низкой надежности.

Резисторы характеризуются номинальным сопротивлением, процентным отклонением сопротивления (допуском), номинальной мощностью и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). В условном обозначении резистора, например, С2-29-0,125-1,5к-0,5 %-С указано: С2-29 – тип; 0,125 – мощность, Вт; 1,5 – сопротивление, кОм; $\pm 0,5\%$ – допуск; С – класс ТКС.

На корпусе резистора номинальные сопротивления могут обозначаться в соответствии со следующими правилами: 10к = 10 кОм; 1к5 = 1,5 кОм; М47 = 0,47 МОм = 470 кОм; 100R = 100 Ом и т. д.

Номинальные сопротивления резисторов выбираются из стандартных рядов. Например, ряд Е12 имеет 12 коэффициентов: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,1. Из этого ряда могут быть выбраны сопротивления: 1,2 кОм; 470 Ом; 0,68 МОм и т. д.

Резисторы с допуском меньше 1 % называют **прецизионными** (точными). Так резистор типа С2-29 является прецизионным.

ТКС характеризует зависимость изменения сопротивления резистора при изменении окружающей температуры на один градус °С. В простейшем случае эта зависимость описывается выражением

$$R(\theta) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta), \quad (2.1)$$

где θ – температура; α – ТКС; R_0 – значение сопротивления при $\theta = 0$ °С.

Например, для резистора С2-29 класса ТКС С $\alpha \approx 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{С}$.

Конструктивно резисторы бывают проволочные, непроволочные и металлофольговые. Непроволочные, в свою очередь, делятся на тонкопленочные, толстопленочные и объемные. Так резистор С2-29 является непроволочным тонкопленочным металлодиэлектрическим.

Конденсатор (*capacitor*) – это компонент электронной техники, предназначенный для создания емкостного сопротивления в цепи.

Конденсаторы характеризуются номинальной емкостью, процентным отклонением емкости (допуском), номинальным напряжением и температурным коэффициентом емкости (ТКЕ). Например, К75-10-250В-0,47мкФ-5%-В: конденсатор типа К75-10 с номинальным напряжением 250 В, номинальной емкостью 0,47 мкФ, допуском $\pm 5 \%$, класса ТКЕ В.

На корпусе конденсатора номинальные емкости могут обозначаться в соответствии со следующими правилами: 10 мк = 10 мкФ; 1μ5 = 1,5 мкФ; 47п = 47 нФ; 100 = 100 пФ и т. д.

Номинальные сопротивления конденсаторов также выбираются из стандартных рядов. Например, в ряде Е12 значение коэффициентов практически совпадают с рядом Е12 для резисторов.

Зависимость емкости от температуры подчиняется линейному закону аналогично формуле (2.1).

Конструктивно конденсаторы бывают с органическими, неорганическими и оксидными диэлектриками. Так конденсатор типа К75-10 имеет органический полиэтилентетрафталатный (лавсановый) диэлектрик.

Наибольшей емкостью обладают конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролиты). Их емкость может достигать 10 000 мкФ. Причем эти конденсаторы являются полярными, т. е. для них имеет значение полярность подаваемого напряжения.

Дроссель (*throttle*) – это компонент электронной техники, предназначенный для создания индуктивного сопротивления в цепи. Условное обозначение дросселя приведено на рис. 2.2.

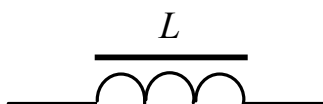


Рис. 2.2. Условное графическое обозначение дросселя

Дроссели характеризуются номинальной индуктивностью, номинальным током, максимальным значением переменного напряжения и значением активного сопротивления обмоток.

Конструктивно дроссель состоит из одной или нескольких обмоток, а также магнитопровода из ферромагнитного материала.

2.2. Диоды

Диод (*diode*) – это полупроводниковый компонент электронной техники, выполненный на основе одного *p-n* перехода, основным физическим свойством которого является способность пропускать ток только в одном направлении.

Диоды изготавливают на основе кремния (Si), легированного алюминием (кремний *p*-типа) или фосфором (кремний *n*-типа). В современных диодах применяют также антимонид индия (InSb) и арсенид галлия (GaAs). Бывают также германиевые диоды (Gr).

Конструктивно диод состоит из двух полупроводников разного типа электропроводности и электродов, подключенных к ним. Электрод, подключенный к полупроводнику *p*-типа называют *анодом*, а электрод, подключенный к полупроводнику *n*-типа называют *катодом*.

Если положительный потенциал внешнего источника подключен к аноду, а отрицательный к катоду, то диод работает в режиме прямого смещения *p-n* перехода. Процессы, протекающие в диоде в этом режиме, отображены на рис. 2.3.

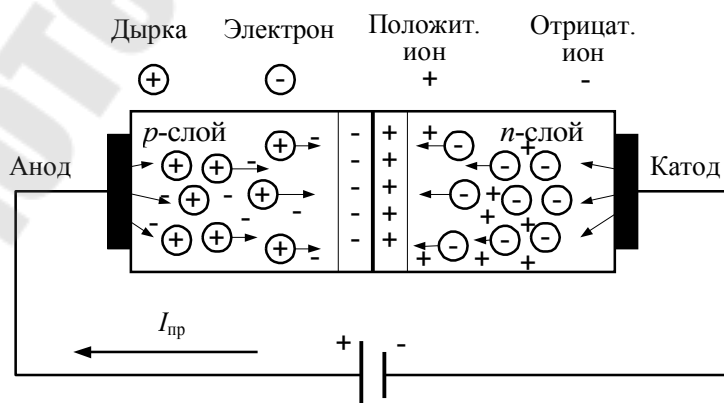


Рис. 2.3. Работа *p-n* перехода в режиме прямого смещения

При таком способе подключения внешний источник служит поставщиком дырок в p -слой и поставщиком электронов в n -слой. Таким образом, концентрация и энергия основных носителей зарядов возрастают в обоих слоях, что приводит к их интенсивной диффузии в противоположные слои и их рекомбинации (эквивалентном соединении с образованием нейтрального атома). При этом на границе соединения формируется обедненный дырками и электронами слой, состоящий, в основном, из положительных (со стороны n -слоя) и отрицательных (со стороны p -слоя) ионов, образуя разность потенциалов, т. е. потенциальный барьер для основных носителей заряда. Этот барьер создает некоторое сопротивление, но недостаточно высокое, чтобы препятствовать протеканию прямого тока $I_{пр}$. При увеличении напряжения внешнего источника ширина обедненного слоя и потенциальный барьер снижаются, сопротивление p - n перехода также снижается, что приводит к увеличению прямого тока $I_{пр}$.

Если положительный потенциал внешнего источника подключен к катоду, а отрицательный к аноду, то диод работает в режиме обратного смещения p - n перехода. Процессы, протекающие в диоде в этом режиме, отображены на рис. 2.4.

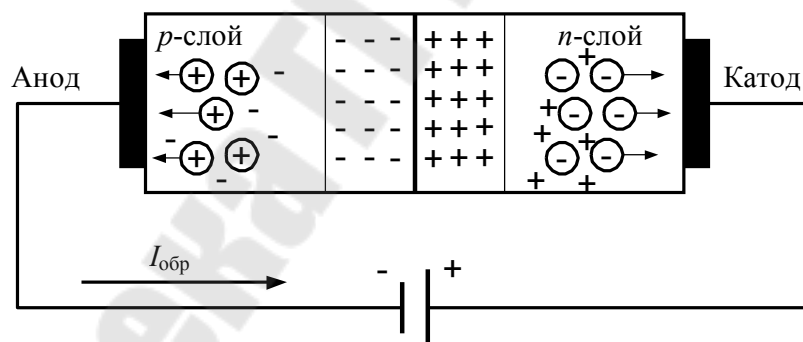


Рис. 2.4. Работа p - n перехода в режиме обратного смещения

При таком способе подключения внешний источник забирает на себя дырки из p -слоя и электроны из n -слоя. Таким образом, концентрация и энергия основных носителей зарядов снижаются в обоих слоях. При этом ширина обедненного слоя и потенциальный барьер существенно возрастают. Возрастает соответственно и сопротивление p - n перехода. В цепи протекает обратный ток $I_{обр}$, который создается неосновными носителями заряда и намного меньше прямого тока $I_{пр}$.

Таким образом, диод обладает вентилянными свойствами, т. е. пропускает ток только в одном направлении. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода приведена на рис. 2.5. На ней можно выделить следующие характерные области: насыщение, нормальный режим, зона нечувствительности, обратный ток, электрический пробой, тепловой пробой.

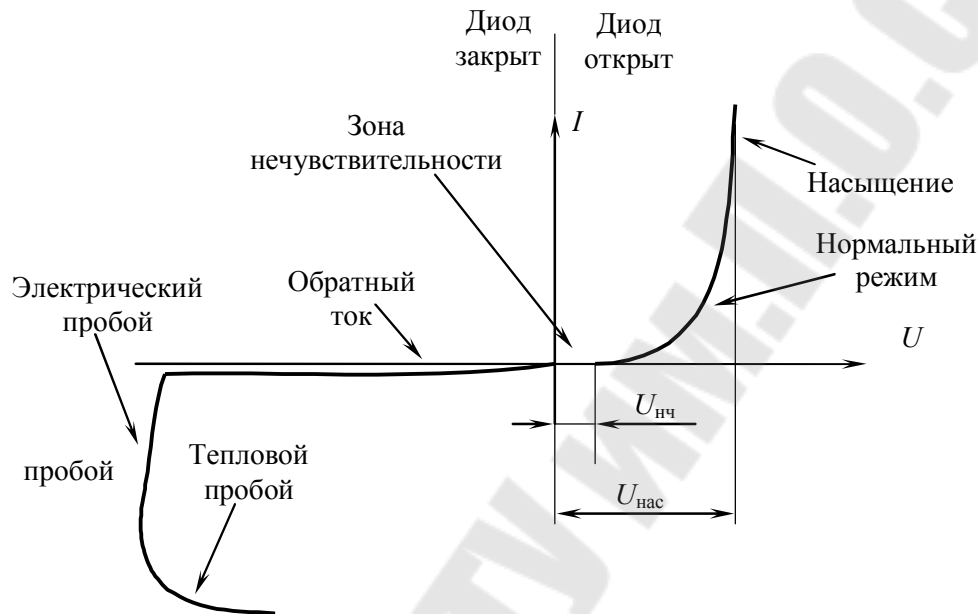


Рис. 2.5. Вольт-амперная характеристика диода

В области насыщения увеличение прямого тока через диод не приводит к изменению падения напряжения на нем. Это напряжение равно напряжению насыщения диода $U_{нас}$. У кремниевых диодов $U_{нас} < 1,2$ В. Если $U_{нас} > 1,2$ В, то диод неисправен.

В области нормального режима прямая ветвь ВАХ описывается уравнением

$$I_{пр} = I_{обр} \cdot \left(e^{\frac{U_{пр}}{\varphi_T}} - 1 \right), \quad (2.2)$$

где $U_{пр}$ – падение напряжения на прямосмещенном диоде; φ_T – температурный потенциал.

Зона нечувствительности обусловлена необходимостью приложить к $p-n$ переходу некоторое напряжение $U_{нч}$, необходимое для преодоления потенциального барьера. У кремниевых диодов $U_{нч} \approx 0,1$ В.

В области протекания обратного тока диод закрыт. При повышении обратного напряжения происходит электронный пробой $p-n$ перехода и обратный ток резко возрастает. В этом режиме диод не выходит из строя, если значение обратного тока не достигает критического, при котором наступает тепловой пробой и $p-n$ переход разрушается.

Основными эксплуатационными характеристиками диодов являются: максимальный прямой средний ток $I_{пр\ max}$, максимальное обратное напряжение $U_{обр\ max}$ и максимальная рассеиваемая мощность P_{max} .

Диоды бывают: выпрямительные, импульсные, стабилитроны, фотодиоды и светодиоды (бывают также и специальные диоды туннельный, варикап и т. д.).

Условные обозначения диодов приведены на рис. 2.6.

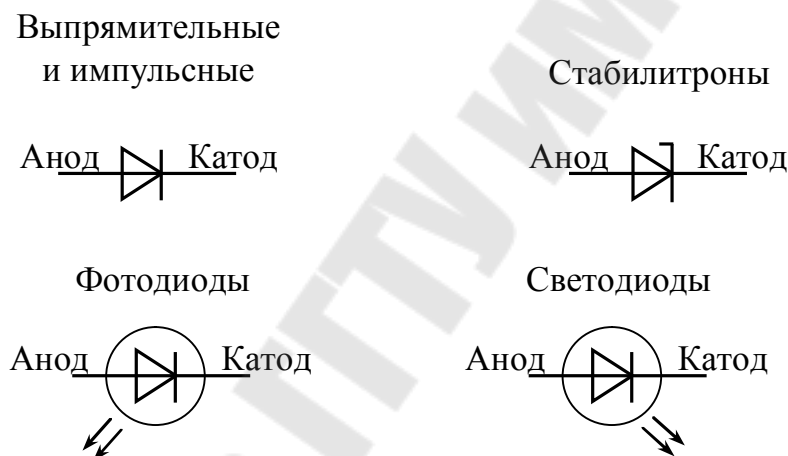


Рис. 2.6. Условные графические обозначения диодов

Выпрямительные диоды применяются в неуправляемых выпрямителях, в том числе и в силовой электронике при частотах рабочего напряжения до 400 Гц. Различают выпрямительные диоды малой мощности, для которых $I_{пр\ max} < 0,3$ А и рассеиваемая мощность $P_{max} < 0,3$ Вт; выпрямительные диоды средней мощности, для которых $I_{пр\ max} = 0,3...10$ А и $P_{max} < 0,3...10$ Вт; выпрямительные диоды большой мощности (силовые), для которых $I_{пр\ max} > 10$ А и $P_{max} > 10$ Вт. У современных силовых диодов значения $I_{пр\ max}$ могут достигать 2000 А, а значения $U_{обр\ max}$ могут достигать 10 000 В. Для воздушного охлаждения силовые диоды размещают на радиаторах. Для принудительного охлаждения радиаторы обдувают с помощью

вентиляторов или охлаждают циркулирующей теплоотводящей жидкостью.

Импульсные диоды характеризуются высоким быстродействием. Их применяют в высокочастотных выпрямителях или в логических схемах. У импульсных диодов значения $I_{пр\ max}$ не превышают 0,1 А, а значения $U_{обр\ max}$ не превышают 100 В.

Стабилитрон (*Zener diode*) – это диод, предназначенный для работы в режиме электронного пробоя $p-n$ перехода. Стабилитрон включают на обратное смещение $p-n$ перехода. Стабилизирующий эффект достигается за счет высокой крутизны ВАХ в режиме электронного пробоя (рис. 2.6), когда значительные изменения тока, протекающего через стабилитрон, приводят к незначительным изменениям падения напряжения на нем. Стабилитроны применяют в электронных стабилизаторах напряжения в блоках электропитания электронных устройств, а также в качестве ограничителей перенапряжений в электронных схемах.

Фотодиод (*photodiode*) – это диод, значения обратного тока которого существенно зависят от интенсивности и длины волны электромагнитного излучения, попадающего на $p-n$ переход. Фотодиод включают на обратное смещение $p-n$ перехода и используют, как правило, в качестве датчика освещенности. Например, в системах автоматического управления уличным освещением. Фотодиод обладает также особым свойством генераторного режима – образования разности потенциалов между анодом и катодом при облучении $p-n$ перехода и отсутствии внешнего источника. Благодаря этому свойству фотодиод служит базовым элементом для изготовления солнечных батарей.

Светодиод (*LED – Light-Emitting Diode*) – это диод, излучающий электромагнитные волны при протекании прямого тока. Светодиод включают на прямое смещение $p-n$ перехода и используют, как правило, в средствах отображения информации. Наиболее дешевыми являются светодиоды длинноволновой части видимого спектра (инфракрасные, красные, желтые, зеленые). Наиболее дорогими являются светодиоды коротковолновой части видимого спектра (синие, ультрафиолетовые). Технически наиболее сложно получить светодиоды белого свечения. Современные сверхъяркие светодиоды применяют для электрического внутреннего и наружного освещения. Обладая рядом преимуществ, они являются серьезной альтернативой классическим источникам света.

2.3. Транзисторы

Транзистор (*transistor*) – это наиболее универсальный полупроводниковый компонент электронной техники, основным физическим свойством которого является усиление тока.

Исторически первыми элементами, усиливающими ток, были электровакуумные лампы – триоды. Усиливающий эффект в них достигался за счет управления степенью эмиссии электронов из катода лампы. Однако лампы обладали существенным недостатком – значительными геометрическими размерами, большим электропотреблением и нестабильностью.

В 1947 г. сотрудники американской компании *Bell Telephone Labs* Вильям Шокли, Уолтер Браттейн и Джон Бардин получили первый патент на полупроводниковый триод, который они назвали *transistor* – от слов *transfer* и *resistor*. И это было поистине величайшим из открытий в истории. Транзистор определяет облик современной цивилизации. Цветное телевидение, персональные компьютеры, сотовые телефоны – все это появилось благодаря транзистору. На сегодняшний день транзистор – самое массовое изделие в мире. С учетом транзисторов, входящих в состав интегральных микросхем, в год в мире выпускается порядка 10^{20} транзисторов, что сравнимо с числом звезд в видимой Вселенной. Скорость переключения транзисторов достигает 10^{-12} секунды. Человеку потребовалось бы 25 000 лет, чтобы сделать столько переключений, сколько транзистор делает за одну секунду. Размеры современных транзисторов таковы, что в кубе с длиной стороны 5 мм можно разместить до 200 миллионов транзисторов.

Бывают биполярные транзисторы, полевые транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором.

Биполярный транзистор (*bipolar transistor*) – это транзистор на основе двух *p-n* переходов с тремя электродами, которые называются база, коллектор и эмиттер. Биполярные транзисторы бывают двух типов: *p-n-p* и *n-p-n*. Их условные обозначения приведены на рис. 2.7.

Рассмотрим принцип работы биполярного транзистора на основе транзистора *p-n-p* типа. Его внутренняя структура показана на рис. 2.8.

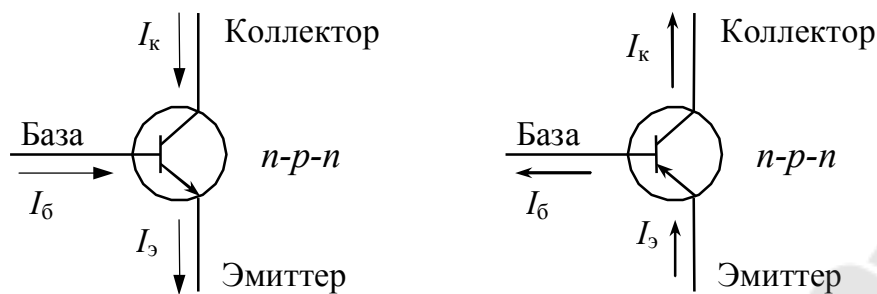


Рис. 2.7. Условные графические обозначения, наименование электродов и направления токов биполярных транзисторов

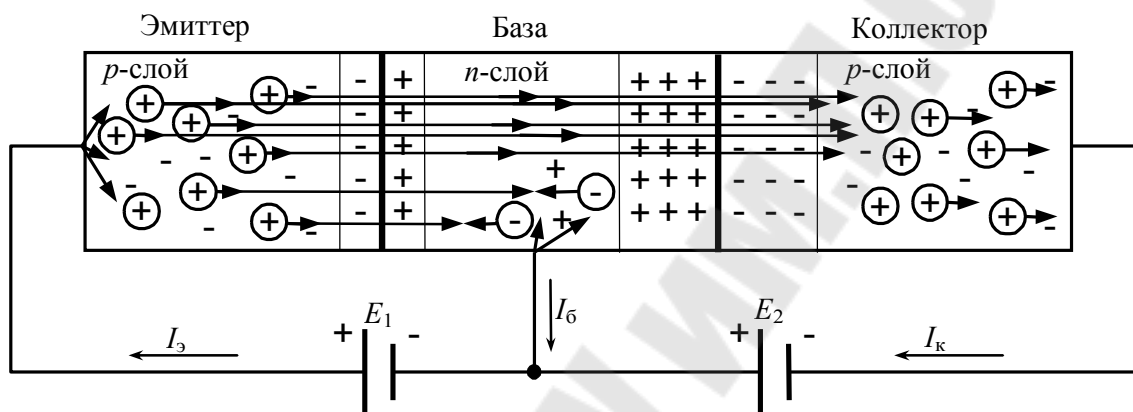


Рис. 2.8. Принцип работы биполярного транзистора

Для работы транзистора в активном нормальном режиме необходимы два внешних источника напряжения E_1 и E_2 . Они подключаются таким образом, чтобы $p-n$ переход между эмиттером и базой был смещен в прямом направлении, а $p-n$ переход между базой и коллектором в обратном направлении. При этом источник E_1 является поставщиком дырок в эмиттер, которые под действием поля проникают в область базы. Этот процесс называют инжекцией (*injection* – вспрыскивание). Конструктивно область базы имеет низкую концентрацию основных носителей заряда, в рассматриваемом случае – электронов, т. е. обладает высоким сопротивлением. Кроме того, слой базы достаточно тонкий. Поэтому большая часть инжектированных дырок не задерживаются в базе, а проникают в коллектор. Этот процесс называют переносом (*transfer*). Однако некоторые дырки успевают рекомбинировать с электронами в базе, образуя нейтральные атомы. При этом в базе возникает недостаток электронов. Они поставляются источником E_1 и образуют небольшой ток базы. Таким образом ток коллектора значительно превышает ток базы.

Основным параметром биполярного транзистора является коэффициент передачи тока коллектора $h_{2.1.э}$, характеризующий способность транзистора усиливать ток, и рассчитываемый по формуле

$$h_{2.1.э} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} \quad (2.3)$$

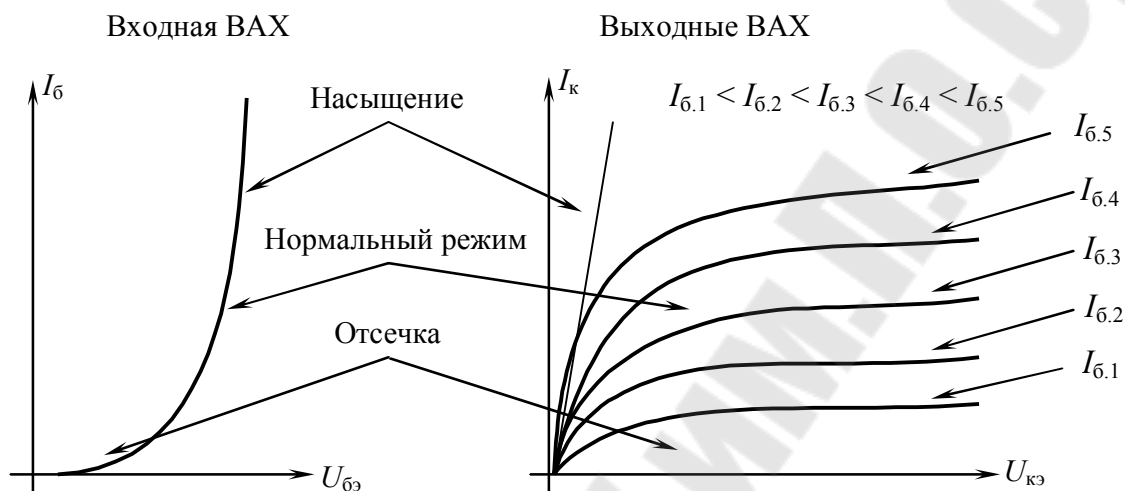


Рис. 2.9. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора

Для биполярных транзисторов большой мощности $h_{2.1.э} = 20 \dots 100$. Для транзисторов средней и малой мощности $h_{2.1.э} = 100 \dots 10\,000$.

