

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

А. В. Лукутин, Е. Б. Шандарова

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Учебное пособие
по курсу «Электротехника, электроника»**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я73

Лукутин А.В.

Л 843 Элементы электроники: учебное пособие / А.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 95 с.

В учебном пособии рассмотрены физические процессы, протекающие в полупроводниковых элементах; их основные характеристики и параметры; электронные устройства, синтезированные на основе полупроводниковых элементов. Учебное пособие представляет собой введение в основы электроники и предназначено для широкого круга студентов неэлектротехнического профиля.

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я73

Рецензенты

Ведущий научный сотрудник
научно-исследовательского института
оптики атмосферы СО РАН им. В. Е. Зуева,
доктор физико-математических наук
Ф. Ю. Канев

Ведущий научный сотрудник ФТИ
доктор физико-математических наук
С.А. Новиков

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», 2012

© Лукутин А.В., 2012

© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Элементы электроники	5
1.1 Общие сведения о полупроводниках	5
1.2 Электронно-дырочный переход	8
1.3 Управляемые изменением температуры полупроводниковые резисторы	10
1.4 Полупроводниковые диоды	13
1.5 Транзисторы	22
1.5.1 Биполярный транзистор.....	22
1.5.2 Полевой транзистор	28
1.6 Тиристоры	33
1.7 Оптоэлектронные приборы	36
1.7.1 Светодиод	37
1.7.2 Фоторезистор	39
1.7.3 Фотодиод	40
1.7.4 Фототранзистор и фототиристор	42
2. Выпрямители и электрические фильтры	44
2.1 Неуправляемые однофазные выпрямители	44
2.1.1 Однополупериодный выпрямитель	45
2.1.2 Двухполупериодные выпрямители	47
2.1.3 Трехфазные неуправляемые выпрямители	51
2.2 Электрические фильтры	54
2.3 Управляемые выпрямители	59
2.4 Области применения выпрямителей	66
3. Инверторы	70
3.1 Инверторы, ведомые сетью	70
3.2 Автономные инверторы	75
4. Непосредственные преобразователи частоты	80
5. Элементы цифровой техники	83
5.1 Логические функции одной переменной	85
5.2 Логические функции двух переменных	87
5.3 Элемент памяти – RS-триггер	90
5.4 Элементы математической логики	91
5.5 Примеры решения задач	92
Библиографический список	94

ВВЕДЕНИЕ

Электроника представляет собой большую область научных знаний, изучающую физические явления и процессы, протекающие в полупроводниковых элементах, диэлектриках, металлах, вакууме, газах, плазме.

Электроника широко используется в различных сферах современной науки и техники. Электронные приборы и устройства, выполненные на их основе, нашли применение в бытовой электронной технике, радиоэлектронике, вычислительной технике, в системах электропитания, защиты и управления электрическими приводами различной мощности и типа.

Синтез электромеханических элементов и устройств силовой электроники позволяет придать новые свойства всей электромеханической системе в целом. С помощью электронных устройств, возможно получение требуемых наперед заданных механических характеристик электродвигателей, обеспечить наиболее благоприятное протекание электромагнитных и электромеханических переходных процессов, регулировать частоту вращения электрических приводов в широких пределах и по заданному закону.

Электронные устройства дают возможность преобразовывать электрическую энергию одного вида в электрическую энергию другого вида и решать целый ряд задач, которые другими способами не решаются, либо решаются со значительно большими затратами.

Устройства силовой электроники решают такие задачи электротехники, как выпрямление переменного тока, инвертирование постоянного тока, преобразование частоты, преобразование числа фаз, преобразование постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого напряжения.

В учебном пособии рассмотрены физические процессы, протекающие в полупроводниковых элементах; основные их характеристики и параметры; электронные устройства, синтезированные на основе полупроводниковых элементов.

Учебное пособие представляет собой введение в основы электроники и предназначено для широкого круга студентов неэлектротехнического профиля.

1. Элементы электроники

1.1. Общие сведения о полупроводниках

Полупроводниками называют вещества, электрическая проводимость которых занимает промежуточное место между проводимостью металлов и диэлектриков. К полупроводниковым элементам относятся кремний (*Si*), германий (*Ge*), селен (*Se*), теллур (*Te*), а также соединения (*GaAs*, *CdS*, *PbS* и другие), удельное электрическое сопротивление которых убывает с ростом температуры, изменяясь в пределах от 10^8 до 10^{-3} Ом \times см.

Чтобы понять механизм электропроводности полупроводников, рассмотрим строение двух наиболее часто используемых полупроводниковых материалов – германия (*Ge*) и кремния (*Si*). Это элементы IV группы периодической системы Д. И. Менделеева. Их атомы, обладая четырьмя валентными электронами, образуют кристаллическую решетку типа алмаза с ковалентной связью. Число ближайших соседей у каждого из этих атомов равно четырем. На рисунке 1.1.1 изображена условная плоская схема структуры связей в кристалле германия.

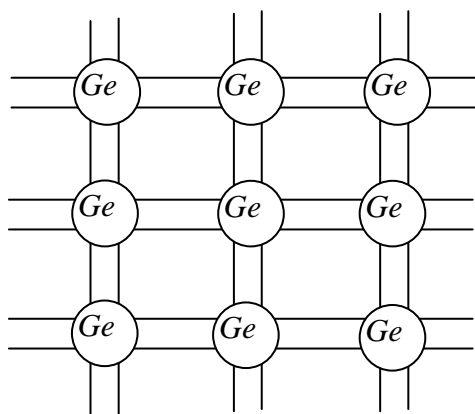


Рис. 1.1.1

Из-за перекрывания электронных оболочек соседних атомов между каждой парой таких атомов возникает ковалентная связь, в которой участвуют два электрона (по одному от каждого атома), изображенные на схеме в виде линий, соединяющих атомы. При низких температурах все валентные электроны атомов заняты в этих связях и потому свободными не являются. Из-за отсутствия свободных электронов полупроводниковые элементы при низких температурах ведут себя как диэлектрики.

Для того чтобы полупроводник стал проводить электрический ток, нужно разорвать эти связи. Сделать это можно либо за счет нагревания полупроводника, либо за счет его освещения. И в том и в другом случае валентные электроны атомов могут получить достаточную для этого энергию и стать свободными.

После разрыва ковалентных связей в полупроводнике образуются носители электрического тока двух типов: **свободные электроны и дырки**.

Дыркой называют вакантное (то есть не занятое электроном) состояние в связях между атомами полупроводника, характеризующееся избыточным положительным электрическим зарядом.

Если в каком-то месте возникла дырка, то через некоторое время она может быть занята каким-нибудь электроном соседнего атома. Тогда дырка появится в новом месте – там, откуда ушел этот электрон. Результатом непрерывных повторений подобного процесса является беспорядочное блуждание дырки по всему кристаллу. Так как в месте ее появления возникает нескомпенсированный положительный электрический заряд, то ее перемещение становится эквивалентным движению свободной положительно заряженной частицы. При наличии электрического поля в полупроводнике возникает дрейф свободных электронов в одну сторону, а дырок в другую. В результате увеличения температуры полупроводника или воздействия на него светом число носителей электрического тока в нем увеличивается, и электрическая проводимость полупроводника возрастает.

Проводимость полупроводников, не содержащих примесей, называется **собственной**. Собственная проводимость полупроводников обычно невелика. Так, например, в германии число свободных электронов составляет примерно одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