Для транзистора строят входную ВАХ и семейство выходных ВАХ, как это показано на рис. 2.9.

Существует три основных режима работы биполярных транзисторов: нормальный режим, отсечка и насыщение. В нормальном режиме транзистор функционирует как управляемый усилитель тока. В этом режиме транзистор работает в усилителях мощности и в схемах автоматического управления. В режиме отсечки оба $p-n$ перехода смещены в обратном направлении и токи в транзисторе стремятся к нулю. В этом случае говорят, что транзистор закрыт. В режиме насыщения оба $p-n$ перехода смещены в прямом направлении и транзистор работает как неуправляемый усилитель тока. Если транзистор работает только в режимах отсечки и насыщения, то такой режим работы называют ключевым. Ключевой режим транзистора используется в электронных коммутаторах (переключателях), а также во всех цифровых схемах. Подавляющее большинство транзисторов в устройствах промышленной электроники работают в ключевом режиме.

Полевой транзистор (*FET – field-effect transistor*) – это транзистор, управляемый электрическим полем, и имеющий четыре электрода: затвор, сток, исток и подложку.

В современной электронике наиболее распространены полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцируемым каналом, или так называемые МОП (металл – оксид – полупроводник) транзисторы. Иногда используют зарубежную аббревиатуру: *MOSFET – metal-oxide-semiconductor FET*. Эти транзисторы бывают двух типов: с *p*-каналом и *n*-каналом. Их условные обозначения приведены на рис. 2.10.

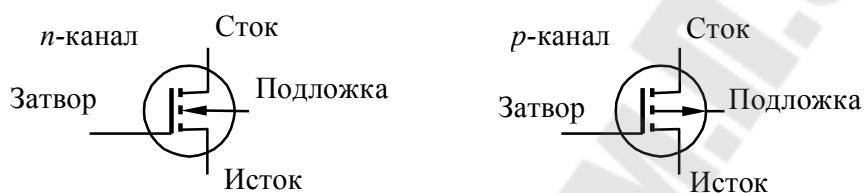


Рис. 2.10. Условные графические обозначения и наименования электродов МОП транзисторов с индуцируемым каналом

Рассмотрим принцип работы полевого транзистора на основе МОП транзистора с *n*-каналом. Его внутренняя структура показана на рис. 2.11.

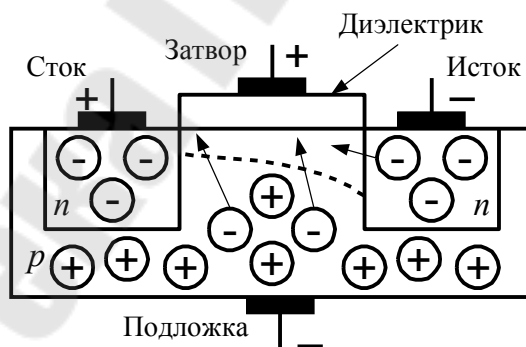


Рис. 2.11. Принцип работы МОП транзистора

Конструктивно такой транзистор состоит из полупроводника *p*-типа – подложки, в который внедрены две области *n*-типа – сток и исток. Между этими областями на поверхности подложки находится диэлектрик. Обычно это неорганическое стекло. Напомним, что стекло – это полуморфный материал, получаемый путем расплава оксида кремния, бора, фосфора или других элементов. На поверхности диэлектрика располагается металлический электрод – затвор.

В исходном состоянии, когда напряжение между затвором и подложкой отсутствует, сопротивление между стоком и истоком велико из-за наличия обратносмещенных $p-n$ переходов, и ток стока I_c отсутствует. При подаче положительного потенциала внешнего источника на затвор возникает электростатическое поле как в конденсаторе. Причем функцию обкладок такого конденсатора выполняют затвор и подложка. Под действием поля затвора неосновные носители заряда подложки (электроны) индуцируются, т. е. устремляются к поверхности диэлектрика. В результате этого образуется n -канал из свободных электронов, движущихся от истока к стоку, сопротивление между стоком и истоком снижается и ток стока возрастает. Соответственно, увеличение потенциала на затворе приводит к увеличению тока стока. Следовательно, такой транзистор управляется электрическим полем, а точнее, напряжением на затворе.

ВАХ МОП транзистора приведены на рис. 2.12.

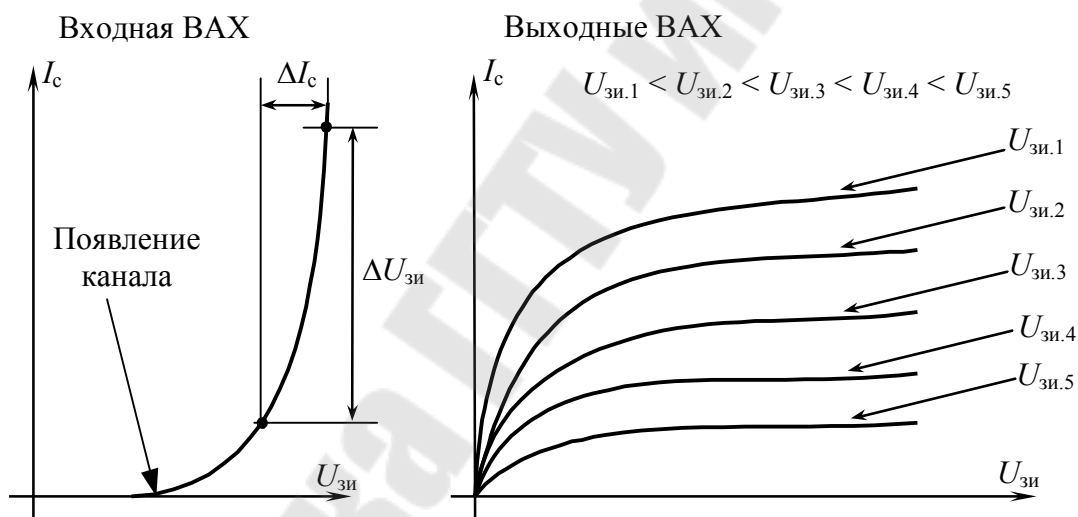


Рис. 2.12. Вольт-амперные характеристики МОП транзистора

Входную ВАХ полевого транзистора часто называют стоко-затворной характеристикой.

Основным параметром полевого транзистора является крутизна S стоко-затворной характеристики. Она характеризует способность полевого транзистора усиливать ток и рассчитывается по формуле

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ при } U_{си} = \text{const}. \quad (2.4)$$

Основными преимуществами МОП транзисторов перед биполярными транзисторами являются очень низкая мощность, потреб-

ляемая по цепи управления, и возможность работать в выходной цепи с большими токами в несколько килоампер. Ток в цепи затвора МОП транзистора равен току утечки диэлектрика. Недостатками МОП транзисторов являются их повышенная чувствительность к электромагнитным полям и более низкое быстродействие, чем у биполярных транзисторов. Основная область применения МОП транзисторов – цифровые микросхемы, а также силовая электроника, где они используются в качестве электронных ключей.

Биполярный транзистор с изолированным затвором (*IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor*) – это транзистор, управляемый электрическим полем, но функционирующий по принципу биполярного транзистора. Он имеет три электрода: затвор, коллектор и эмиттер. Условное обозначение и схема замещения *IGBT* приведены на рис. 2.13.

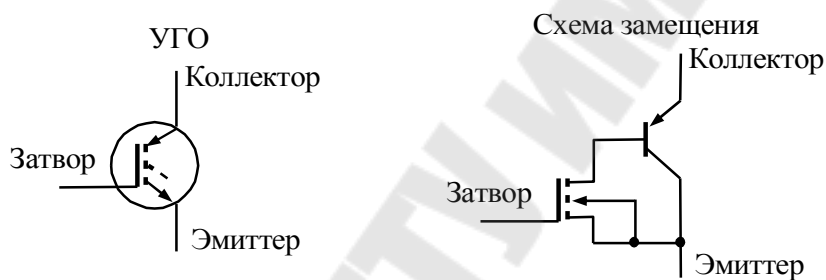


Рис. 2.13. Условное графическое обозначение и схема замещения *IGBT*

Конструктивно *IGBT* представляет собой многослойную структуру, имеющую достаточно сложный для понимания принцип функционирования. Упрощенно *IGBT* можно представить в виде схемы замещения, как показано на рис. 2.13. Основу *IGBT* составляют биполярный и МОП транзисторы. Ток базы биполярного транзистора не выходит за пределы кристалла и зависит от сопротивления канала МОП транзистора, которое, в свою очередь, зависит от значения напряжения на затворе.

IGBT сочетает достоинства биполярного и полевого транзисторов. К недостаткам *IGBT* можно отнести его достаточно высокую стоимость. *IGBT* является одним из основных компонентов современной силовой электроники, где используется в качестве электронного ключа. На одном кристалле могут собираться несколько *IGBT*. Такие структуры называются силовыми модулями (*power module*) и применяются в силовых управляемых выпрямителях и силовых преобразователях – инверторах (*chopper*).

2.4. Тиристоры

Тиристор (*thyristor*) – это полупроводниковый компонент электронной техники, выполненный на основе трех *p-n* переходов и обладающий двумя устойчивыми состояниями: состоянием низкой проводимости (тиристор закрыт) и состоянием высокой проводимости (тиристор открыт). Тиристор, как правило, имеет три электрода: анод, катод и управляющий электрод.

Бывают однооперационные и двухоперационные тиристоры. Условные обозначения тиристоров приведены на рис. 2.14.

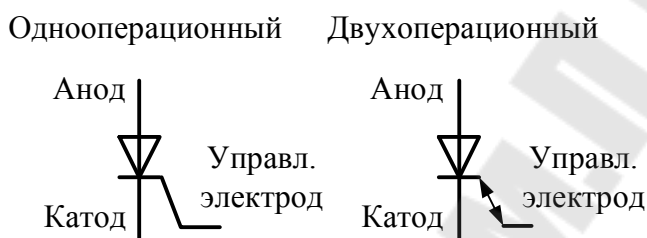


Рис. 2.14. Условные графические обозначения тиристоров

Однооперационным (*GCT* – *Gate Commutated Thyristor* – тиристор с коммутацией по цепи управления) называют тиристор, который можно только открыть по цепи управления. Для его закрытия требуется снизить значение анодного тока I_a практически до нуля.

Двухоперационным (*GTO* – *Gate Turn-Off thyristor* – запираемый тиристор) называют тиристор, который можно как открыть, так и закрыть по цепи управления. *GTO* тиристоры получают все большее распространение, вытесняя *GCT*.

Рассмотрим принцип работы тиристора на основе однооперационного тиристора, управляемого по катоду. Его внутренняя структура приведена на рис. 2.15.

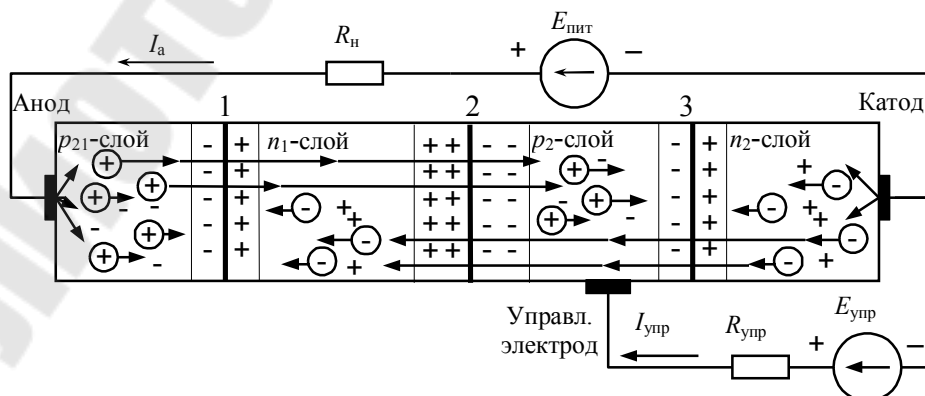


Рис. 2.15. Принцип работы тиристора

Тиристор, как правило, подключают к источнику питания $E_{\text{пит}}$ последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$. В цепь управления подают ток от управляющего источника напряжения $E_{\text{упр}}$ (управляющей схемы) через токоограничивающий резистор $R_{\text{упр}}$.

Вначале рассмотрим случай, когда ток в цепи управления тиристора отсутствует.

В случае подачи на анод тиристора отрицательного напряжения, а на катод положительного, p - n переходы № 1 и № 3 будут смещены в обратном направлении, а переход № 2 – в прямом. При этом ток через тиристор протекать не будет. Такой способ подключения называют обратным.

В случае подачи на анод тиристора положительного напряжения, а на катод отрицательного (как показано на рис. 2.15), p - n переходы № 1 и № 3 будут смещены в прямом направлении, а переход № 2 – в обратном. При этом структуры p_1 - n_1 - p_2 и n_1 - p_2 - n_2 можно рассматривать как биполярные транзисторы, в которых действует эффект переноса основных носителей заряда из эмиттера в коллектор. При некотором критическом значении напряжения питания, равном напряжению отпирания тиристора $U_{\text{отп}}$, в результате переноса возрастают концентрации электронов в n_1 -слое и дырок в p_2 -слое (показано длинными стрелками на рис. 2.15). Это приводит к уменьшению ширины p - n перехода № 2, снижению его потенциального барьера, что, в свою очередь, способствует еще большему возрастанию концентраций электронов в n_1 -слое и дырок в p_2 -слое. Говорят, что в тиристоре действует внутренняя положительная обратная связь. Этот процесс протекает лавинообразно, т. е. очень быстро. В результате p - n переход № 2 открывается, через него начинает протекать ток, направленный встречно к основному току через тиристор – анодному току $I_{\text{а}}$. Ток $I_{\text{а}}$ резко возрастает сразу же после отпирания p - n перехода № 2.

При снижении напряжения $E_{\text{пит}}$ p - n переход № 2 вначале открыт и анодный ток $I_{\text{а}}$ уменьшается. Концентрации электронов в n_1 -слое и дырок в p_2 -слое также начинают снижаться. При некотором критическом значении тока $I_{\text{а}}$, равном току удержания тиристора $I_{\text{уд}}$, лавинообразно запускается процесс запираания p - n перехода № 2 и тиристор закрывается.

Таким образом, в отличие от транзисторов, тиристор переходит от закрытого состояния к открытому состоянию, и наоборот, скачко-

образно. То есть тиристор является однонаправленным электронным ключом.

Рассмотрим назначение управляющего электрода в тиристоре. Управляющий электрод имеет смысл использовать, если $E_{\text{пит}} < U_{\text{отп}}$. При увеличении управляющего тока $I_{\text{упр}}$ концентрация дырок в p_2 -слое начинает возрастать, что при некотором критическом значении $I_{\text{упр}}$ приводит к запуску процесса отпирания p - n перехода № 2 и тиристор открывается. В подавляющем большинстве случаев тиристоры используют, когда $E_{\text{пит}} < U_{\text{отп}}$. Для отпирания тиристора достаточно подать короткий импульс тока $I_{\text{упр}}$. Чем больше значение тока $I_{\text{упр}}$, тем при более низком значении напряжения отпирания $U_{\text{отп}}$ откроется тиристор.

ВАХ тиристора приведена на рис. 2.16. Пунктиром показаны линии скачкообразного перехода при открытии или закрытии тиристора.

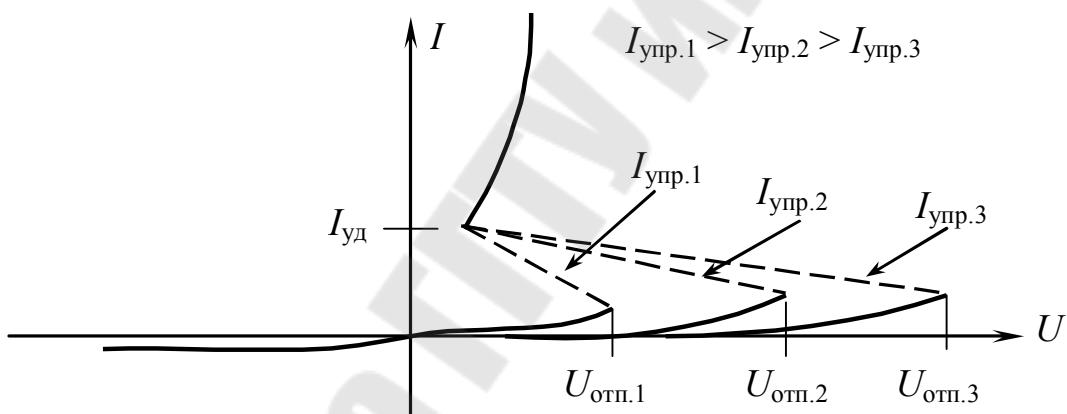


Рис. 2.16. Вольт-амперная характеристика тиристора

Помимо рассмотренных, существуют следующие виды тиристор: динистор, фототиристор, симистор.

Динистор (*dinistor*) – это тиристор без управляющего электрода, открываемый и закрываемый анодным током при определенном значении напряжения между анодом и катодом.

Фототиристор (*photothyristor*) – это тиристор управляемый внешним электромагнитным излучением через специальное окно в корпусе.

Симистор (*symistor, triac*) – это двунаправленный (симметричный) тиристор, способный коммутировать ток в обоих направлениях, т. е. являющийся двунаправленным электронным ключом при переменном токе.

Условные графические обозначения динистора, тиристора и симистора приведены на рис. 2.17.

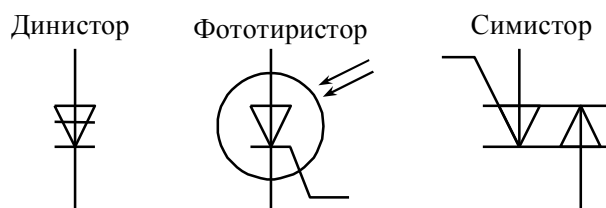


Рис. 2.17. Условные графические обозначения динисторов, фототиристоров и симисторов

Основная область применения тиристоров – силовая электроника: управляемые выпрямители, силовые инверторы. Тиристоры уступают по быстродействию транзисторам, но имеют невысокую стоимость и надежно работают на активно-индуктивную нагрузку.

2.5. Интегральные микросхемы

Интегральная микросхема (*integrated circuit; chip*) – это сложный компонент электронной техники, выполненный в пределах одного кристалла и имеющий три и более внешних выводов.

Первый патент на интегральную микросхему (ИМС) получен в 1959 г. сотрудником американской фирмы *Texas Instruments* Клером Килби, за что в 2000 г. он был удостоен Нобелевской премии по физике. ИМС являются основными компонентами современных электронных устройств.

Конструкция ИМС, имеющей квадратный корпус, показана на рис. 2.18.

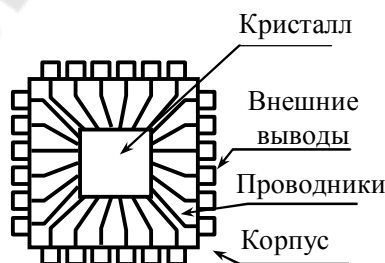


Рис. 2.18. Конструкция интегральной микросхемы

Кристалл ИМС может быть либо внутри корпуса, либо снаружи (для охлаждения). Внутри кристалла находятся простые электронные компоненты, преимущественно транзисторы, соединенные в некото-

рую схему. Основными конструктивными параметрами ИМС являются степень интеграции и технология.

Степень интеграции – это количество транзисторов, входящих в состав ИМС. Бывают ИМС следующей степени интеграции: малой (до 100 транзисторов), средней (до 1000 транзисторов), большой (до 10 000 транзисторов), сверхбольшой (до 1 млн транзисторов), ультрабольшой (до 1 млрд транзисторов), гигабольшой (более 1 млрд транзисторов). Например, микропроцессоры современных персональных компьютеров имеют ультрабольшую степень интеграции. Гигабольшая степень интеграции к 2009 г. не достигнута. Чем больше степень интеграции, тем более многофункциональной является ИМС.

Технология – это минимальное расстояние между проводниковыми дорожками внутри кристалла ИМС. Например, говорят, что микросхема сделана по технологии 0,25 мкм. К 2009 г. достигнута технология в 0,012 мкм. Чем меньше значение технологии, тем большей степени интеграции можно получить ИМС с кристаллом заданных размеров.

В зависимости от характера обрабатываемых сигналов, бывают аналоговые, цифровые и аналого-цифровые интегральные микросхемы. Наиболее универсальной аналоговой ИМС является операционный усилитель, а наиболее универсальной цифровой ИМС является микропроцессор.

Операционный усилитель (*operational amplifier*) – аналоговая интегральная микросхема с дифференциальным входом и собственным коэффициентом усиления, стремящимся к бесконечности.

Структурная схема операционного усилителя (ОУ) приведена на рис. 2.19.

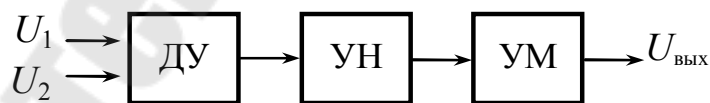


Рис. 2.19. Структурная схема операционного усилителя

Операционный усилитель состоит из следующих блоков:

ДУ – дифференциальный усилитель с двумя входами (рис. 3.4);

УН – усилитель напряжения постоянного тока (рис. 3.2);

УМ – двухтактный усилитель мощности (рис. 3.5).

Принципы действия дифференциального входного каскада и усилительных каскадов описаны в гл. 3.

Варианты графического условного обозначения ОУ приведены на рис. 2.20.

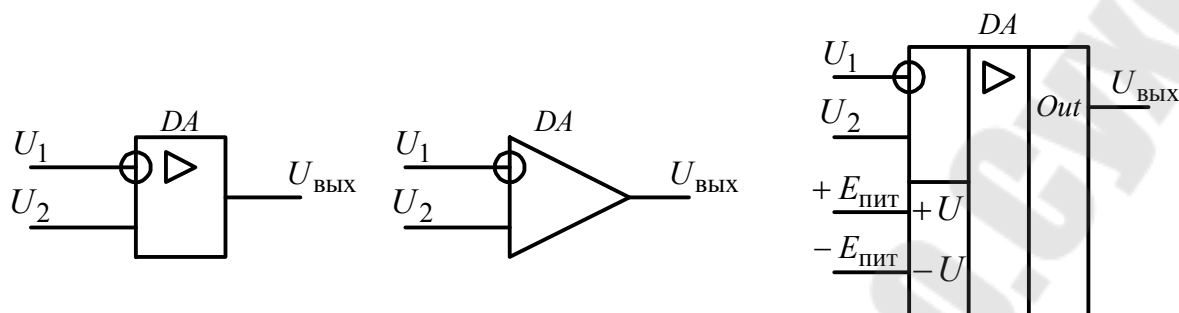


Рис. 2.20. Варианты условного обозначения операционного усилителя

ОУ имеет два входа – инвертирующий и неинвертирующий, а также один выход и выводы питания. Инвертирующий вход отмечают кружком. Для ОУ справедливо соотношение

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{ОУ}} \cdot (U_2 - U_1), \quad (2.5)$$

где $k_{\text{ОУ}}$ – собственный коэффициент усиления ОУ; U_1 – напряжение на инвертирующем входе ОУ; U_2 – напряжение на неинвертирующем входе ОУ.

У идеального ОУ $k_{\text{ОУ}} = \infty$. У реального ОУ $k_{\text{ОУ}} = 10^5 \dots 10^6$. Благодаря такому высокому значению коэффициента усиления ОУ, охваченный обратной связью, реализует операции, совпадающие практически на 100 % с теоретическими расчетами.

Максимальное значение напряжения, которое может быть на выходе ОУ, называется напряжением насыщения. Это значение, как правило, на 1...2 В ниже напряжения питания.

ОУ характеризуются низкими значениями токов, потребляемых по входам ($10^{-7} \dots 10^{-12}$ А). Однако даже такие токи могут приводить к изменению напряжения на выходе – статической ошибке. Основная же причина статической ошибки ОУ – напряжение смещения, т. е. напряжение, которое нужно приложить между входами ОУ, чтобы получить на его выходе значение напряжения, равное 0 В.

С помощью ОУ можно усиливать или генерировать аналоговые сигналы, осуществлять в реальном времени математические операции над аналоговыми сигналами. ОУ – основной элемент для построения аналоговых вычислительных машин (АВМ), которые значительно превосходят в быстродействии цифровые вычислительные машины

(ЦВМ), однако уступают им в точности вычислений и удобстве представления информации.

В последние годы появились так называемые ПАИС-программируемые аналоговые интегральные схемы, представляющие собой интегральные микросхемы большой степени интеграции, в которых имеется множество ОУ с возможностью реализации произвольной конфигурации схемы. Благодаря появлению ПАИС АВМ являются серьезной альтернативой ЦВМ, даже таким мощным, как компьютеры.

3. ПРОСТЕЙШИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

3.1. Электронный ключ

Электронные ключи применяют для коммутации напряжений и токов без использования механических контактов. Электронные ключи также называют бесконтактными ключами.

Схемы и временные диаграммы работы электронного ключа на биполярном транзисторе приведены на рис. 3.1.

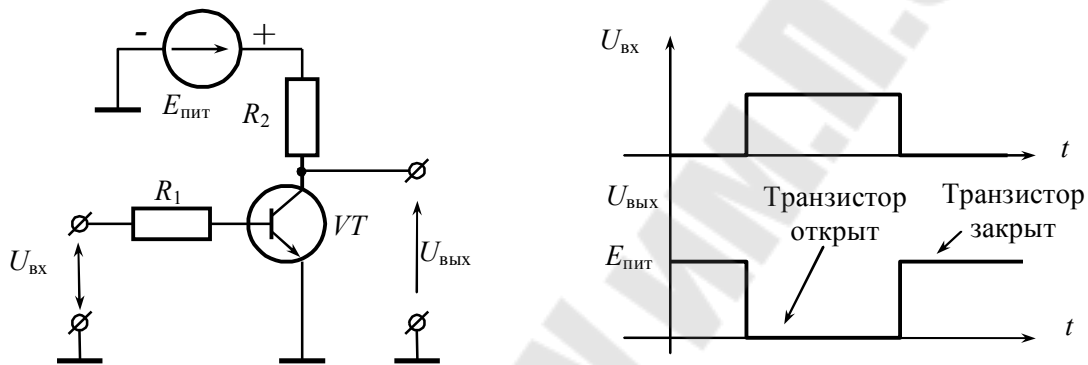


Рис. 3.1. Схема и диаграммы работы электронного ключа

Транзисторный ключ работает следующим образом. При подаче необходимого значения входного напряжения $U_{вх}$ начинает протекать ток базы и транзистор VT входит в режим насыщения, т. е. открывается. При этом напряжение между коллектором и эмиттером транзистора снижается практически до нуля, что соответствует замкнутому ключу. При уменьшении входного напряжения до нуля ток базы прекращается и транзистор входит в режим отсечки, т. е. закрывается. При этом напряжение между коллектором и эмиттером транзистора увеличивается до напряжения, близкого к напряжению питания $E_{пит}$, что соответствует разомкнутому ключу. Резисторы R_1 и R_2 ограничивают токи через транзистор. Их выбирают в соответствии с соотношениями:

$$\begin{cases} R_2 = \frac{E_{пит}}{I_{к}}; \\ R_1 = \frac{(U_{вх} - U_{бэ}) \cdot 0,7 \cdot h_{2.1.э}}{I_{к}}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где I_k – требуемый ток коллектора транзистора; $U_{\text{бэ}}$ – напряжение база-эмиттер; коэффициент 0,7 обеспечивает режим насыщения транзистора.

Аналогично биполярному транзистору, электронный ключ можно реализовать на полевом транзисторе или *IGBT*. При этом не требуется ограничительный резистор в цепи управления.

Электронные ключи применяют как в информационной, так и в силовой электронике. Ключевой режим транзистора имеет место в подавляющем большинстве случаев в современных электронных устройствах, поскольку в этом режиме работают транзисторы, входящие в состав цифровых интегральных микросхем, в том числе и микропроцессоров.

3.2. Усилитель по схеме с общим эмиттером

Усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров электрического сигнала (напряжения, тока, мощности). Усилители потребляют электроэнергию от источника питания (постоянного стабилизированного напряжения).

Схема усилителя с общим эмиттером приведена на рис. 3.2.

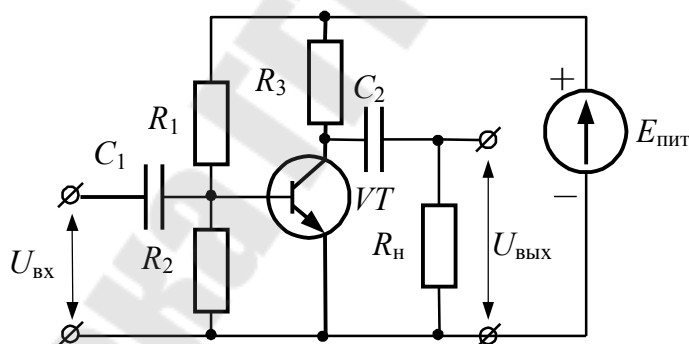


Рис. 3.2. Усилитель с общим эмиттером

Схема работает следующим образом. Источник постоянного напряжения $E_{\text{пит}}$, а также резисторы R_1 , R_2 , R_3 обеспечивают активный нормальный режим работы биполярного транзистора *VT*. Входное переменное напряжение $U_{\text{вх}}$ через конденсатор C_1 , препятствующий проникновению постоянной составляющей входного напряжения, подается на базу транзистора. В результате изменяется значение тока базы. Ток базы усиливается транзистором в $h_{2.1.э}$ раз, что приводит к возрастанию падения напряжения на резисторе R_3 , и, соответствен-

но, к увеличению значения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ на нагрузке $R_{\text{Н}}$. Конденсатор C_2 препятствует проникновению постоянной составляющей выходного напряжения в нагрузку.

Коэффициент усиления такого усилителя рассчитывается по формуле

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = - \frac{h_{2.1} \cdot \frac{R_3 \cdot R_{\text{Н}}}{R_3 + R_{\text{Н}}}}{h_{1.1}}, \quad (3.2)$$

где $h_{2.1}$ – коэффициент передачи тока коллектора транзистора; $h_{1.1}$ – входное сопротивление транзистора.

Знак « \leftrightarrow » в выражении (3.2) означает, что усилитель с общим эмиттером является инвертирующим, т. е. осуществляет поворот по фазе на 180° выходного напряжения относительно входного. Принцип работы рассматриваемого усилителя показан на совмещенных ВАХ транзистора и осциллограммах тока коллектора $I_{\text{к}}$ и напряжения коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}}$, приведенных на рис. 3.3.

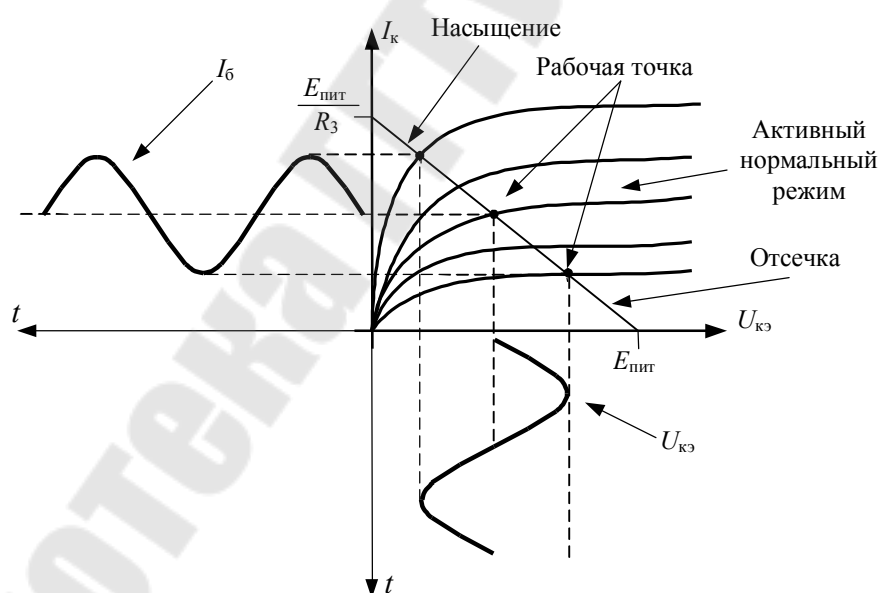


Рис. 3.3. Совмещенные ВАХ транзистора и осциллограммы тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер для усилителя с общим эмиттером

На рис. 3.3 также показана линия нагрузки, пересекающая ВАХ. Точки пересечения этой линии и линий ВАХ называются рабочими точками. Они определяют режим работы транзистора в текущий момент времени. Крайние рабочие точки показывают границы работы транзи-

стора в активном нормальном режиме. Если ток базы превысит эти границы и будет изменяться скачком от минимального до максимального значения, то транзистор перейдет в ключевой режим работы.

Основной недостаток усилителя с общим эмиттером – существенное искажение входного сигнала из-за нелинейности характеристик транзистора, а также зависимость коэффициента усиления от параметров транзистора, которые, в свою очередь, зависят от значений тока и температуры. Поэтому непосредственно такие усилители применяют в простейших случаях. Например, для звуковых сигнализаторов. Часто подобные усилители (без разделяющих конденсаторов) являются составляющими элементами интегральных микросхем. Например, операционного усилителя.

3.3. Дифференциальный каскад

В электронных устройствах часто требуется измерять и усиливать разность потенциалов. Для этой цели служит дифференциальный усилительный каскад. Его схема приведена на рис. 3.4.

На рис. 3.4 транзисторы показаны без кружков, так как данная схема имеет, как правило, интегральное исполнение, т. е. является частью внутренней структуры интегральной микросхемы.

Схема работает следующим образом. Входные напряжения $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ создают токи баз транзисторов VT_1 и VT_2 . Эти токи усиливаются транзисторами VT_1 и VT_2 , что приводит к появлению токов коллекторов этих транзисторов $I_{к1}$, $I_{к2}$, и, следовательно, к падению напряжений на резисторах R_1 и R_2 (как правило $R_1 = R_2$).

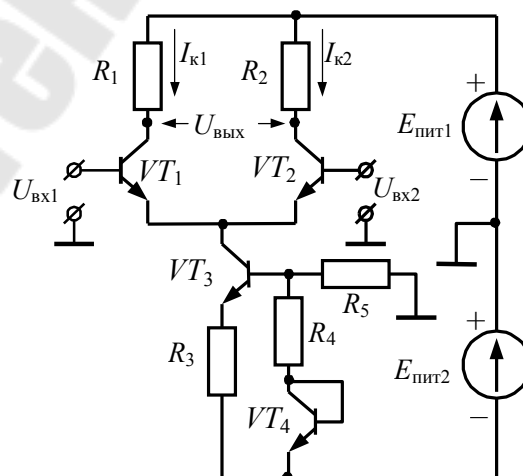


Рис. 3.4. Дифференциальный усилительный каскад

Резисторы R_1 , R_2 , а также транзисторы VT_1 , VT_2 можно рассмотреть как элементы, расположенные в плечах сбалансированного моста. Входные напряжения вызывают небаланс этого моста.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ представляет собой разность потенциалов между напряжениями на коллекторах транзисторов VT_1 и VT_2 , т. е. пропорционально разности входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = k_{\text{ус}} \cdot (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}), \quad (3.3)$$

где $k_{\text{ус}}$ – коэффициент усиления.

При приращении входных напряжений на одну и ту же величину (синфазные сигналы) выходное напряжение не должно изменяться. Для этой цели служит стабилизатор тока, собранный на транзисторах VT_3 , VT_4 и резисторах R_3 , R_4 , R_5 . Транзистор VT_4 включен по диодной схеме и предназначен для компенсации влияния температуры на работу стабилизатора тока. Через транзистор VT_3 проходит сумма коллекторных токов транзисторов VT_1 и VT_2 , следовательно

$$I_{\text{к3}} = I_{\text{к1}} + I_{\text{к2}}. \quad (3.4)$$

Отсюда $\Delta I_{\text{к1}} = -\Delta I_{\text{к2}}$, т. е. изменения токов взаимно компенсируются.

Одно из главных достоинств дифференциального каскада – слабое влияние температуры на коэффициент усиления $k_{\text{ус}}$, что достигается благодаря мостовой схеме и стабилизатору тока.

Основная область применения дифференциальных каскадов – входные цепи операционных усилителей.

3.4. Эмиттерный повторитель и усилитель мощности

Эмиттерный повторитель применяется как преобразователь сопротивления. Транзистор VT в эмиттерном повторителе включен по схеме с общим коллектором (рис. 3.5).

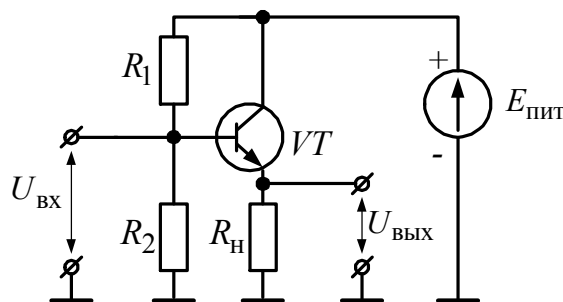


Рис. 3.5. Схема эмиттерного повторителя

Свое название эмиттерный повторитель получил благодаря тому, что его выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ практически равно входному напряжению $U_{\text{вх}}$ как по значению, так и по фазе. Действительно, если к входу эмиттерного повторителя приложить увеличивающееся по уровню напряжение, то это приведет к увеличению эмиттерного тока транзистора и соответствующему увеличению его выходного напряжения. Поэтому входной и выходной сигналы в схеме не будут изменяться по фазе.

Коэффициент усиления эмиттерного повторителя определяется по выражению

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}} \cdot R_{\text{н}}}{I_{\text{б}}(h_{11} + h_{21} \cdot R_{\text{н}})} = \frac{h_{21} \cdot R_{\text{н}}}{h_{11} + h_{21} \cdot R_{\text{н}}} \approx 1, \quad (3.5)$$

поскольку $h_{21} \cdot R_{\text{н}} \gg h_{11}$.

Следовательно, по уровню входной и выходной сигналы практически равны друг другу.

Основное преимущество эмиттерного повторителя заключается в том, что входное сопротивление его намного больше выходного и определяется оно по формуле

$$R_{\text{вх}} = h_{21} \cdot R_{\text{н}}.$$

Отсюда следует, что эмиттерный повторитель наиболее удобно применять для согласования высокоомных источников сигнала с низкоомной нагрузкой $R_{\text{н}}$. Следствием этого является значительное усиление мощности входного сигнала.

Двухтактный усилитель мощности. Как было сказано выше, эмиттерный повторитель фактически является усилителем мощности. При наличии двуполярного источника питания с нулевой точкой необходимо применить двухтактный усилитель мощности, упрощенная схема которого приведена на рис. 3.6.

В данной схеме применяются так называемые комплементарные транзисторы, имеющие одинаковые характеристики, но разную электропроводность. По существу двухтактный усилитель мощности состоит из двух эмиттерных повторителей. При положительной полярности входного сигнала $+U_{\text{вх}}$ в активном режиме работает транзистор VT_1 , а транзистор VT_2 закрыт. При отрицательной полярности $-U_{\text{вх}}$ – наоборот. Таким образом, оба транзистора одновременно не могут быть открытыми и поэтому сквозной ток источника питания от шин $+E_{\text{пит1}}$ до $-E_{\text{пит2}}$ отсутствует.

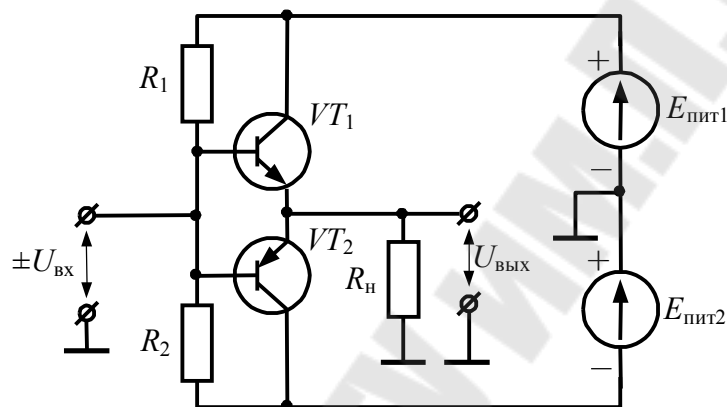


Рис. 3.6. Схема двухтактного усилителя мощности

Двухтактный усилитель мощности применяется в качестве выходного каскада операционного усилителя или как усилитель мощности звуковой частоты в плеерах, телевизорах и т. д.

4. БАЗОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Как было указано в п. 2.5, операционный усилитель (ОУ) является базовым компонентом аналоговой электронной техники, поскольку его параметры близки к идеальному элементу, т. е. коэффициент усиления ОУ стремится к бесконечности и по своим входам тока практически не потребляет, благодаря большому входному сопротивлению. В этой связи при анализе функциональных элементов на ОУ следует помнить, что в режиме усиления разность потенциалов между двумя его входами равна нулю, кроме ключевого режима, когда напряжение на выходе ОУ достигает напряжения насыщения.

4.1. Инвертирующий и суммирующий усилители

Схема инвертирующего усилителя и его передаточная характеристика приведены на рис. 4.1.

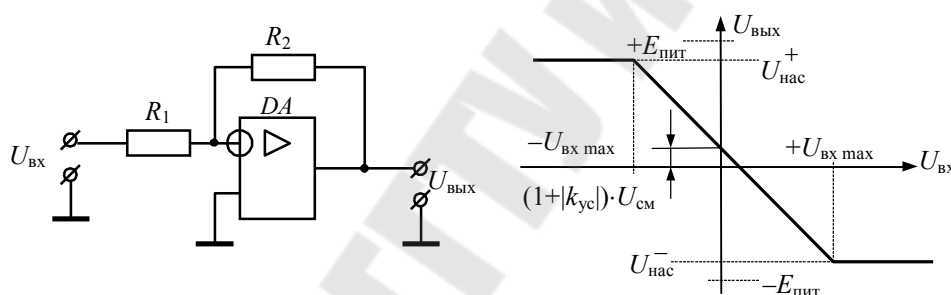


Рис. 4.1. Схема инвертирующего усилителя и его передаточная характеристика

Инвертирующий усилитель состоит из ОУ DA и резисторов R_1 , R_2 . Резисторы формируют отрицательную обратную связь, суть которой заключается в следующем. Часть выходного напряжения $U_{вых}$ подается на инвертирующий вход ОУ, где вычитается из части входного напряжения $U_{вх}$ (величины этих частей зависят от соотношения между сопротивлениями R_1 и R_2). Результат вычитания усиливается ОУ. Таким образом, на выходе усилителя формируется требуемое значение напряжения, обратного по знаку входному напряжению, а коэффициент усиления зависит только от значений сопротивлений резисторов, не зависит от параметров ОУ и определяется по формуле

$$k_{ус} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (4.1)$$

Формула (4.1) действует, пока $U_{\text{ВХ}} < U_{\text{ВХ max}}$. Если $U_{\text{ВХ}} \geq U_{\text{ВХ max}}$, то усилитель входит в режим насыщения и его выходное напряжение не изменяется и равно напряжению насыщения ОУ.

При $U_{\text{ВХ}} = 0$ выходное напряжение не равно нулю из-за статической ошибки, обусловленной напряжением смещения.

На базе инвертирующего усилителя строят большинство функциональных элементов на ОУ. Инвертирующий усилитель является частным случаем суммирующего усилителя, схема которого приведена на рис. 4.2.

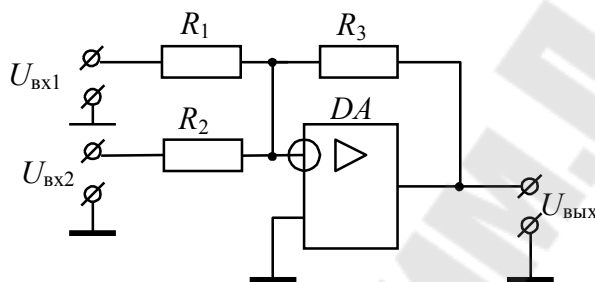


Рис. 4.2. Суммирующий усилитель

Для суммирующего усилителя справедливо соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_3 \cdot \left(\frac{U_{\text{ВХ1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{ВХ2}}}{R_2} \right). \quad (4.2)$$

На основе суммирующего усилителя можно скомпенсировать статическую ошибку инвертирующего усилителя, используя в качестве напряжения $U_{\text{ВХ1}}$ заранее заданное опорное напряжение, а в качестве напряжения $U_{\text{ВХ2}}$ – измеряемое напряжение (или наоборот).

4.2. Неинвертирующий усилитель

Схема неинвертирующего усилителя и его передаточная характеристика приведены на рис. 4.3.

Неинвертирующий усилитель также содержит отрицательную обратную связь на резисторах R_1 , R_2 . В отличие от инвертирующего усилителя, неинвертирующий усилитель не меняет знак напряжения. Коэффициент усиления для него рассчитывается по формуле

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.3)$$

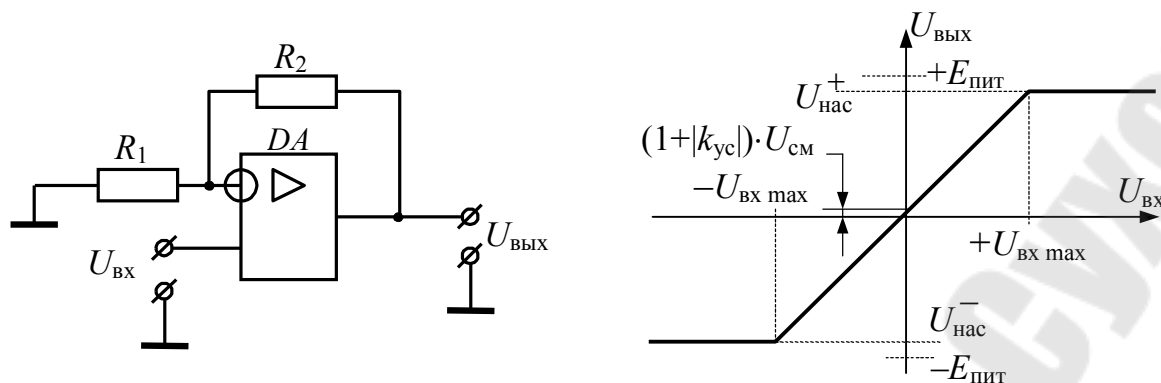


Рис. 4.3. Схема неинвертирующего усилителя и его передаточная характеристика

Недостатком этого усилителя является невозможность получить коэффициент усиления меньше единицы и, следовательно, его нельзя использовать, например, в качестве масштабного усилителя.

Основное преимущество неинвертирующего усилителя – высокое входное сопротивление, равное входному сопротивлению ОУ.

Благодаря этому свойству неинвертирующий усилитель со 100 % обратной связью применяют в качестве преобразователя сопротивлений, подобно эмиттерному повторителю (см. п. 3.4). Схема такого преобразователя представлена на рис. 4.4.

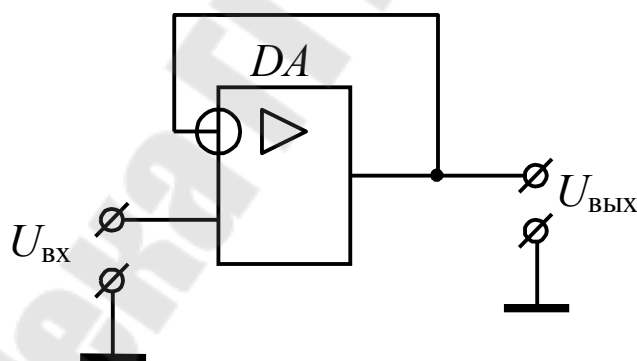


Рис. 4.4. Схема повторителя напряжения на ОУ

В данной схеме сопротивление в цепи обратной связи неинвертирующего усилителя $R_2 = 0$, поэтому коэффициент усиления напряжения, согласно формуле (4.3), равен единице: $k_{ус} = 1 + 0/\infty = 1$. Следовательно, такую схему можно применять для согласования входного высокоомного источника сигнала с выходной низкоомной нагрузкой ОУ. Следствием этого является значительное усиление мощности входного сигнала.

4.3. Измерительный усилитель

Схема измерительного усилителя приведена на рис. 4.5.

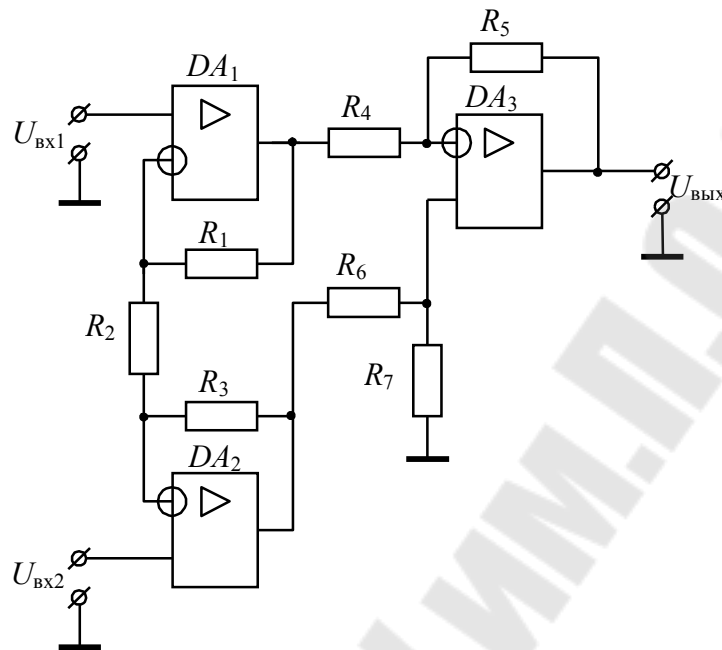


Рис. 4.5. Измерительный усилитель

Измерительный усилитель позволяет прецизионно измерять разность входных напряжений, сочетая достоинства инвертирующего и неинвертирующего усилителей. При условии, что $R_4 = R_6$ и $R_5 = R_7$, коэффициент усиления для измерительного усилителя рассчитывается по формуле

$$k_{\text{ус}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}} = \frac{R_1 + R_3}{R_2} \cdot \frac{R_5}{R_4}. \quad (4.4)$$

Этот усилитель используется при усилении сигналов с датчиков температуры, давления, тока, напряжения, магнитной индукции и т. д. Благодаря высокому входному сопротивлению он практически не влияет на измерительные цепи. Часто измерительный усилитель выполняют в рамках одной интегральной микросхемы.

4.4. Интегратор и дифференциатор

Схема инвертирующего интегратора и его диаграммы работы в случае синусоидального входного напряжения приведены на рис. 4.6.

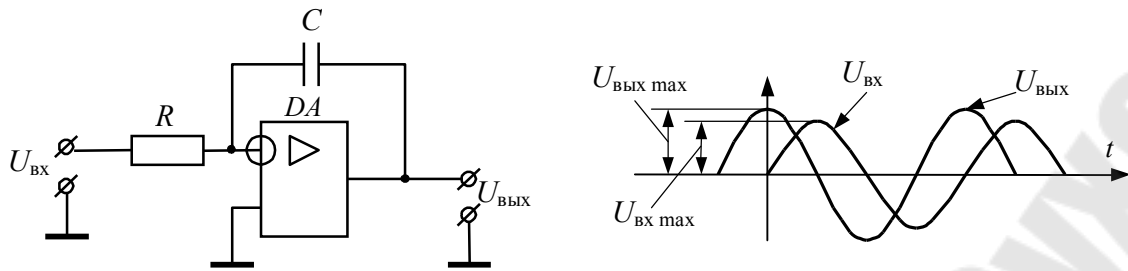


Рис. 4.6. Схема инвертирующего интегратора и его диаграммы работы

Коэффициент усиления для данной схемы определяется в соответствии с соотношением (4.1):

$$k_{yc}(j \cdot \omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{1/j \cdot \omega \cdot C}{R} = -\frac{1}{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}, \quad (4.5)$$

где $\omega = 2\pi \cdot f$ – циклическая частота, рад/с.

Для инвертирующего интегратора справедливо соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \cdot \int U_{\text{ВХ}}(t) \cdot dt. \quad (4.6)$$

Таким образом, данная схема интегрирует в реальном времени входной сигнал. Например, при подаче на вход постоянного напряжения на выходе появится линейно нарастающее напряжение, поскольку интеграл от константы – это линейная функция.

Схема инвертирующего дифференциатора и его диаграммы работы в случае синусоидального входного напряжения приведены на рис. 4.7.

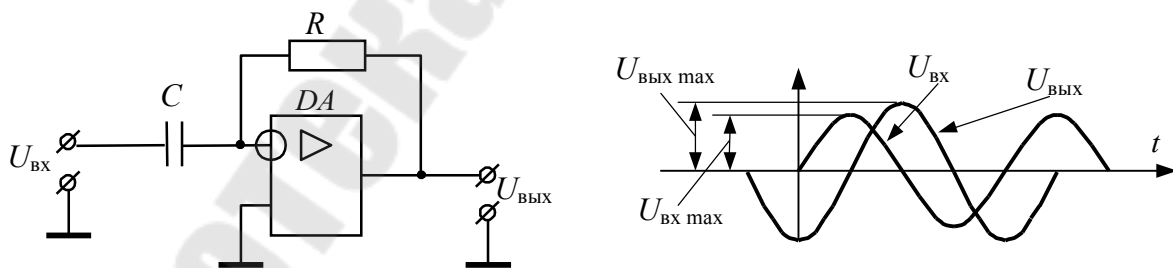


Рис. 4.7. Схема инвертирующего дифференциатора и его диаграммы работы

Аналогично интегратору коэффициент усиления дифференциатора равен

$$k_{yc}(j \cdot \omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{R}{1/j \cdot \omega \cdot C} = -j \cdot \omega \cdot R \cdot C. \quad (4.7)$$

Для этой схемы справедливо соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -R \cdot C \cdot \frac{d}{dt}(U_{\text{ВХ}}(t)). \quad (4.8)$$

Таким образом, данная схема дифференцирует в реальном времени входной сигнал. Например, при подаче на вход линейно нарастающего напряжения на выходе появится постоянное напряжение, поскольку производная от линейной функции – это константа.

Интегратор и дифференциатор могут использоваться в АВМ для решения, соответственно, интегральных и дифференциальных уравнений. Кроме того, интегратор применяется в устройствах формирования выдержки времени и в аналого-цифровых преобразователях.

4.5. Частотные фильтры

Частотные фильтры на ОУ – это усилители с коэффициентом усиления, зависящим от частоты. Бывают фильтры низких частот (ФНЧ), фильтры высоких частот (ФВЧ) и полосовые фильтры (ПЧФ).

Схема инвертирующего фильтра низких частот на основе интегратора и его амплитудо-частотная характеристика (АЧХ) приведены на рис. 4.8.

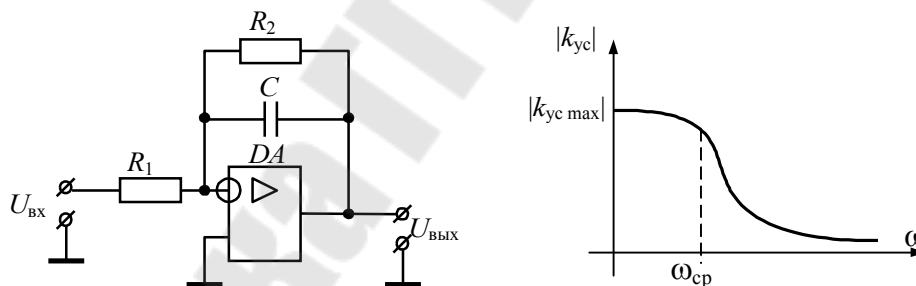


Рис. 4.8. Схема инвертирующего фильтра низких частот и его амплитудо-частотная характеристика

Фильтр низких частот имеет значение коэффициента усиления, близкое к его максимальному значению $k_{\text{yc max}}$ при низких частотах входного напряжения. При постоянном входном напряжении, когда $\omega = 0$, сопротивление конденсатора C стремится к бесконечности и фильтр превращается в инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным

$$k_{\text{yc}} = k_{\text{yc max}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (4.9)$$

При высоких частотах сопротивление конденсатора C стремится к нулю, и коэффициент усиления также стремится к нулю. Таким образом, фильтр подавляет высокие частоты и усиливает низкие частоты.

Частоту, при которой АЧХ фильтра начинает резко изменяться, называют частотой среза $\omega_{\text{ср}}$. Для рассматриваемой схемы она равна

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{R_2 \cdot C}. \quad (4.10)$$

При расчете параметров фильтра задаются требуемыми значениями $k_{\text{ус max}}$ и $\omega_{\text{ср}}$.

Фильтр высоких частот можно реализовать на основе дифференциатора (рис. 4.7) или других схем.

Вариант схемы фильтра высоких частот и его АЧХ приведен на рис. 4.9.

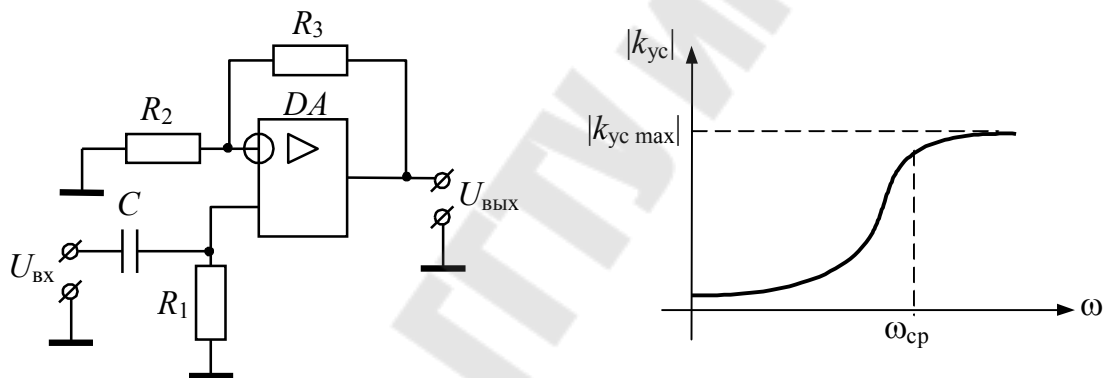


Рис. 4.9. Схема фильтра высоких частот и его амплитудно-частотная характеристика

Фильтр высоких частот имеет значение коэффициента усиления, близкое к его максимальному значению $k_{\text{ус max}}$ при высоких частотах входного напряжения. При $\omega \rightarrow \infty$ сопротивление конденсатора C стремится к нулю, и фильтр превращается в неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным

$$k_{\text{ус}} = k_{\text{ус max}} = 1 + \frac{R_3}{R_2}. \quad (4.11)$$

Частота среза равна

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{R_1 \cdot C}. \quad (4.12)$$

Более высокой крутизной АЧХ на переходной полосе частот обладают частотные фильтры второго порядка, содержащие два последовательно соединенных фильтра первого порядка.

Фильтры высоких и низких частот применяются в измерительных устройствах для исключения влияния части гармонических составляющих измеряемого сигнала на результат измерения.

Схема инвертирующего полосового фильтра (избирательного усилителя) на основе двойного Т-образного моста и его АЧХ приведены на рис. 4.10.

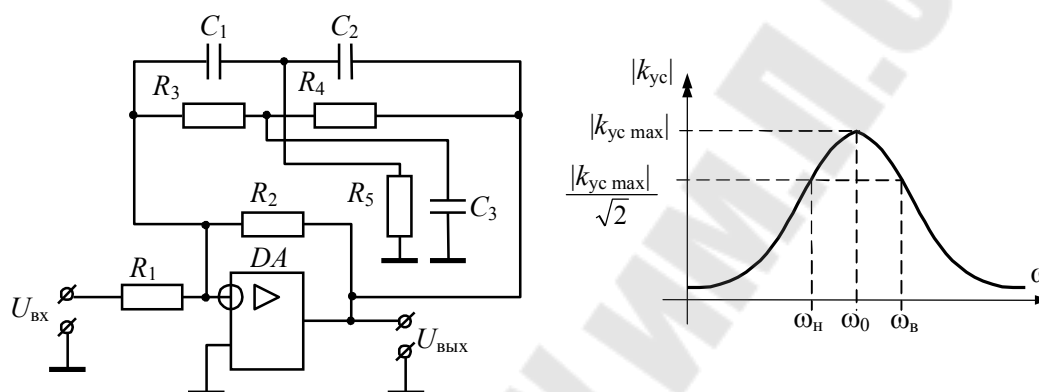


Рис. 4.10. Схема инвертирующего полосового фильтра на основе двойного Т-образного моста и его АЧХ

Двойной Т-мост собран на резисторах R_3 , R_4 , R_5 , конденсаторах C_1 , C_2 , C_3 и включен в обратную связь инвертирующего усилителя, собранного на ОУ DA и резисторах R_1 , R_2 . На частоте квазирезонанса ω_0 фильтр имеет максимальный коэффициент усиления, а на остальных частотах коэффициент усиления снижается. При условии, что $R_3 = R_4 = 2 \cdot R_5 = R$ и $C_1 = C_2 = \frac{C_3}{2} = C$, частота квазирезонанса равна

$$\omega_0 = \frac{1}{R \cdot C}. \quad (4.13)$$

Полосовые фильтры характеризуются полосой пропускания $\Delta\omega$ и добротностью Q

$$\Delta\omega = \omega_B - \omega_H; \quad Q = \frac{\omega_0}{\omega_B - \omega_H}, \quad (4.14)$$

где ω_B и ω_H – соответственно, верхняя и нижняя частоты, которые определяются из АЧХ, как показано на рис. 4.10.

Чем меньше полоса пропускания, тем выше добротность фильтра.

Полосовые фильтры применяются в измерительных устройствах для выделения нужной гармонической составляющей измеряемого сигнала, например, первой гармоники 50 Гц напряжения электрической сети.

4.6. Генератор гармонических колебаний

Схема генератора гармонических колебаний на основе двойного Т-образного моста приведена на рис. 4.11.

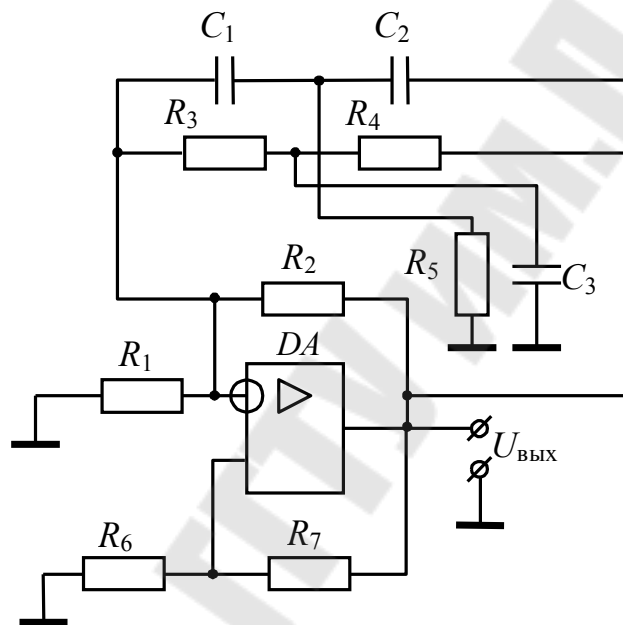


Рис. 4.11. Схема генератора гармонических колебаний

В основе данной схемы принят инвертирующий усилитель с отрицательной обратной связью в виде двойного Т-образного моста.

В данной схеме помимо отрицательной обратной связи имеется положительная обратная связь, реализованная на резисторах R₆ и R₇, суть которой заключается в следующем. Часть выходного напряжения прибавляется на неинвертирующем входе ОУ к имеющему там напряжению, и результат сложения усиливается ОУ во много раз. Таким образом, выходное напряжение ОУ стремится к неограниченному возрастанию. Однако генератор гармонических колебаний содержит и отрицательную обратную связь, глубина которой приблизительно равна глубине положительной обратной связи, что приводит к появлению периодического напряжения на вы-

ходе схемы. При этом двойной Т-образный мост выделяет гармоническую составляющую требуемой частоты в соответствии с формулой (4.13), и выходное напряжение имеет синусоидальную форму. Условия самовозбуждения генератора: выходной сигнал с генератора по цепи обратной связи должен поступить на его вход с тем же значением фазы и неизменным значением амплитуды. Входное напряжение для этой схемы не требуется, а энергия потребляется из источника питания ОУ.

4.7. Компаратор и триггер Шмитта

Компаратор (*comparator*) – это устройство для сравнения аналоговых напряжений. ОУ без обратных связей работает по принципу компаратора. Схема компаратора и его диаграммы работы приведены на рис. 4.12.

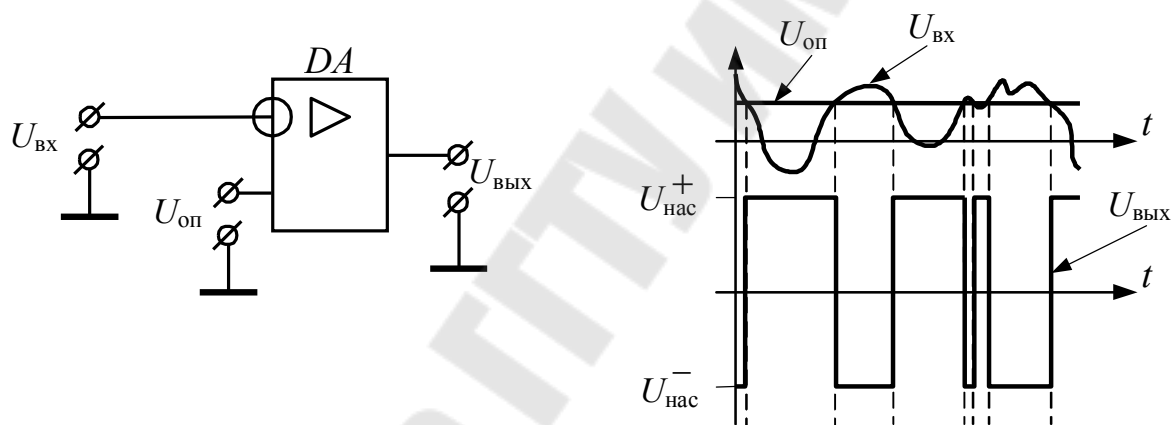


Рис. 4.12. Схема компаратора и его диаграммы работы

Как правило, сравниваются изменяющееся входное напряжение $U_{вх}$ с неизменным опорным напряжением $U_{оп}$. Если $U_{вх} > U_{оп}$, то на выходе компаратора появляется отрицательное напряжение насыщения ОУ $U_{нас}^-$. Если $U_{вх} < U_{оп}$, то на выходе компаратора появляется отрицательное напряжение насыщения ОУ $U_{нас}^+$. Выходной сигнал компаратора фактически является цифровым сигналом.

Компараторы применяются в устройствах измерения, автоматики и защиты. Недостатком компаратора является дребезг на границе срабатывания, когда входное напряжение нестабильно, как показано на рис. 4.12. Этому недостатка лишен триггер Шмитта (*Schmitt trigger*), схема и передаточная характеристика которого приведены на рис. 4.13.

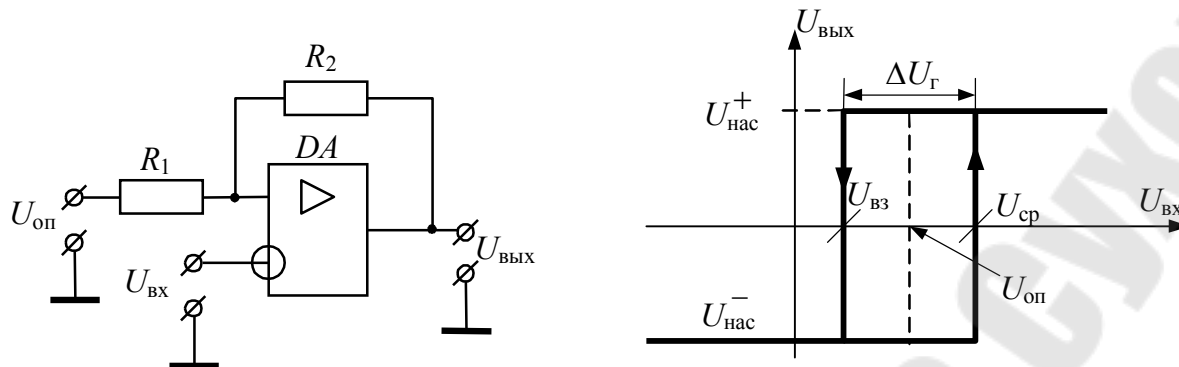


Рис. 4.13. Схема и передаточная характеристика триггера Шмитта

Триггер Шмитта отличается от компаратора наличием положительной обратной связи, реализованной на резисторах R_1 и R_2 . Благодаря положительной обратной связи переключение триггера Шмитта происходит не в момент равенства входного и опорного напряжений, как в компараторе, а при напряжениях срабатывания $U_{сп}$ и возврата $U_{вз}$, которые различны по значению. Передаточная характеристика триггера Шмитта представляет собой прямоугольную петлю гистерезиса. Чем шире петля гистерезиса, тем меньше влияние нестабильности входного напряжения на переключение триггера. Ширина петли гистерезиса $\Delta U_{г}$ зависит от значений сопротивлений R_1 и R_2

$$\Delta U_{г} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{нас} \cdot \quad (4.15)$$

Триггер Шмитта – один из основных элементов выходных органов электронных устройств автоматического управления и релейной защиты. Его применяют также для реализации импульсных генераторов – мультивибраторов и одновибраторов.

4.8. Мультивибратор и одновибратор

Мультивибратор (*multivibrator*) – это генератор прямоугольных импульсов или релаксационный генератор. Его схема и диаграммы работы приведены на рис. 4.14.

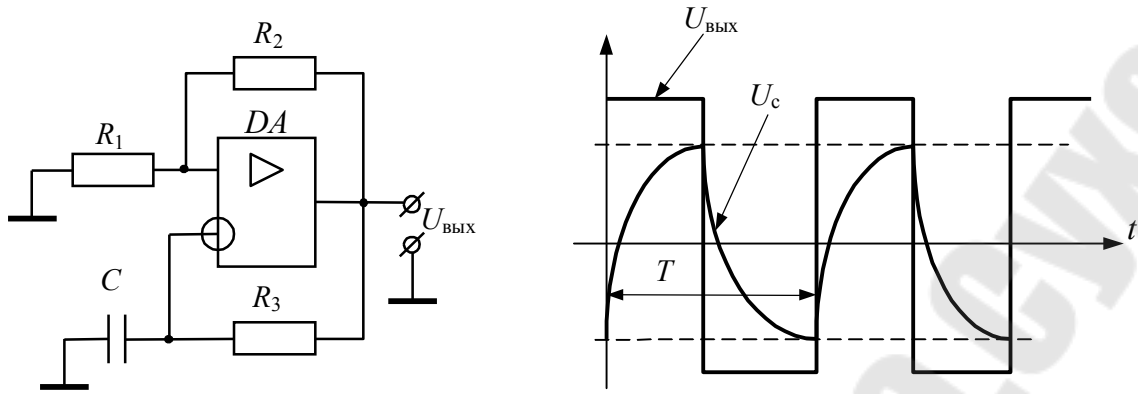


Рис. 4.14. Схема и диаграммы работы мультивибратора

Мультивибратор выполнен на основе триггера Шмитта с дополнительной отрицательной обратной связью, реализованной на элементах C и R_3 . При наличии положительного напряжения насыщения на выходе схемы конденсатор C заряжается через резистор R_3 до тех пор, пока напряжение U_C не станет равным напряжению переключения триггера, зависящего от значений сопротивлений R_1 и R_2 . После переключения триггера конденсатор разряжается до напряжения переключения. Далее процесс повторяется циклически. Таким образом, на выходе схемы формируется последовательность прямоугольных импульсов с периодом T , равным

$$T = 2 \cdot R_3 \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_2} \right). \quad (4.16)$$

Одновибратор (ждущий мультивибратор – *monostable multivibrator*) – это устройство для формирования прямоугольного импульса заданной длительности.

Схема и диаграммы работы одновибратора приведены на рис. 4.15.

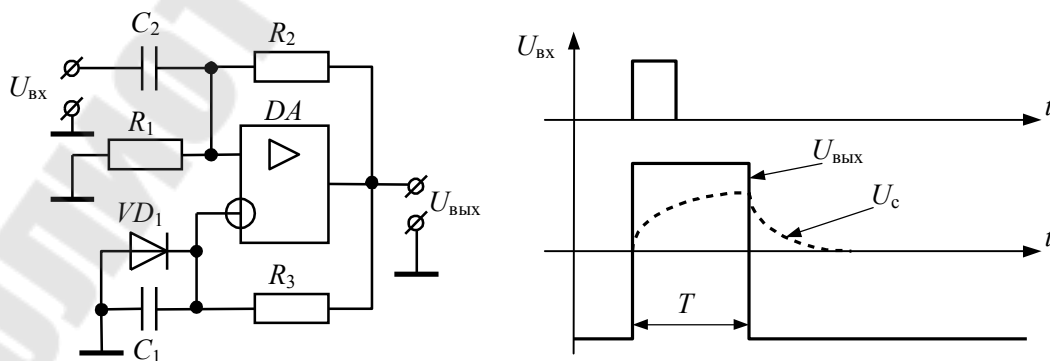


Рис. 4.15. Схема и диаграммы работы одновибратора

Одновибратор выполнен на основе мультивибратора (заторможенный мультивибратор, за счет применения диода VD_1 , шунтирующего времязадающий конденсатор C_1). При подаче на вход через конденсатор C_2 короткого импульса одновибратор переключается и на выходе появляется положительное напряжение насыщения. При этом конденсатор C_1 заряжается через резистор R_3 до напряжения переключения одновибратора. Диод VD_1 предотвращает появление отрицательного напряжения на конденсаторе C_1 . Длительность импульса равна

$$T = R_3 \cdot C_1 \cdot \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (4.17)$$

Мультивибратор и одновибратор применяются для синхронизации работы цифровых схем, а также в схемах управления силовыми преобразователями и реле времени.

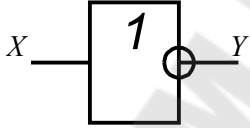
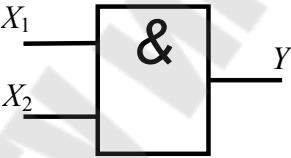
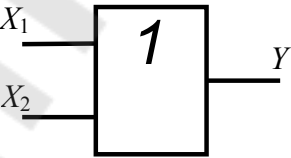
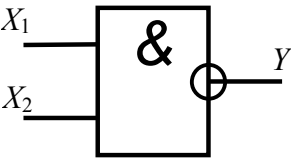
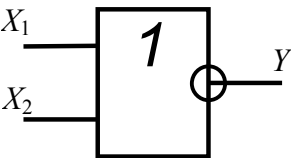
5. БАЗОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

5.1. Логические элементы

Условные обозначения логических элементов и их таблицы истинности изображены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Логические элементы

№ п/п	Логическая операция	Название логического элемента	Условное обозначение логического элемента	Таблица истинности															
1	Отрицание $Y = \bar{X}$	НЕ (NOT)		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">X</td> <td style="padding: 2px 10px;">Y</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> </table>	X	Y	0	1	1	0									
X	Y																		
0	1																		
1	0																		
2	Конъюнкция $Y = X_1 \wedge X_2$	И (AND)		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">X₁</td> <td style="padding: 2px 10px;">X₂</td> <td style="padding: 2px 10px;">Y</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
X ₁	X ₂	Y																	
0	0	0																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	1																	
3	Дизъюнкция $Y = X_1 \vee X_2$	ИЛИ (OR)		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">X₁</td> <td style="padding: 2px 10px;">X₂</td> <td style="padding: 2px 10px;">Y</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
X ₁	X ₂	Y																	
0	0	0																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	1																	
4	Конъюнкция с отрицанием $Y = \overline{X_1 \wedge X_2}$	И-НЕ		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">X₁</td> <td style="padding: 2px 10px;">X₂</td> <td style="padding: 2px 10px;">Y</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
X ₁	X ₂	Y																	
0	0	1																	
0	1	1																	
1	0	1																	
1	1	0																	
5	Дизъюнкция с отрицанием $Y = \overline{X_1 \vee X_2}$	ИЛИ-НЕ		<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">X₁</td> <td style="padding: 2px 10px;">X₂</td> <td style="padding: 2px 10px;">Y</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">1</td> <td style="padding: 2px 10px;">0</td> </tr> </table>	X ₁	X ₂	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
X ₁	X ₂	Y																	
0	0	1																	
0	1	0																	
1	0	0																	
1	1	0																	

С помощью функциональных элементов, входящих в состав цифровых интегральных микросхем, могут быть реализованы логические операции. При этом постоянное напряжение, приблизительно равное напряжению питания интегральной микросхемы и поданное на один из ее входов, соответствует логической единице. Напряже-

ние, приблизительно равное нулю, соответствует логическому нулю. Таблицу, в которой ставятся в соответствие логические уровни входов и выходов цифровой интегральной микросхемы, называют **таблицей истинности**.

Логические элементы реализуют следующие операции: отрицание (логическое НЕ), дизъюнкцию (логическое ИЛИ), конъюнкцию (логическое И), дизъюнкцию с отрицанием (логическое ИЛИ-НЕ), конъюнкцию с отрицанием (логическое И-НЕ). Логические элементы – это основа для построения цифровых схем, в том числе и микропроцессоров. Любая цифровая интегральная микросхема содержит определенное количество логических элементов, представленных либо непосредственно, либо соединенных в определенную схему.

В последние годы появились так называемые ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы, содержащие тысячи логических элементов, которые можно соединять в произвольную схему посредством программируемых пользователем перемычек-ключей, создавая, например, свой собственный микропроцессор.

5.2. Цифровые триггеры

Триггер (*trigger*) – это функциональный элемент цифровой электроники, имеющий два устойчивых состояния, одно из которых соответствует логической единице, а другое – логическому нулю. Триггер является элементарной ячейкой памяти, хранящей один бит информации (0 или 1).

Триггеры бывают 4-х типов: *RS*, *D*, *T* и *JK*.

Схема и таблица истинности *RS*-триггера приведены на рис. 5.1. В таблице истинности обозначено: *R* – вход сброса триггера; *S* – вход установки триггера; Q_n – текущее состояние триггера; Q_{n-1} – предыдущее состояние триггера.

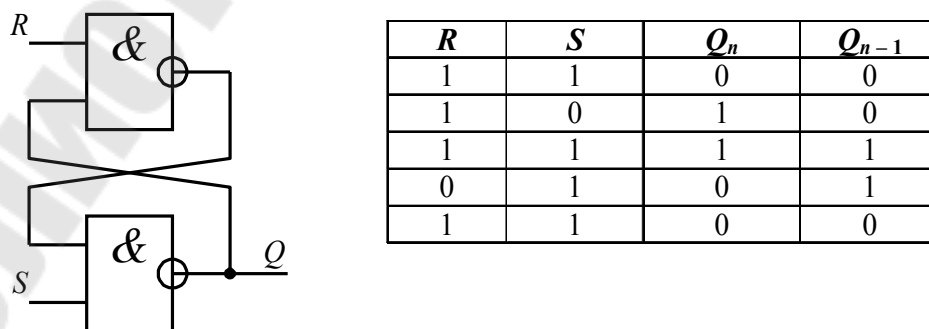


Рис 5.1. Схема и вид таблицы истинности *RS*-триггера

RS-триггер (триггер-защелка) имеет четыре режима работы: режим хранения, когда текущее состояние триггера совпадает с предыдущим; режим установки, когда текущее состояние равно единице вне зависимости от предыдущего состояния; режим сброса, когда текущее состояние равно нулю вне зависимости от предыдущего состояния; режим неопределенности, когда состояние триггера изменяется случайно. Для приведенной на рис. 5.1 схемы триггера режим неопределенности имеет место, когда на оба входа поданы логические нули. Этому режиму необходимо избегать. *RS*-триггер – это асинхронный, т. е. не имеющий дополнительного тактового входа, триггер.

RS-триггер применяется, как правило, в качестве базового элемента для построения других видов триггеров, а также в устройствах сигнализации.

Схема на логических элементах и условное обозначение *D*-триггера приведены на рис. 5.2.

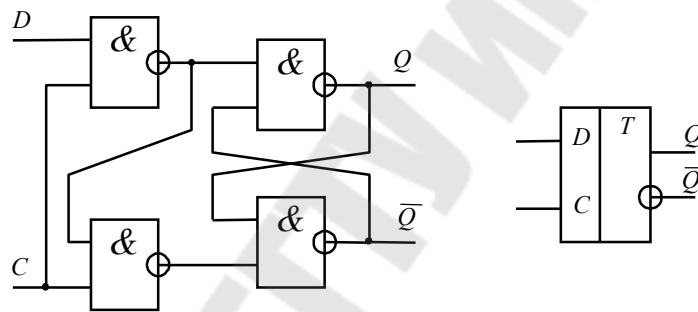


Рис. 5.2. Схема и условное обозначение *D*-триггера

У *D*-триггера имеется два входа: *D* – вход данных и *C* – вход синхронизации (тактовый вход). Фронт (перепад из 0 в 1) сигнала на входе *C* определяет тот момент времени, когда данные (0 или 1), поданные на вход *D*, запишутся на выход *Q*. *D*-триггер – это синхронный триггер. Временные диаграммы работы *D*-триггера приведены на рис. 5.3.

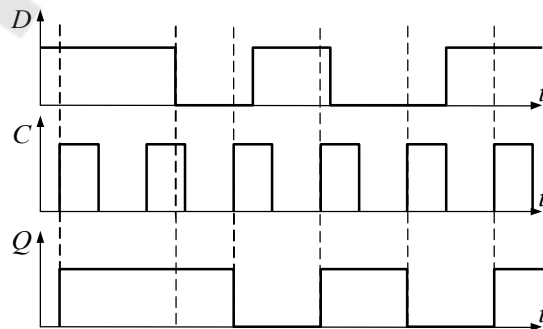


Рис. 5.3. Временные диаграммы работы *D*-триггера

D -триггер применяют для построения T -триггеров, регистров, статических оперативных запоминающих устройств и других элементов цифровой электроники.

Реализация T -триггера на основе D -триггера, а также условное обозначение и диаграммы работы T -триггера приведены на рис. 5.4.

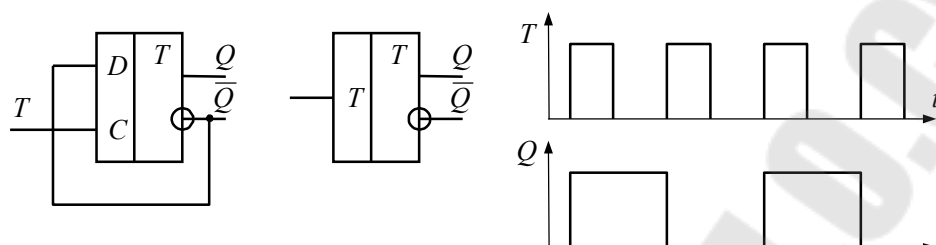


Рис. 5.4. Реализация на основе D -триггера, условное обозначение и диаграммы работы T -триггера

T -триггер меняет свое состояние на противоположное по каждому фронту (перепаду из 0 в 1) сигнала на входе T . Основное назначение T -триггера – делить частоту входного сигнала пополам.

T -триггер применяют для построения двоичных счетчиков.

Промышленностью также выпускается JK -триггер – это универсальный триггер, с помощью которого можно получить любой из перечисленных триггеров.

5.3. Двоичные счетчики

Двоичный счетчик (*binary counter*) – это функциональный элемент цифровой электроники, преобразующий количество импульсов (перепадов 1-0-1), поданных на его счетный вход, в двоичный код. Количество цифровых выходов двоичного счетчика, как правило, равно его разрядности.

Схема четырехразрядного двоичного счетчика на основе T -триггеров и его условное обозначение приведены на рис. 5.5.

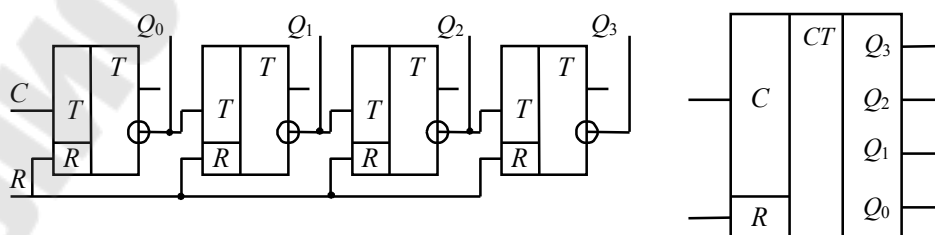


Рис. 5.5. Схема четырехразрядного двоичного счетчика на основе T -триггеров и его условное обозначение

Двоичный счетчик обязательно имеет счетный вход C и вход сброса R .

Таблица истинности четырехразрядного двоичного счетчика приведена в таблице 5.2, где $N_{\text{имп}}$ – количество импульсов, поданных на счетный вход счетчика.

Таблица 5.2

Таблица истинности четырехразрядного двоичного счетчика

$N_{\text{имп}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
Q_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
Q_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Q_3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Как видно из таблицы 5.1, четырехразрядный счетчик может подсчитать до 15 импульсов. При подаче 16-го импульса счетчик обнуляется и при последующих импульсах начинает подсчет циклически.

Максимальное число N_{max} , до которого может досчитать счетчик, связано с его разрядностью n следующим соотношением:

$$N_{\text{max}} = 2^n - 1. \quad (5.1)$$

Рассмотренный счетчик является суммирующим, так как считает в прямом направлении. Бывают и вычитающие счетчики, считающие в обратном направлении. Так на схеме счетчика, приведенной на рис. 5.5, для получения вычитающего счетчика необходимо вместо инверсных выходов T -триггеров использовать прямые выходы. Но чаще оба вида счетчиков совмещают в одном счетчике, который называют *реверсивным*.

Двоичные счетчики используют как внутренние элементы сложных цифровых интегральных микросхем, в том числе и микропроцессоров, а также для организации выдержек времени, т. е. в таймерах.

5.4. Регистры

Регистр (*register*) – это функциональный элемент цифровой электроники, являющийся простейшим запоминающим устройством. Количество цифровых выходов регистра, как правило, равно его разрядности.

Схема четырехразрядного регистра на основе D -триггеров и его условное обозначение приведены на рис. 5.6.

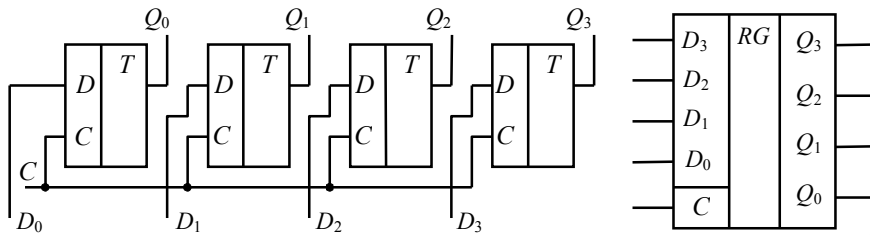


Рис. 5.6. Схема четырехразрядного регистра на основе D -триггеров и его условное обозначение

Регистр обязательно имеет вход записи C , входы данных D_i и выходы Q_i . Двоичный код, поданный на входы D_i , записывается в регистр и появляется на выходах Q_i в момент подачи фронта импульса (перепада из 0 в 1) на вход C . Регистр – это энергозависимая память. При выключении питания все данные теряются.

Рассмотренный регистр является параллельным, т. е. запись двоичного кода в нем происходит во все разряды одновременно (регистр хранения). Бывают также последовательные (сдвиговые) регистры. У них двоичный код подается на один вход путем последовательной смены логических уровней триггеров за каждый тактовый импульс.

Регистры применяются как внутренние элементы статических оперативных запоминающих устройств и микропроцессоров.

5.5. Дешифраторы

Дешифратор (*decoder*) – это комбинационная логическая схема, в которой каждой из комбинаций логических уровней на входах соответствует логический уровень только на одном из ее выходов (преобразует код двоичного числа в десятичное). Разрядность дешифратора, как правило, равна количеству его цифровых входов.

Схема двухразрядного дешифратора и его условное обозначение приведены на рис. 5.7.

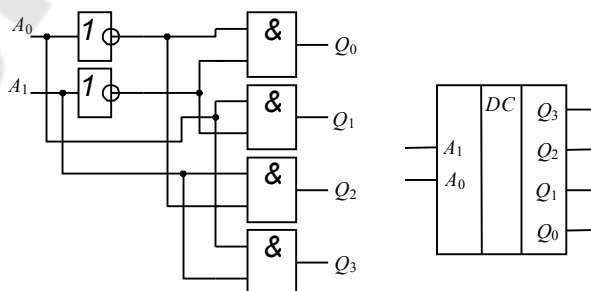


Рис. 5.7. Схема двухразрядного дешифратора и его условное обозначение

Таблица истинности двухразрядного дешифратора представлена в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Таблица истинности двухразрядного дешифратора

A_1	A_0	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Дешифраторы используют как внутренние элементы сложных цифровых интегральных микросхем, в том числе и микропроцессоров, где они выполняют функции декодирования команд или адресных селекторов.

5.6. Мультиплексоры

Мультиплексор (*multiplexer*) – это функциональный элемент цифровой электроники, работающий по принципу многопозиционного коммутатора, селектора, и позволяющий передавать по одной линии несколько разных сигналов.

Схема двухразрядного мультиплексора и его условное обозначение приведены на рис. 5.8.

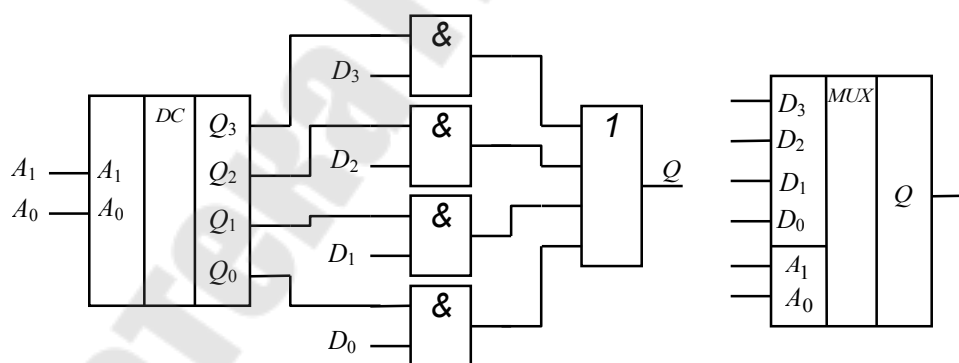


Рис. 5.8. Схема двухразрядного мультиплексора и его условное обозначение

Мультиплексор содержит входы адреса A_i , входы данных D_i и один выход Q . Двоичный код, поданный на входы адреса, определяет номер входа D_i , подключаемого к выходу Q .

Мультиплексоры используют как внутренние элементы микропроцессоров, где они входят в состав блока декодирования команд.

Бывают также мультиплексоры, позволяющие коммутировать аналоговые сигналы. Такие мультиплексоры применяют для организации многоканальных аналого-цифровых преобразователей.

5.7. Арифметико-логические устройства

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) (*arithmetic and logic unit*) – это функциональный элемент цифровой электроники, выполняющий арифметические, логические операции и операции сравнения над двоичными числами.

Условное обозначение четырехразрядного АЛУ приведено на рис. 5.9.

АЛУ имеет входы для двух двоичных чисел A_i и B_i , над которыми должна производиться вычислительная операция. Вид операции задается двоичным кодом команды, подаваемым на входы S_i . В случае четырехразрядного входного кода АЛУ будет иметь $2^4 = 16$ команд.

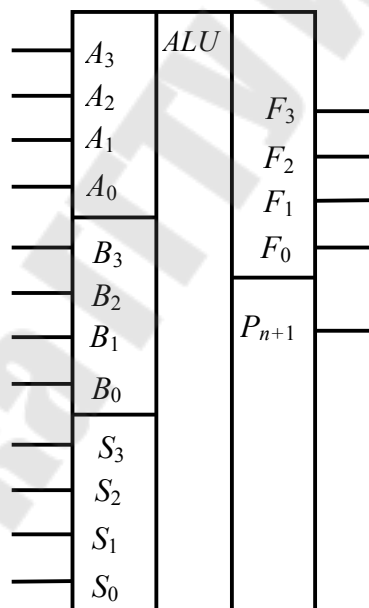


Рис. 5.9. Условное обозначение четырехразрядного АЛУ

Результат вычисления АЛУ выдается на выходы F_i , а также, в случае арифметических операций, на выход переноса в старший разряд P_{n+1} .

АЛУ в основном применяется в качестве вычислительного ядра микропроцессоров.

6. ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

6.1. Цифро-аналоговые преобразователи

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) (*Analog to digital converter*) – это функциональный элемент электроники, преобразующий входной двоичный код числа в пропорциональное аналоговое напряжение. Разрядность ЦАП, как правило, равна количеству его цифровых входов.

Существуют различные способы внутренней организации ЦАП. Однако наибольшее распространение получила структура на основе резистивной матрицы типа $R-2R$. Принципиальная схема n -разрядного ЦАП с такой организацией приведена на рис. 6.1.

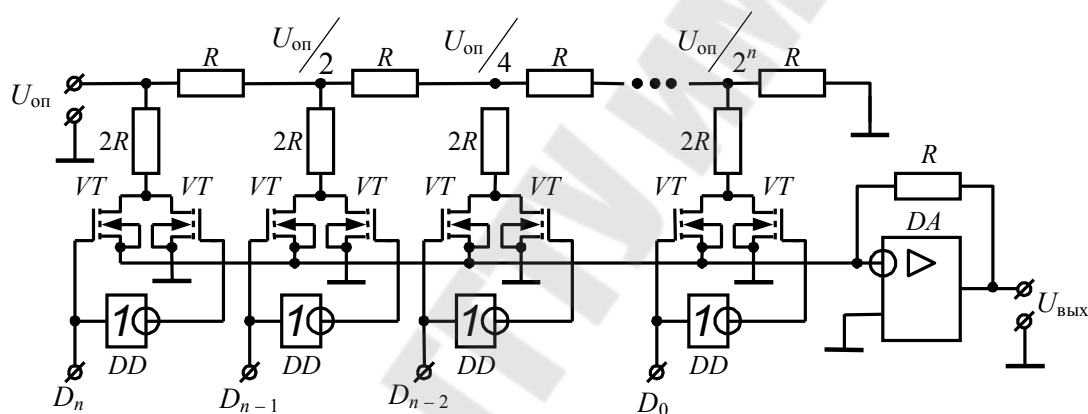


Рис. 6.1. Принципиальная схема n -разрядного ЦАП

Схема построена на базе суммирующего усилителя, собранного на операционном усилителе DA . В узлах резистивной матрицы $R-2R$ формируются напряжения, получаемые путем деления опорного напряжения $U_{оп}$ на коэффициент, кратный двум, что эквивалентно соответствующим весам разрядов двоичного кода. Логические уровни D_i входного двоичного кода управляют работой электронных ключей, собранных на МОП-транзисторах VT . Каждый узел резистивной матрицы содержит два ключа, управляющие электродами которых (затворы транзисторов) соединены через цифровой инвертор DD . Таким образом, первый из пары транзисторов эквивалентен нормально разомкнутому ключу, а второй транзистор – нормально замкнутому ключу. При подаче на i -й разряд логической единицы открывается первый из пары транзисторов, а второй закрывается. При этом соот-

ветствующее напряжение $\frac{U_{\text{оп}}}{2^i}$ прибавляется суммирующим усилителем к выходному напряжению $U_{\text{вых}}$. При подаче на i -й разряд логического нуля закрывается первый из пары транзисторов, а второй открывается. При этом соответствующее напряжение не прибавляется суммирующим усилителем к выходному напряжению $U_{\text{вых}}$. Следовательно, данная схема аппаратно реализует алгоритм перевода двоичного кода в десятичный код. Выходное напряжение рассчитывается по формуле

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{оп}}}{2^n - 1} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} D_i \cdot 2^i = \frac{U_{\text{оп}}}{N_{\text{вх max}}} \cdot N_{\text{вх}}, \quad (6.1)$$

где $D_i = 0$ или 1 ; $N_{\text{вх}}$ – десятичное значение входного двоичного кода; $N_{\text{вх max}}$ – максимальное десятичное значение входного двоичного кода.

Условное обозначение и передаточная характеристика четырехразрядного ЦАП приведены на рис. 6.2.

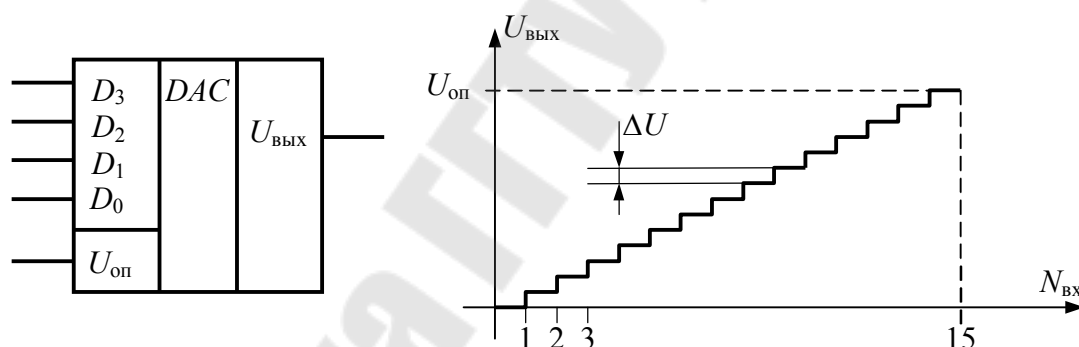


Рис. 6.2. Условное обозначение и передаточная характеристика четырехразрядного ЦАП

При изменении входного двоичного кода ЦАП на единицу выходное напряжение изменяется скачком на некоторую величину ΔU , представляющую собой дифференциальную погрешность ЦАП. Очевидно, что чем больше разрядность ЦАП, тем меньше его дифференциальная погрешность и тем точнее осуществляется преобразование цифрового кода в аналоговое напряжение. На практике применяют разрядность ЦАП, равную 10 и выше.

Кроме дифференциальной погрешности, ЦАП характеризуются погрешностью нелинейности преобразования, определяемой как абсолютное отклонение точек передаточной характеристики от прямой,

а также временем установления выходного напряжения при изменении входного кода, т. е. быстродействием.

ЦАП применяются для построения АЦП, в цифровых генераторах напряжения, а также в устройствах автоматического управления и цифровых устройствах воспроизведения звука. Так в звуковом адаптере (аудиокарте) персонального компьютера для воспроизведения звука используется ЦАП.

6.2. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (*digital to analog converter*) – это функциональный элемент электроники, преобразующий входное аналоговое напряжение в пропорциональный выходной двоичный код. Разрядность АЦП, как правило, равна количеству его цифровых выходов.

Существуют различные способы внутренней организации ЦАП. Однако наибольшее распространение получили АЦП последовательных приближений с сокращенным перебором кодов и АЦП параллельного преобразования. Рассмотрим оба типа.

Структурная схема АЦП последовательных приближений приведена на рис. 6.3.

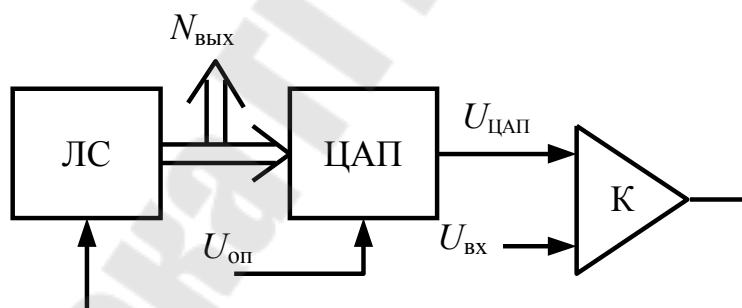


Рис. 6.3. Структурная схема АЦП последовательных приближений с сокращенным перебором кодов

В процессе преобразования логическая схема ЛС (или микропроцессорная система) подает на старший разряд ЦАП логическую единицу, а на остальные разряды – логические нули. При этом на выходе ЦАП появляется напряжение $U_{\text{ЦАП}}$, которое сравнивается компаратором К с входным напряжением $U_{\text{вх}}$. Если $U_{\text{ЦАП}} < U_{\text{вх}}$, то на выходе компаратора появляется логическая единица, которая поступает на вход ЛС. В этом случае ЛС оставляет логическую единицу в старшем разряде ЦАП и формирует логическую единицу в следую-

щем по старшинству разряде. Если $U_{\text{ЦАП}} \geq U_{\text{вх}}$, то на выходе компаратора появляется логический ноль, и ЛС выставляет в старшем разряде ЦАП логический ноль. Далее процесс повторяется для всех разрядов ЦАП. Требуемое количество тактов равно разрядности ЦАП, и, соответственно, разрядности АЦП. После преобразования на входах ЦАП формируется двоичный код $N_{\text{вых}}$, который является выходным для АЦП последовательных приближений. Этот код в десятичной системе счисления рассчитывается по формуле

$$N_{\text{вых}} = \text{int} \left[\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}} \cdot (2^n - 1) \right] = \text{int} \left[\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}} \cdot N_{\text{вых max}} \right], \quad (6.2)$$

где int – функция, выделяющая целую часть; n – разрядность АЦП; $N_{\text{вых max}}$ – максимальное десятичное значение выходного двоичного кода АЦП.

Достоинства АЦП последовательных приближений – простота реализации в интегральном исполнении и высокая надежность работы. Недостаток – пониженное быстродействие.

Структурная схема n -разрядного АЦП параллельного преобразования приведена на рис. 6.4. В этом АЦП имеется 2^n компараторов К, которые сравнивают входное напряжение $U_{\text{вх}}$ с опорным напряжением $U_{\text{оп}}$, поданным через делители напряжения с коэффициентом деления, кратным $\frac{1}{2^n}$. Все компараторы, у которых входное напряжение окажется большим опорного напряжения перейдут в состояния логической единицы. При этом старший компаратор заблокирует выходы младших и подаст единицу на логическую схему ЛС, которая преобразует входной единичный позиционный код в двоичный выходной код $N_{\text{вых}}$. Формула (6.2) справедлива и для этого АЦП.

Достоинства АЦП параллельного преобразования – высокое быстродействие. Недостаток – сложность внутренней структуры и, следовательно, высокая стоимость, а также пониженная надежность работы.

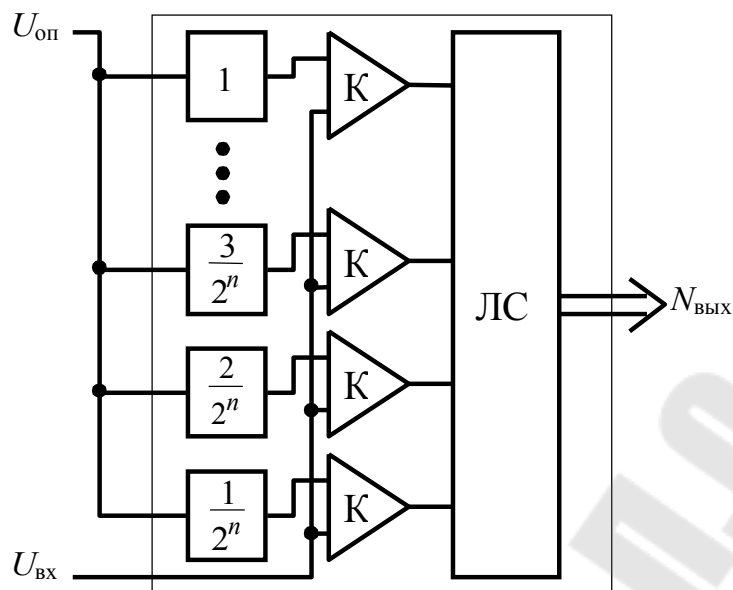


Рис. 6.4. Структурная схема АЦП параллельного преобразования

Условное обозначение и передаточная характеристика четырехразрядного АЦП приведены на рис. 6.5.

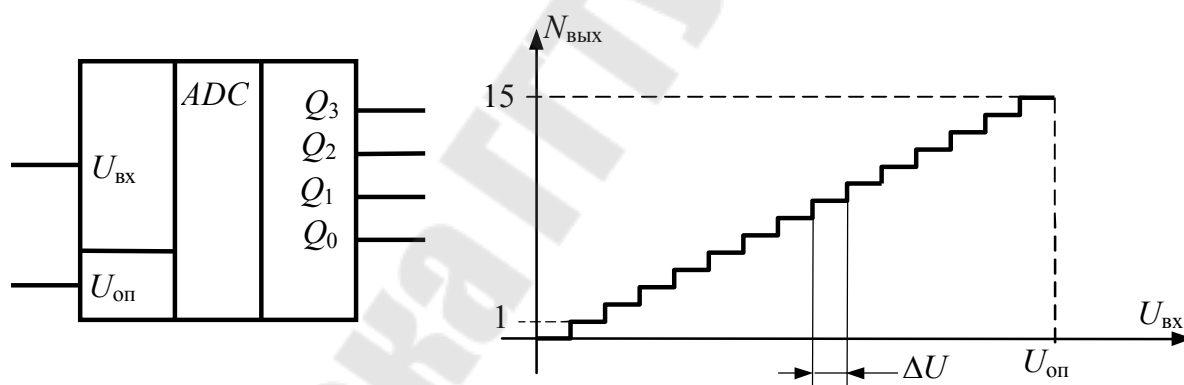


Рис. 6.5. Условное обозначение и передаточная характеристика четырехразрядного АЦП

Выходной двоичный код $N_{\text{ВЫХ}}$ в АЦП представлен цифровыми выходами Q_i . АЦП характеризуются теми же параметрами, что и ЦАП. Соответственно, чем выше разрядность АЦП, тем точнее представляется входное аналоговое напряжение выходным двоичным кодом. На практике применяют разрядности АЦП 8 и выше.

Если использовать аналоговый мультиплексор, то можно получить многоканальный АЦП, схема которого приведена на рис. 6.6.

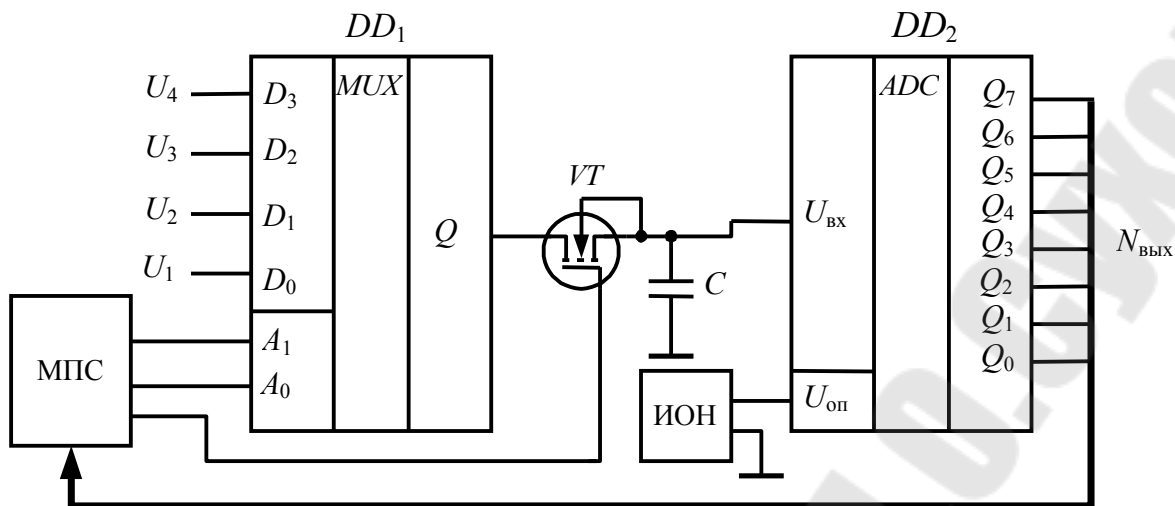


Рис. 6.6. Функциональная схема четырехканального восьмиразрядного АЦП

Работой схемы управляет микропроцессорная система МПС. В первый момент времени МПС подает логические нули на адресные входы A_i аналогового мультиплексора DD_1 и отпирающее напряжение на электронный ключ, собранный на транзисторе VT . На выходе Q мультиплексора появляется напряжение U_1 и конденсатор C заряжается до этого напряжения. Затем МПС подает на транзистор VT запирающее напряжение. Конденсатор C начинает хранить напряжение U_1 . Напряжение хранится конденсатором в течение времени преобразования АЦП DD_2 . Таким образом, транзистор VT и конденсатор C образуют устройство выборки-хранения. Опорное напряжение на АЦП подается от источника опорного напряжения ИОН. Двоичный код, полученный на выходах АЦП, записывается в память МПС. Затем МПС подает на адресные входы мультиплексора следующий двоичный код, соответствующий каналу с напряжением U_2 и процесс повторяется для всех каналов. Если каналы опрашиваются непрерывно, то этот процесс называют сканированием аналоговых каналов.

АЦП – это один из основных элементов современной электроники, так как он соединяет аналоговые сигналы, присутствующие в природе, с цифровой ЭВМ. Практически любое современное электронное устройство, применяющееся в энергетике, содержит АЦП. Например, цифровые измерительные приборы, микропроцессорные счетчики электроэнергии, устройства релейной защиты, электроприводы и т. д.

7. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

7.1. Микропроцессоры

Микропроцессор (*microprocessor*) – это наиболее универсальная программируемая цифровая интегральная микросхема.

Первый микропроцессор был создан в 1969 г. разработчиками американской фирмы *Intel*. Однако по-настоящему широкое распространение микропроцессоры получили при появлении в 1976 г. восьмиразрядного микропроцессора *Intel 8080* с тактовой частотой 2 МГц, содержащего 25 000 транзисторов. С этого времени микропроцессорная техника начала стремительно развиваться. Сформировались два направления: микропроцессоры для специализированных устройств и микропроцессоры для универсальных устройств – компьютеров. Современные микропроцессоры для персональных компьютеров имеют тактовую частоту до 4 ГГц и содержат до 400 миллионов транзисторов. Если начертить полную принципиальную схему такого микропроцессора на уровне транзисторов, то она займет площадь около 100 футбольных полей.

Обобщенная структурная схема микропроцессора приведена на рис. 7.1.

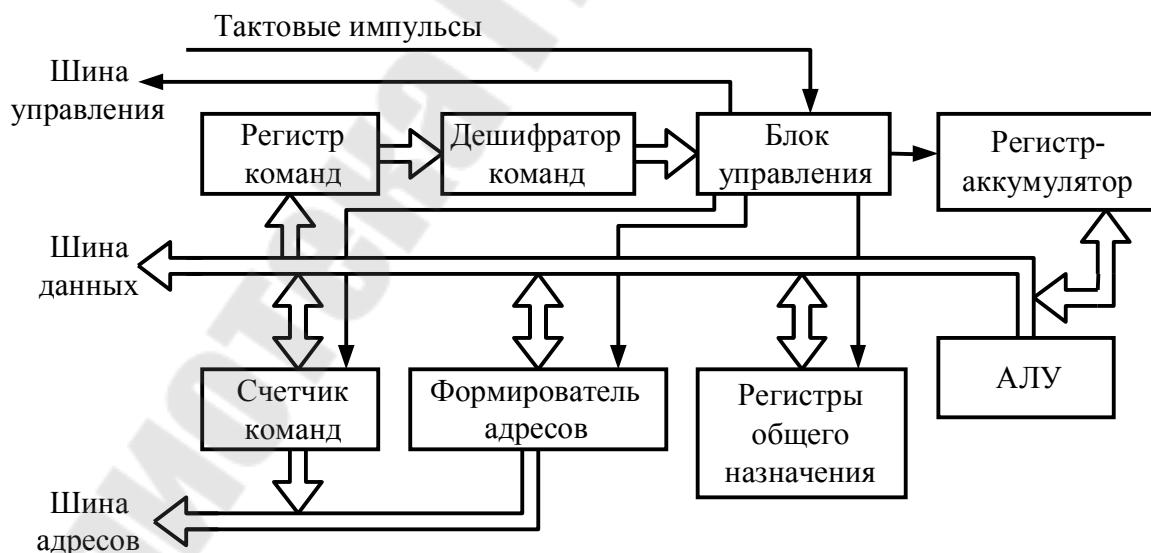


Рис. 7.1. Обобщенная структурная схема микропроцессора

Микропроцессор имеет несколько десятков (или сотен) внешних выводов, большую часть которых можно объединить в три шины:

шину управления (*control bus*), шину данных (*data bus*) и шину адресов (*address bus*). Шины управления и адресов являются однонаправленными, и микропроцессор выставляет на эти шины требуемые логические уровни. Шина данных двунаправленная. Микропроцессор принимает по ней двоичные коды команд и данных, а также выдает двоичные коды данных.

В начале работы микропроцессор с помощью двоичного счетчика команд, формирователя адресов и блока управления выставляет на шины управления и адресов требуемые логические уровни, а затем принимает по шине данных двоичный код команды (*instruction*). Этот код записывается для временного хранения в регистр команд, а после декодируется дешифратором, включающим нужные логические цепи в блоке управления. Блок управления инициирует действия, предписанные декодированной командой. Эти действия заключаются в пересылке кода данных во внутреннюю память микропроцессора – регистр-аккумулятор или регистры общего назначения, – а также в запуске в работу вычислительного ядра микропроцессора – АЛУ. Необходимый двоичный код данных (*data*), т. е. некоторое число или значение адреса приходит в микропроцессор по шине данных сразу за кодом команды. Однако бывают команды, не содержащие данных. Тогда микропроцессор выполняет действия с ранее записанными в его регистры данными. Аккумулятор – это основной регистр, через который в первых микропроцессорах работало большинство команд. Однако в современных микропроцессорах этот регистр по функциональности практически не отличается от остальных регистров общего назначения. Всего в микропроцессорах может быть от 4 до 64 регистров общего назначения. В микропроцессорах для специализированных устройств таких регистров максимум. В микропроцессорах для персональных компьютеров их всего 4. Однако в этих микропроцессорах АЛУ содержит свои собственные регистры, а также имеются десятки и сотни тысяч регистров в так называемой кэш (*cash*) –памяти.

В микропроцессорах для специализированных устройств АЛУ выполняет простейшие арифметические, логические операции, а также операции сравнения. В микропроцессорах для персональных компьютеров АЛУ дополняется так называемым математическим сопроцессором, позволяющим выполнять сложные математические вычисления: тригонометрические функции, логарифмы, возведение в степень и т. д.

Основные характеристики микропроцессоров: тактовая частота, разрядность и быстродействие.

Все действия микропроцессора выполняются последовательно одно за другим с частотой, которая называется тактовой. Тактовые импульсы поступают в микропроцессор с внешнего генератора тактовой частоты. В современных микропроцессорах простейшие команды выполняются за один или два тактовых импульса. Микропроцессоры для специализированных устройств имеют тактовую частоту до 100 МГц, а микропроцессоры для персональных компьютеров – до 4 ГГц.

Разрядность микропроцессора равна разрядности его регистров общего назначения. Чем выше разрядность микропроцессора, тем с большим объемом данных он способен работать непосредственно. Микропроцессоры для специализированных устройств имеют разрядность 8 или 16, а микропроцессоры для персональных компьютеров – 32 или 64. Современные многоядерные микропроцессоры имеют несколько тридцатидвухразрядных ядер, работающих одновременно.

Быстродействие микропроцессора зависит от тактовой частоты и разрядности. При увеличении тактовой частоты, например, в 2 раза, быстродействие микропроцессора увеличивается менее чем в 2 раза из-за сложности внутренних процессов. Поэтому в простейшем случае быстродействие оценивают в *MIPS – Mega Instruction Per Second* – миллионов операций в секунду. Современные микропроцессоры для специализированных устройств имеют быстродействие до 100 *MIPS*.

Ассемблер (*Assembler*) – это язык программирования микропроцессора. Каждой команде на языке Ассемблер поставлен в соответствие двоичный код команды микропроцессора. Большинство команд микропроцессора можно разделить на команды пересылки данных, арифметические команды, логические команды, команды сравнения, команды переходов. Каждый микропроцессор имеет свой собственный Ассемблер. Программы на языке Ассемблер максимально сложны, однако позволяют использовать 100 % возможностей микропроцессора при минимальном требуемом объеме памяти.

Микропроцессор не способен работать самостоятельно. Для его работы нужны вспомогательные устройства, которые вместе с ним образуют микропроцессорную систему.

7.2. Микропроцессорная система

Обобщенная структурная схема микропроцессорной системы приведена на рис. 7.2.

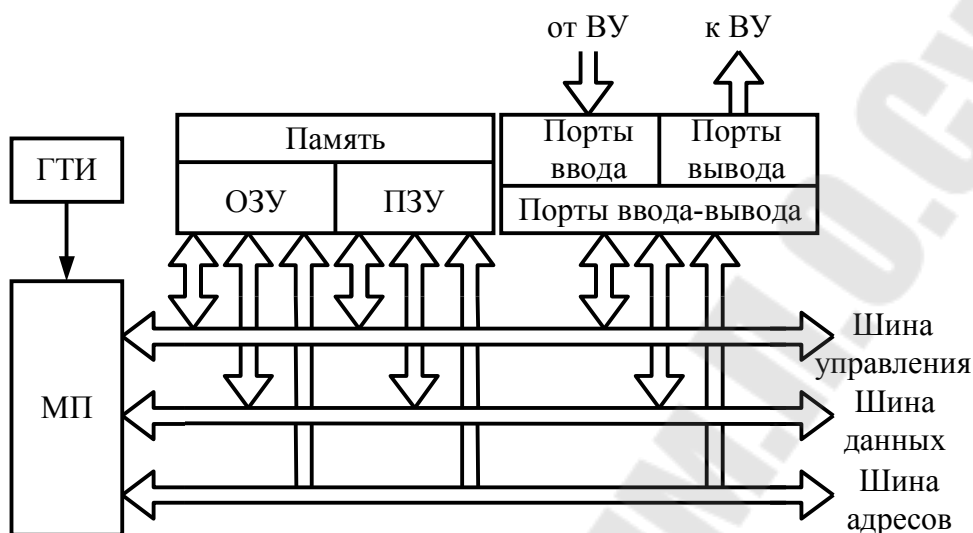


Рис. 7.2. Структурная схема микропроцессорной системы

Основными элементами микропроцессорной системы помимо микропроцессора МП являются генератор тактовых импульсов ГТИ, память и порты ввода-вывода. Память бывает двух видов: оперативное запоминающее устройство ОЗУ и постоянное запоминающее устройство ПЗУ.

ПЗУ (*ROM – Read Only Memory* – постоянная память) – это энергонезависимая память, в которой данные сохраняются и после отключения питания. В зависимости от способа хранения логических уровней бывают ПЗУ на магнитных носителях (дискеты, жесткие диски), ПЗУ на оптических носителях (*CD* и *DVD* диски) и ПЗУ на интегральных микросхемах.

В ПЗУ на магнитных носителях используются принципы остаточной намагниченности и гигантского магнетосопротивления. Логические уровни записываются или считываются с помощью специальной магнитной головки, движущейся над вращающимся диском из магнитных материалов.

В ПЗУ на оптических носителях используется принцип сканирования светотражающей поверхности с помощью лазерного луча. Логические уровни записываются или считываются путем взаимодействия движущегося лазерного луча с поверхностью вращающегося диска из светочувствительных материалов.

ПЗУ на магнитных и оптических носителях имеют относительно невысокую стоимость и практически неограниченное количество циклов записи-стирания. Их основной недостаток – наличие электроприводов для раскручивания дисков, что увеличивает габариты и снижает надежность работы.

В ПЗУ на интегральных микросхемах используется принцип длительного хранения электростатических зарядов на емкостях затворов полевых транзисторов. Логические уровни записываются или считываются с помощью многоразрядных дешифраторов. В современной электронике используются два основных типа ПЗУ на интегральных микросхемах: *EEPROM* и *FLASH* (читается – флэш).

В *EEPROM* (*Electrically Erasable Programmable ROM* – электрически перезаписываемое ПЗУ) при записи и чтении данных можно обращаться к каждой отдельной ячейке памяти, что увеличивает скорость работы, но также повышает стоимость такого ПЗУ. В *FLASH* (вспышка) – памяти при записи и чтении данных можно обращаться только к отдельным блокам, группам ячеек памяти, что снижает скорость работы, но позволяет получать значительные объемы памяти на одном кристалле при относительно невысокой стоимости. В современных ПЗУ на интегральных микросхемах количество циклов записи-стирания ограничено и не превышает 10^6 . Однако очевидно, что в будущем этот недостаток будет преодолён и ПЗУ на интегральных микросхемах вытеснят другие виды ПЗУ.

Все виды ПЗУ характеризуются тем, что время записи логических уровней существенно превышает время их считывания.

ОЗУ (*RAM – Random-Access Memory* – память с произвольной выборкой) – это энергозависимая память, в которой данные теряются после отключения питания. В зависимости от способа хранения логических уровней бывают статические ОЗУ (*Static RAM*) и динамические ОЗУ (*Dynamic RAM*).

В статических ОЗУ каждая ячейка памяти – это регистр. Такие ОЗУ имеют высокое быстродействие, но не позволяют разместить большие объёмы памяти на одном кристалле. Поэтому они используются в микропроцессорных устройствах специального назначения, либо как внутренняя память микропроцессоров или однокристалльных микроконтроллеров, например, в регистре – аккумуляторе.

В динамических ОЗУ логические уровни хранятся на емкостях затворов полевых транзисторов. Такие ОЗУ имеют более низкое быстродействие, чем статические ОЗУ, а также требуют дополнитель-

ных схем регенерации (обновления) логических уровней, однако позволяют разместить большие объёмы памяти на одном кристалле. Динамические ОЗУ, как правило, применяют в компьютерах.

Все виды ОЗУ характеризуются тем, что время записи и чтения логических уровней в них значительно меньше, чем в ПЗУ. В противном случае в ОЗУ не было бы необходимости.

В ПЗУ хранятся двоичные коды программы для микропроцессора, а также наиболее ответственные данные. В ОЗУ хранятся результаты промежуточных вычислений микропроцессора.

Порты ввода-вывода представляют собой интегральные микросхемы, предназначенные для обмена данными между микропроцессорной системой и внешними устройствами, например, с АЦП или с другими микропроцессорными системами.

Микропроцессорная система работает следующим образом. Микропроцессор выставляет на шину адресов двоичный код адреса, т. е. номер требуемой ячейки ПЗУ. В результате ПЗУ выставляет на шину данных двоичный код команды, находящейся по заданному адресу, которая выполняется микропроцессором. Далее снова происходит обмен логическими уровнями между микропроцессором и памятью. В требуемые моменты времени через порты ввода-вывода осуществляется обмен данными с внешними устройствами.

Контроллер (*controller*) – это микропроцессорная система, выполненная в пределах одной печатной платы и предназначенная для управления технологическими процессами.

Однокристалльный микроконтроллер (*single-chip microcontroller*) – это интегральная микросхема, в состав которой входят все необходимые элементы микропроцессорной системы: микропроцессор, память и порты ввода-вывода, а также дополнительные элементы: двоичные счетчики-таймеры, интерфейсы для удаленного обмена данными, АЦП и др.

Подавляющее большинство современных устройств, применяющихся в промышленности, в том числе и в энергетике, реализованы на основе однокристалльных микроконтроллеров: измерительные приборы, счетчики электроэнергии, электроприводы, блоки релейной защиты, автоматики и т. д. Микропроцессоры непосредственно используются только в универсальных устройствах с мощными вычислительными возможностями – компьютерах.

8. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Основными элементами силовой электроники являются различные преобразователи. Все они обладают одним общим признаком – управляют потоком энергии посредством включения и выключения вентиляльных электронных компонентов (диодов, тиристоров, или транзисторов). Бывают преобразователи, связывающие цепь переменного тока с цепью постоянного тока или наоборот. Эти преобразователи обеспечивают передачу энергии в обоих направлениях. В зависимости от потока энергии различают выпрямительный и инверторный режимы их работы. Преобразователи, связывающие цепи переменного тока различной частоты, называют **преобразователями частоты** или частотными преобразователями.

8.1. Неуправляемые выпрямители однофазного и трехфазного тока

Выпрямителем называют устройство, предназначенное для преобразования энергии источника переменного тока в постоянный ток. Необходимость в подобном преобразовании возникает, когда питание потребителя осуществляется постоянным током, а источником электрической энергии является источник переменного тока, например, промышленная сеть частотой 50 Гц.

Выпрямители бывают однофазные и трехфазные, с нулевым выводом и мостовые.

Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом и его временные диаграммы работы приведены на рис. 8.1.

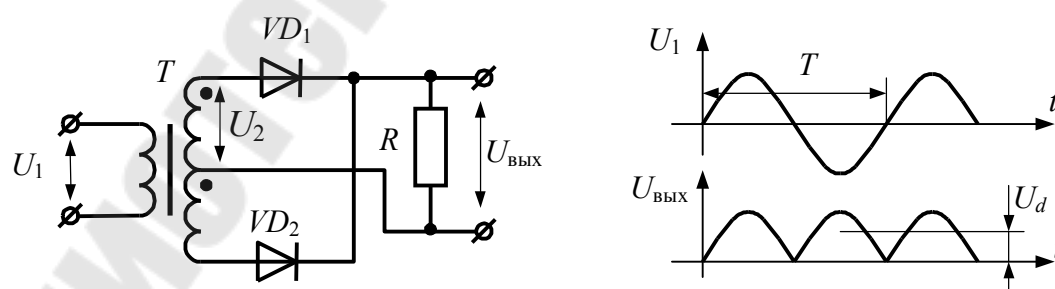


Рис. 8.1. Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом и его временные диаграммы работы

Схема содержит трансформатор T с двумя вторичными обмотками, включенными согласно. Положительная полуволна входного

напряжения трансформируется в первую вторичную обмотку с положительным потенциалом относительно нулевого вывода, а во вторую вторичную обмотку – с отрицательным потенциалом. В результате диод VD_1 открывается, пропуская полуволну в нагрузку, а диод VD_2 закрывается. При отрицательной полуволне входного напряжения положительный потенциал появляется во второй вторичной обмотке и диод VD_2 открывается, пропуская полуволну в нагрузку, а диод VD_1 закрывается. В результате на нагрузке формируется выпрямленное напряжение, имеющее как переменную, так и постоянную составляющие. Постоянная составляющая равна среднему значению U_d . В таком выпрямителе частота переменной составляющей выходного напряжения вдвое выше, чем частота входного напряжения.

Схема двухполупериодного мостового выпрямителя (диодного моста) и его временные диаграммы работы приведены на рис. 8.2.

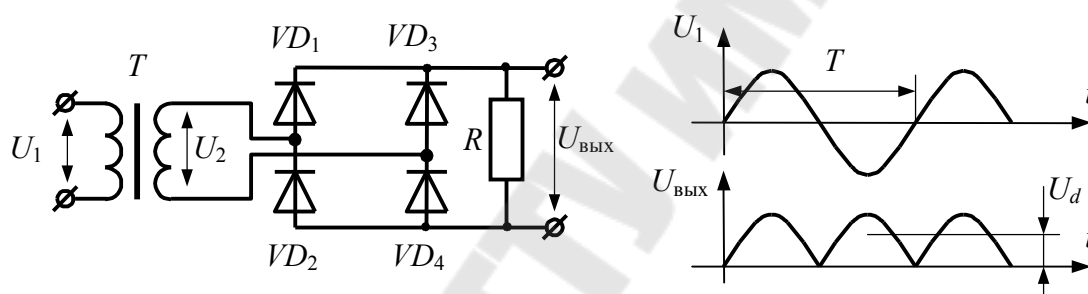


Рис. 8.2. Схема и диаграммы работы двухполупериодного мостового выпрямителя

В процессе работы выпрямителя на положительной полуволне входного напряжения открываются диоды VD_1 и VD_4 , пропуская ток в нагрузку, а на отрицательной полуволне – диоды VD_2 и VD_3 . Таким образом при периодическом изменении полярности напряжения U_2 токи через нагрузку R будут протекать в одном направлении.

Двухполупериодные выпрямители в подавляющем большинстве случаев применяются в блоках питания электронных устройств.

Схема трехфазного выпрямителя с нулевым проводом и его временные диаграммы работы приведены на рис. 8.3. Схема содержит трехфазный трансформатор T и диоды VD_1 – VD_3 .

В таком выпрямителе частота переменной составляющей выходного напряжения втрое выше, чем частота входного напряжения. В процессе работы в каждый момент времени открыт только один из диодов. Открыт тот диод, на аноде которого в данный момент време-

ни фазное напряжение больше, чем остальные два фазных напряжения (принцип максиселектора). В результате, на нагрузке формируется выпрямленное напряжение, представляющее собой огибающую системы фазных синусоид трехфазного напряжения.

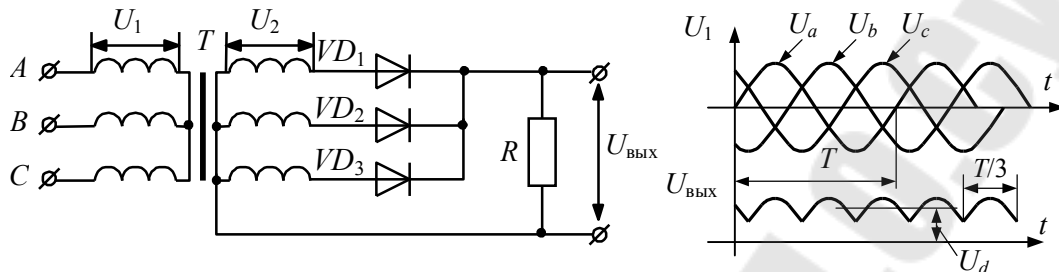


Рис. 8.3. Схема и диаграммы работы трехфазного выпрямителя с нулевым проводом

Трехфазный выпрямитель с нулевым проводом имеет более высокое качество выпрямления, чем однофазные выпрямители.

Схема трехфазного мостового выпрямителя (схема Ларионова) и его временные диаграммы работы приведены на рис. 8.4.

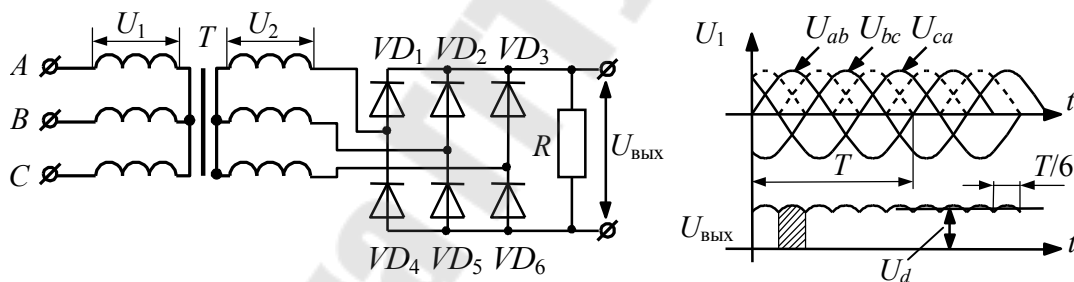


Рис. 8.4. Схема и диаграммы работы трехфазного мостового выпрямителя

В таком выпрямителе частота переменной составляющей выходного напряжения в шесть раз выше, чем частота входного напряжения. Схема работает за шесть тактов. В первый такт (заштрихованная область на рис. 8.4) максимальными по модулю являются значения положительной полуволны напряжения U_{ab} , и открыты диоды, попускающие эту полуволну в нагрузку, т. е. VD_1 и VD_5 . Во втором такте максимальными по модулю являются значения отрицательной полуволны напряжения U_{ca} , и открыты диоды VD_1 и VD_6 . Соответствие номера такта и открытых диодов сведены в таблицу 8.1. Далее процесс повторяется циклически.

Таблица 8.1

Очередность отпирания диодов в трехфазном мостовом выпрямителе

Номер такта	1	2	3	4	5	6
Диоды	VD_1, VD_5	VD_1, VD_6	VD_2, VD_6	VD_2, VD_4	VD_3, VD_4	VD_3, VD_5

Как видно из таблицы 8.1, каждый диод открыт два такта. В результате, на нагрузке формируется выпрямленное напряжение, представляющее собой огибающую системы линейных (междуфазных) синусоид трехфазного напряжения.

Трехфазный мостовой выпрямитель имеет более высокое качество выпрямления, чем все вышерассмотренные выпрямители.

Трехфазные неуправляемые выпрямители применяются для питания двигателей постоянного тока, а также для создания электрических сетей постоянного тока.

Основные параметры выпрямителей: среднее значение выпрямленного напряжения U_d ; средний ток в нагрузочном устройстве $I_d = \frac{U_d}{R_H}$; средний прямой ток диода $I_{пр.ср}$; максимальное обратное напряжение на закрытом диоде $U_{обр\ max}$; коэффициент пульсации ρ (отношение амплитуды основной гармоники выпрямленного напряжения к среднему напряжению U_d); кратность частоты основной гармоники выпрямленного напряжения к частоте сети (число пульсаций за период) m . В таблице 8.2 приведены расчетные соотношения для определения основных параметров рассмотренных выше выпрямителей для действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора U_2 .

Таблица 8.2

Связь между параметрами неуправляемых выпрямителей

Параметр	Схема			
	Двухполупериодный выпрямитель с нулевым проводом	Двухполупериодный мостовой выпрямитель	Трехфазный выпрямитель с нулевым проводом	Трехфазный мостовой выпрямитель
U_d	$0,9 \cdot U_2$	$0,9 \cdot U_2$	$1,17 \cdot U_2$	$2,34 \cdot U_2$
I_d	$0,9 \cdot U_2 / R_H$	$0,9 \cdot U_2 / R_H$	$1,17 \cdot U_2 / R_H$	$2,34 \cdot U_2 / R_H$
$I_{пр.ср}$	$I_d / 2$	$I_d / 2$	$I_d / 3$	$I_d / 3$
$U_{обр\ max}$	$\sqrt{2} \cdot 2 \cdot U_2$	$\sqrt{2} \cdot U_2$	$\sqrt{6} \cdot U_2$	$\sqrt{6} \cdot U_2$
ρ	0,67	0,67	0,25	0,057
m	2	2	3	6

8.2. Сглаживающие фильтры

Сглаживающий фильтр – это фильтр низких частот, предназначенный для сглаживания напряжения на выходе выпрямителя. В зависимости от применения активных и реактивных элементов бывают C -фильтры, L -фильтры, RC -фильтры, LC -фильтры и др.

Качество сглаживающего фильтра оценивается по значению коэффициента пульсации напряжения на выходе фильтра:

$$p_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\phi}}{U_{\phi}}, \quad (8.1)$$

где ΔU_{ϕ} – максимальный размах пульсаций; U_{ϕ} – среднее значение выходного напряжения фильтра.

Схема и диаграммы работы C -фильтра, подключенного к двухполупериодному выпрямителю, приведены на рис. 8.5.

В процессе работы конденсатор C заряжается выпрямленным напряжением U_2 до тех пор, пока значение напряжения на нем не превысит максимальное значение U_2 . После этого конденсатор разряжается, отдавая свою энергию в нагрузку. Время разрядки конденсатора приблизительно вдвое превышает время его зарядки. Значение снижения напряжения на конденсаторе за время его разрядки зависит от емкости конденсатора и сопротивления нагрузки и, соответственно, определяет значение размаха пульсаций ΔU_{ϕ} .

Чем больше емкость конденсатора C и чем выше сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, тем меньше размах пульсаций. И, наоборот, при снижении емкости конденсатора и сопротивления нагрузки размах пульсаций увеличивается. Эффект сглаживания достигается за счет того, что конденсатор не успевает полностью разрядиться. Для C -фильтра коэффициент пульсаций рассчитывается по формуле

$$p_{\text{вых}} = \frac{0,3 \cdot T}{2 \cdot C \cdot R_{\text{н}}}, \quad (8.2)$$

где T – период сетевой частоты.

Важной особенностью C -фильтра является импульсная форма тока, потребляемого из электрической сети (рис. 8.5). Ток потребляется только в процессе зарядки конденсатора в моменты времени, соответствующие вершинам синусоиды напряжения. Поскольку рассматриваемая схема используется в блоках питания большинства элек-

тронных устройств, в том числе телевизоров и персональных компьютеров, то суммарная нагрузка этих устройств вносит нелинейные искажения в синусоиду напряжения электрической сети в виде площадок в области вершин синусоиды (показано пунктиром на верхней диаграмме на рис. 8.5).

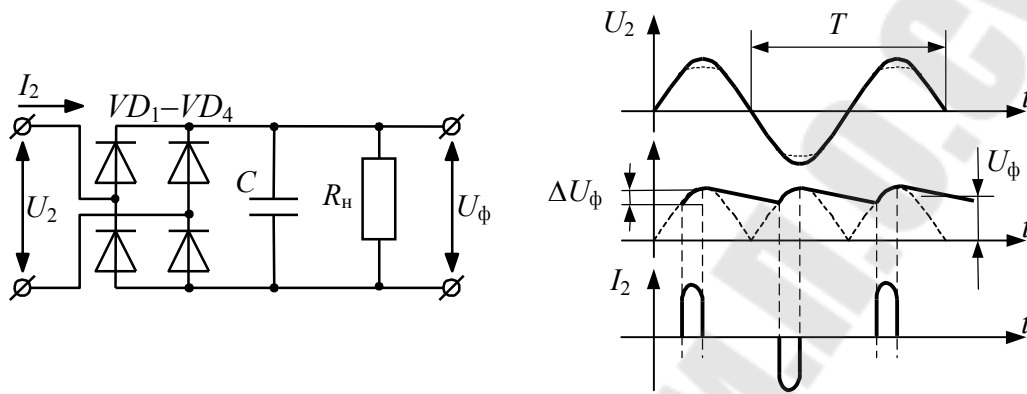


Рис. 8.5. Схема и диаграммы работы C-фильтра

Схема и диаграммы работы L-фильтра, подключенного к двухполупериодному выпрямителю, приведены на рис. 8.6.

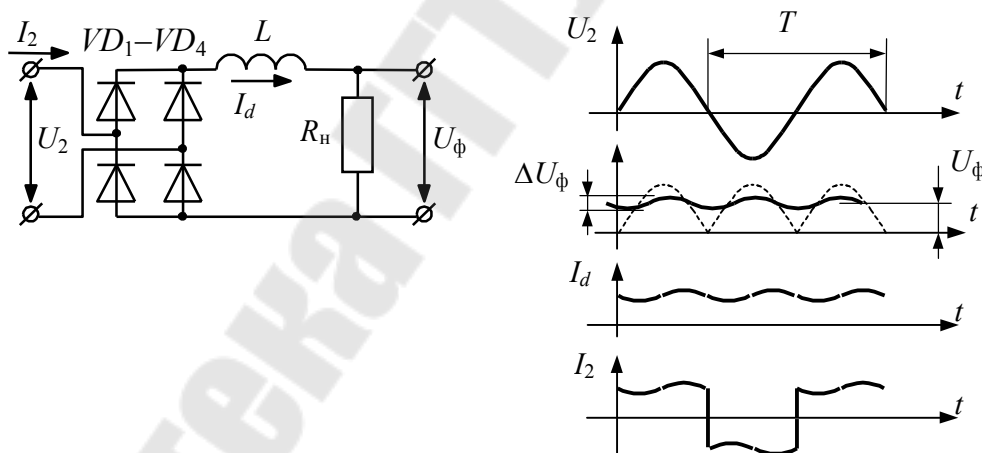


Рис. 8.6. Схема и диаграммы работы L-фильтра

В процессе работы ферромагнитный сердечник дросселя L намагничивается током I_d , создаваемым выпрямленным напряжением U_2 до тех пор, пока значение напряжения на нагрузке не превысит максимальное значение U_2 . После этого сердечник дросселя L размагничивается, отдавая свою энергию в нагрузку и в электрическую сеть, а падение напряжения на дросселе, в соответствии с правилом Ленца, меняет знак. При этом дроссель выполняет функцию источни-

ка тока. Так как ток в индуктивности не может измениться скачком, то ток I_d является непрерывным и имеет практически синусоидальную форму со значительной постоянной составляющей и частотой, равной частоте выпрямленного напряжения. В связи с этим, напряжение на нагрузке также имеет синусоидальную форму со значительной постоянной составляющей. Ток I_2 , потребляемый из сети, имеет импульсную форму, близкую к прямоугольной.

Чем меньше значение сопротивления нагрузки и чем больше значение индуктивности L , тем меньше размах пульсаций ΔU_ϕ .

Для L -фильтра коэффициент пульсаций рассчитывается по формуле

$$p_{\text{вых}} = \frac{0,25 \cdot R_H \cdot T}{2 \cdot L}, \quad (8.3)$$

где T – период сетевой частоты.

Основная область применения L -фильтра – силовая электроника. Недостатки L -фильтра по сравнению с C -фильтром: потребление реактивной мощности из электрической сети и повышенная стоимость. Достоинство L -фильтра – возможность получать постоянное напряжение для мощных нагрузок.

8.3. Стабилизаторы напряжения

Стабилизатор напряжения – это схема, преобразующая сглаженное постоянное напряжение в стабилизированное постоянное напряжение. Стабилизаторы напряжения подключают к выходам сглаживающих фильтров.

Параметрический стабилизатор напряжения представляет собой простейший стабилизатор напряжения. Его схема и диаграммы работы приведены на рис. 8.7.

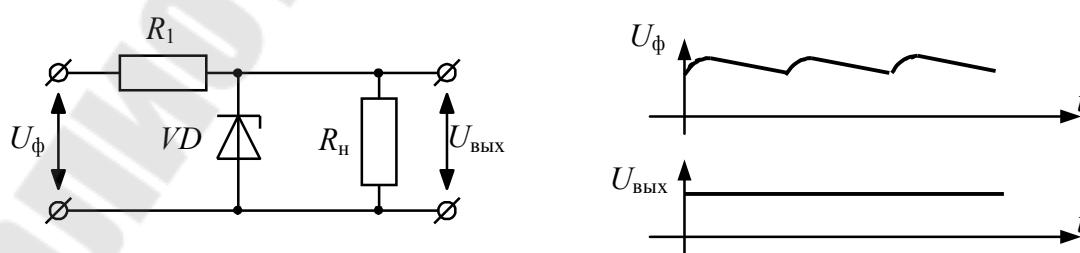


Рис. 8.7. Схема и диаграммы работы параметрического стабилизатора напряжения

Основным элементом стабилизатора является стабилитрон VD , непосредственно выполняющий функцию стабилизации напряжения. Резистор R_1 ограничивает значение тока через стабилитрон и называется балластным. Значение его сопротивления рассчитывается по формуле

$$R_1 = \frac{U_\phi - U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{СТ}} + I_{\text{Н}}}, \quad (8.4)$$

где $I_{\text{СТ}}$ – ток, протекающий через стабилитрон; $I_{\text{Н}}$ – ток нагрузки.

Параметрический стабилизатор имеет невысокое качество стабилизации, особенно при токах нагрузки, превышающих значение 20 мА. Улучшенными характеристиками обладает компенсационный стабилизатор напряжения, схема которого приведена на рис. 8.8.

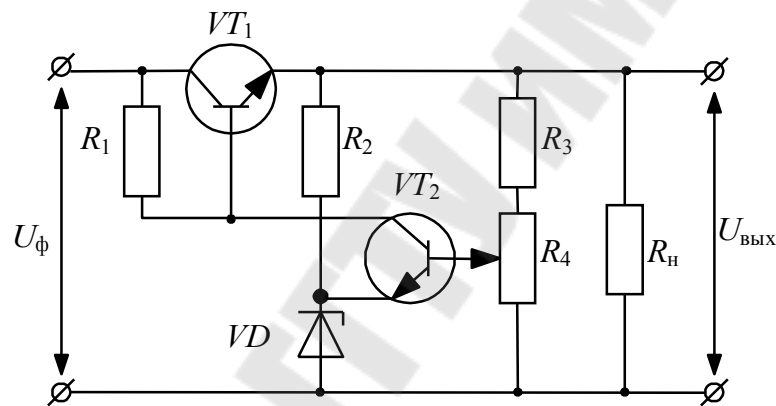


Рис. 8.8. Компенсационный стабилизатор напряжения

Схема работает следующим образом. При снижении напряжения на нагрузке снижается и напряжение на базе транзистора VT_2 , что приводит к снижению тока коллектора VT_2 и повышению потенциала на базе транзистора VT_1 , включенного по схеме эмиттерного повторителя. Повышение потенциала на базе транзистора VT_1 приводит к повышению напряжения на нагрузке. Таким образом, схема автоматически компенсирует изменения напряжения на нагрузке. Значение этого напряжения задается стабилитроном VD и переменным резистором R_4 .

В компенсационном стабилизаторе напряжения качество стабилизации значительно выше, чем в параметрическом стабилизаторе.

Стабилизаторы напряжения непрерывного действия (параметрические и компенсационные) имеют главный недостаток – низкий КПД. Потеря электроэнергии на регулирующем элементе (транзисто-

ре VT_1 на рис. 8.8) зависит от разности входного $U_{\text{ф}}$ и выходного стабилизированного $U_{\text{вых}}$ напряжений: $P_{\text{пот}} = \kappa \cdot (U_{\text{ф}} - U_{\text{вых}}) I_{\text{н}}$. Поэтому стабилизаторы, преобразующие высокое постоянное напряжение в низкое стабилизированное напряжение имеют КПД не более 10–15%. Этому недостатка лишены импульсные стабилизаторы напряжения, которые еще называются чопперами (*chopper*). У них регулирующий компонент – полевой транзистор – работает в ключевом режиме и, следовательно, потеря напряжения на нем небольшая.

Схема импульсного стабилизатора напряжения приведена на рис. 8.9.

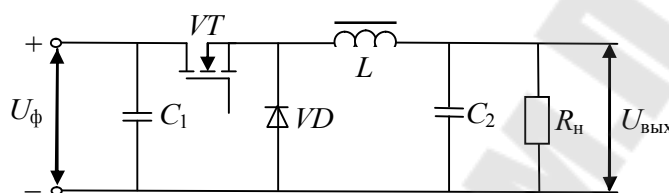


Рис. 8.9. Схема импульсного стабилизатора напряжения

Входное постоянное напряжение через конденсатор сглаживающего фильтра C_1 подается на регулирующий транзистор VT , который осуществляет высокочастотную коммутацию тока. Кроме этого, в состав стабилизатора входят разрядный диод VD , дроссель L , выходной конденсатор C_2 , а также блок управления транзистором (на схеме не показан).

Высокочастотные импульсы, подаваемые на затвор от блока управления, периодически открывают и закрывают транзистор. Частота подачи импульсов постоянная, примерно 40–100 кГц. Однако длительность открытого состояния транзистора за один такт частоты может изменяться в зависимости от уровня входного напряжения. Если время открытого состояния транзистора обозначить $t_{\text{и}}$, а период высокочастотных импульсов T , то отношение $t_{\text{и}}/T = k_3$ называется коэффициентом заполнения импульса. Значение среднего напряжения на выходе транзистора изменяется пропорционально коэффициенту заполнения: $U_{\text{ср}} = k_3 \cdot U_{\text{вх}}$.

В стабилизаторе $U_{\text{ср}} = U_{\text{вых}} = \text{const}$, следовательно, чтобы выполнить это условие при изменении входного напряжения $U_{\text{вх}}$ необходимо обратно пропорционально изменять коэффициент заполнения k_3 . Эту функцию выполняет блок управления.

На выходе транзистора напряжение имеет дискретную форму. Для получения на нагрузке $R_{\text{н}}$ непрерывного стабилизированного на-

пряжения (тока) применяется контур VD , L и C_2 . Указанный контур работает следующим образом.

При открытом транзисторе на контур подается положительное напряжение, конденсатор при этом заряжается и дроссель накапливает электромагнитную энергию. После того, как транзисторный ключ закроется, наступает фаза разряда. Конденсатор C_2 при этом разряжается на нагрузку R_H , а накопленная энергии дросселя создает ток, который протекает по контуру $L - R_H - VD - L$, и так происходит периодически: сначала накачка энергии в дроссель, затем отдача энергии в нагрузку через разрядный контур. Так как частота переключения транзистора очень высокая, то ток в нагрузке практически не изменяется. Разрядный диод одновременно служит для защиты транзистора от перенапряжения.

В настоящее время промышленность выпускает микросхемы для чопперного стабилизатора, например, типа К1155ЕУ2, в состав которой входят блок управления, силовой транзистор и элементы защиты. КПД чопперного стабилизатора достигает 95 %.

8.4. Управляемые выпрямители

Выпрямитель, у которого значение выпрямленного напряжения можно плавно изменять, называется управляемым выпрямителем.

В отличие от обычных выпрямителей, в управляемых вместо диодов применяются тиристоры (см. гл. 2). Для открытия тиристора необходимо соблюсти два условия: подать на него прямое напряжение, т. е. на анод плюс источника питания, а на катод – минус, а на управляющий электрод подать короткий положительный импульс. Закрывается тиристор самопроизвольно при появлении на нем обратного напряжения или напряжения, равного нулю.

Временная диаграмма управляемого двухполупериодного выпрямителя, выполненного по схеме рис. 8.1 или рис. 8.2 (если заменить в них диоды на тиристоры), приведена на рис. 8.10.

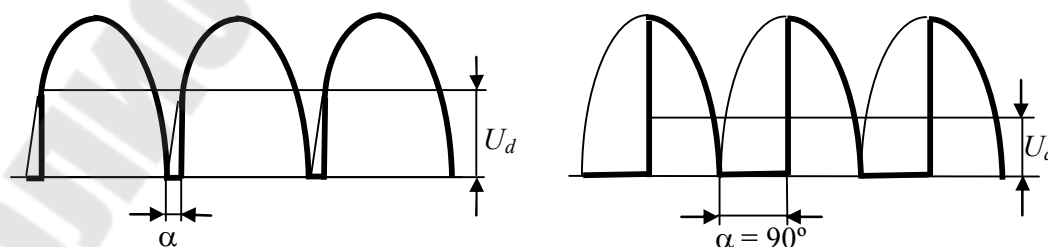


Рис. 8.10. Диаграмма выходного напряжения управляемого двухполупериодного выпрямителя при активной нагрузке

Углом управления тиристора α называется электрический угол запаздывания подачи управляющего импульса от начала появления на тиристоре прямого напряжения. Изменяя угол α , изменяется среднее выпрямленное напряжение U_d . При активной нагрузке эта зависимость выражается формулой

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (8.5)$$

где U_{d0} – среднее выпрямленное напряжение при $\alpha = 0$.

Угол α в однофазных выпрямителях может изменяться в пределах от 0 до 180° . При $\alpha = 180^\circ$ выходное напряжение $U_d = 0$.

Для трехфазных управляемых выпрямителей процессы коммутации тиристорov протекают аналогично, но, в отличие от однофазных выпрямителей, у них угол α изменяется в пределах 120° . Причем в мостовых схемах выпрямления каждый тиристор за период открывается два раза по 60° . Например, тиристор в фазе A сначала открывается в паре с тиристором в фазе B , а затем с тиристором в фазе C .

Если нагрузка на выпрямитель имеет большую индуктивность, например электродвигатели, то момент закрытия тиристора не совпадает с моментом перехода через нуль напряжения U_d . На рис 8.11 приведена диаграмма коммутации тиристора при индуктивной нагрузке.



Рис. 8.11. Структурная схема управляемого выпрямителя и его диаграмма выходного напряжения при индуктивной нагрузке

После момента открытия тиристора ток в нагрузке плавно нарастает, что соответствует накоплению энергии в индуктивности. При спаде тока эта энергия отдается обратно. В этом режиме на индуктивности появляется ЭДС самоиндукции с обратной полярностью, которая создает прямой ток в открытом тиристоре, и индуктивность становится источником питания. Открытый тиристор не закрывается, в результате чего ток продолжает протекать через нагрузку и после перехода напряжения сети через нуль. Однако в момент подачи управляющего импульса на следующий тиристор к первому тиристо-

ру будет приложено обратное напряжение и он закроется. По этой причине в кривой напряжения U_d появляются участки отрицательной полярности и, следовательно, среднее напряжение уменьшается значительно быстрее, чем при чисто активной нагрузке. Зависимость $U_d = f(\alpha)$ при индуктивной нагрузке следующая:

$$U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha. \quad (8.6)$$

При $\alpha = 90^\circ$ напряжение $U_d = 0$ (рис. 8.11).

Мощные управляемые выпрямители применяются для питания электродвигателей постоянного тока, а также в линиях электропередачи. Характерной особенностью электропередач постоянного тока является практически мгновенное отключение коротких замыканий в сети за счет прекращения подачи управляющих импульсов на тиристоры.

8.5. Инверторы

В инверторе используется свойство обратимости преобразования энергии в управляемых выпрямителях. На рис. 8.12 изображена структурная схема инвертора, питающего трехфазный электродвигатель переменного тока M от источника постоянного напряжения $E_{\text{п}}$.

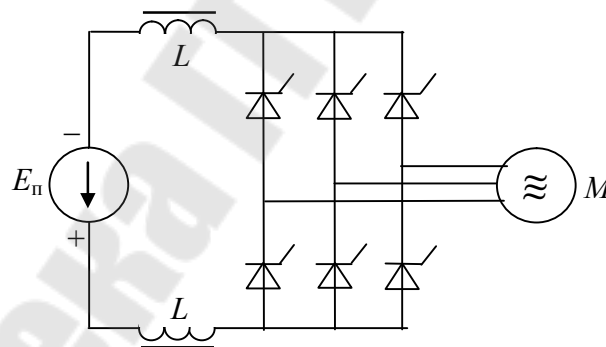


Рис. 8.12. Структурная схема инвертора

Источник постоянного напряжения $E_{\text{п}}$ подключен к тиристорному мосту с полярностью, соответствующей прямому напряжению на тиристорах. С помощью блока управления (на схеме не показан) на управляющие электроды тиристоров подаются импульсы в последовательности, соответствующей трехфазному выпрямителю (табл. 8.1). В результате коммутации тиристоров постоянное напряжение $E_{\text{п}}$ преобразуется в переменное. Дроссели L , показанные на схеме, необходимы для сглаживания тока нагрузки при коммутации тиристоров.

Если вместо электродвигателя M применить трехфазный трансформатор, вторичная обмотка которого включена в сеть переменного тока, и блок управления синхронизировать с напряжением сети, то энергия постоянного тока источника E_{Π} через инвертор будет передаваться в сеть переменного тока. Обычно в качестве источника E_{Π} используется электродвигатель постоянного тока. В нормальном режиме работы электродвигатель (ЭД) получает электроэнергию от управляемого выпрямителя. При отключении электродвигателя в режиме торможения он работает как генератор, отдавая запасенную кинетическую энергию в сеть. Такой режим работы ЭД называется режимом инвертирования или режимом рекуперативного торможения. В режиме инвертирования угол управления тиристоров изменяется ровно на 180° по отношению к углу управления выпрямителя при нормальном режиме работы электродвигателя. Следовательно, для отключения и последующего торможения электродвигателя достаточно перевести управляемый выпрямитель в режим инвертора. Такой способ рекуперативного торможения применяется в городском электротранспорте и на электрифицированных железных дорогах. Например, когда электропоезд катится под уклон, его тяговые двигатели, работая как генераторы, отдают электроэнергию в контактную сеть. Величина тормозного момента при этом регулируется током возбуждения ЭД.

8.6. Частотные преобразователи

Частотный преобразователь состоит из последовательно включенных выпрямителя и инвертора с независимой от сети системой управления. На рис. 8.13 приведена структурная схема частотного преобразователя.

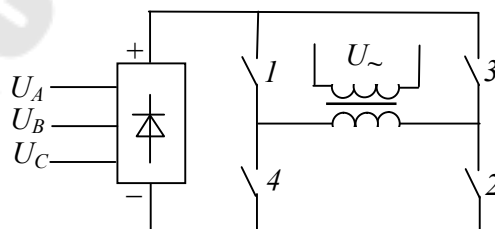


Рис. 8.13. Структурная схема частотного преобразователя

В инверторе в качестве ключей $1, 2, 3, 4$ применены запираемые тиристоры или $IGBT$. На схеме изображен однофазный инвертор, но бывают и трехфазные, как показано на рис. 8.13.

Принцип работы частотного преобразователя следующий.

От системы управления ключи циклически замыкаются парами сначала 1 и 2, а затем 3 и 4. В результате ток в первичной обмотке трансформатора периодически изменяет направление и, следовательно, напряжение на его вторичной обмотке будет переменным. Для формирования переменного напряжения заданной частоты в системе управления ключами применен способ широтно-импульсной модуляции (ШИМ), принцип действия которого поясняется на рис. 8.14.

В блоке управления ключами имеется высокочастотный генератор тактовой частоты, который вырабатывает импульсы с периодом следования T . В течение времени T ключи попарно находятся в открытом состоянии, т. е. проводящее состояние ключей за один период равно $t_{и}$. Отношение $t_{и}/T = k_3$ называется коэффициентом заполнения тактовой последовательности. Значение среднего напряжения на выходе инвертора прямо пропорционально коэффициенту заполнения $U_{ср} = k_3 \cdot U_{п}$.

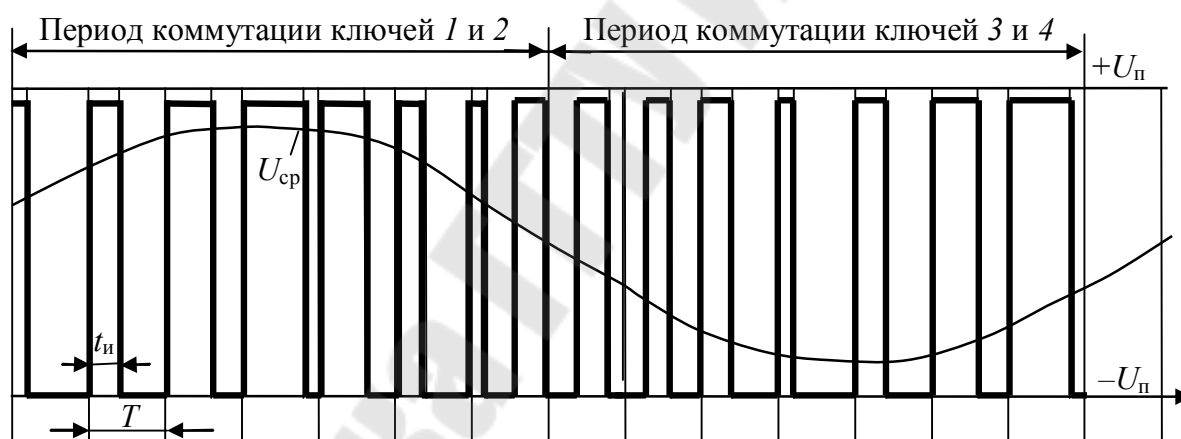


Рис. 8.14. Способ широтно-импульсной модуляции ключей частотного преобразователя

Для определенного закона изменения коэффициента k_3 среднее выходное напряжение изменяется в виде полупериода синусоиды. Положительный полупериод синусоиды формируют ключи 1 и 2, отрицательный – 3 и 4. В итоге можно изменять частоту переменного напряжения. Дискретность изменения формы выходного напряжения на один такт частоты незначительная, поскольку частота тактовых импульсов генератора достигает 30 кГц (300 импульсов за полпериода промышленной частоты). За счет индуктивности трансформатора или электродвигателя ток в нагрузке имеет непрерывную синусои-

дальнюю форму. Типовые частотные преобразователи могут плавно изменять частоту выходного напряжения в пределах 5–55 Гц.

Если требуется кроме частоты изменять еще и амплитуду напряжения, то применяют управляемый выпрямитель вместо неуправляемого (рис. 8.13).

Основная область применения частотного преобразователя – электропривод асинхронных или синхронных электродвигателей переменного тока, например, насосных агрегатов или вентиляторов. Отдаваемая мощность электродвигателя находится в пропорциональной зависимости от квадрата частоты напряжения. Изменяя частоту напряжения, можно регулировать частоту вращения двигателя и, следовательно, производительность насосного агрегата. При этом двигатель работает с высокими значениями КПД и $\cos\phi$. Других способов эффективного регулирования мощности двигателей переменного тока не существует. Вот почему в настоящее время с появлением мощных запираемых тиристоров и *IGBT* на рынке появились надежные энергосберегающие преобразователи, которые все шире внедряются на промышленных предприятиях.

На базе инвертора выполняют преобразователи постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня. Такие преобразователи называют конверторами. Транзисторные группы ключей 1, 2 и 3, 4 в конверторе по схеме рис. 8.13 переключаются периодически с высокой частотой. На вторичной обмотке трансформатора при этом появляется высокочастотное переменное напряжение, которое затем выпрямляется и сглаживается конденсаторным фильтром. Значение этого напряжения по отношению к первичному можно изменять с помощью коэффициента трансформации трансформатора. Таким образом, из низкого напряжения, например аккумулятора 12 В, можно получить высокое постоянное напряжение 220 В или наоборот. За счет высокой частоты трансформатор обладает большой проходной мощностью при малых габаритах. КПД такого преобразователя достигает 90 %.

В качестве устройств, управляющих работой силовых ключей, как правило, применяют микропроцессорные системы – контроллеры.

Литература

1. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. шк., 1982. – 496 с.
2. Жеребцов, И. И. Основы электроники / И. И. Жеребцов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
3. Лачин, В. И. Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2005. – 703 с.
4. Кучумов, А. И. Электроника и схемотехника / А. И. Кучумов. – Москва : Гелиос АРВ, 2004. – 335 с.
5. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – Москва : Высш. шк., 2005. – 452 с.
6. Кузин, А. В. Микропроцессорная техника / А. В. Кузин, М. А. Жаворонков. – Москва : Академия, 2004. – 304 с.
7. Новиков, Ю. В. Основы микропроцессорной техники / Ю. В. Новиков, П. К. Скоробогатов. – Москва : Интернет-Университет Информационных технологий, 2004. – 421 с.

Содержание

Предисловие	3
1. Основные понятия и определения электроники.....	4
2. Компонентная база электроники.....	6
2.1. Резисторы, конденсаторы, дроссели	6
2.2. Диоды.....	8
2.3. Транзисторы	13
2.4. Тиристоры.....	19
2.5. Интегральные микросхемы.....	22
3. Простейшие функциональные элементы на биполярных транзисторах	26
3.1. Электронный ключ.....	26
3.2. Усилитель по схеме с общим эмиттером.....	27
3.3. Дифференциальный каскад.....	29
3.4. Эмиттерный повторитель и усилитель мощности	30
4. Базовые функциональные элементы на операционных усилителях.....	33
4.1. Инвертирующий и суммирующий усилители.....	33
4.2. Неинвертирующий усилитель	34
4.3. Измерительный усилитель.....	36
4.4. Интегратор и дифференциатор.....	36
4.5. Частотные фильтры.....	38
4.6. Генератор гармонических колебаний	41
4.7. Компаратор и триггер Шмитта.....	42
4.8. Мультивибратор и одновибратор.....	43
5. Базовые функциональные элементы цифровой электроники	46
5.1. Логические элементы.....	46
5.2. Цифровые триггеры	47
5.3. Двоичные счетчики.....	49
5.4. Регистры.....	50
5.5. Дешифраторы	51
5.6. Мультиплексоры	52
5.7. Арифметико-логические устройства.....	53
6. Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи	54
6.1. Цифро-аналоговые преобразователи	54
6.2. Аналого-цифровые преобразователи	56
7. Основные понятия микропроцессорной техники.....	60
7.1. Микропроцессоры	60
7.2. Микропроцессорная система.....	63

8. Силовая электроника.....	66
8.1. Неуправляемые выпрямители однофазного и трехфазного тока.....	66
8.2. Сглаживающие фильтры.....	70
8.3. Стабилизаторы напряжения.....	72
8.4. Управляемые выпрямители.....	75
8.5. Инверторы.....	77
8.6. Частотные преобразователи.....	78
Литература.....	81

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Курганов Владимир Васильевич
Зализный Дмитрий Иванович

ЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Курс лекций
для студентов специальностей
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
электрооборудования организаций»
дневной и заочной форм обучения
В двух частях
Часть 1

Основы промышленной электроники

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. И. Жукова*
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 07.05.10.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,6.

Изд. № 234.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.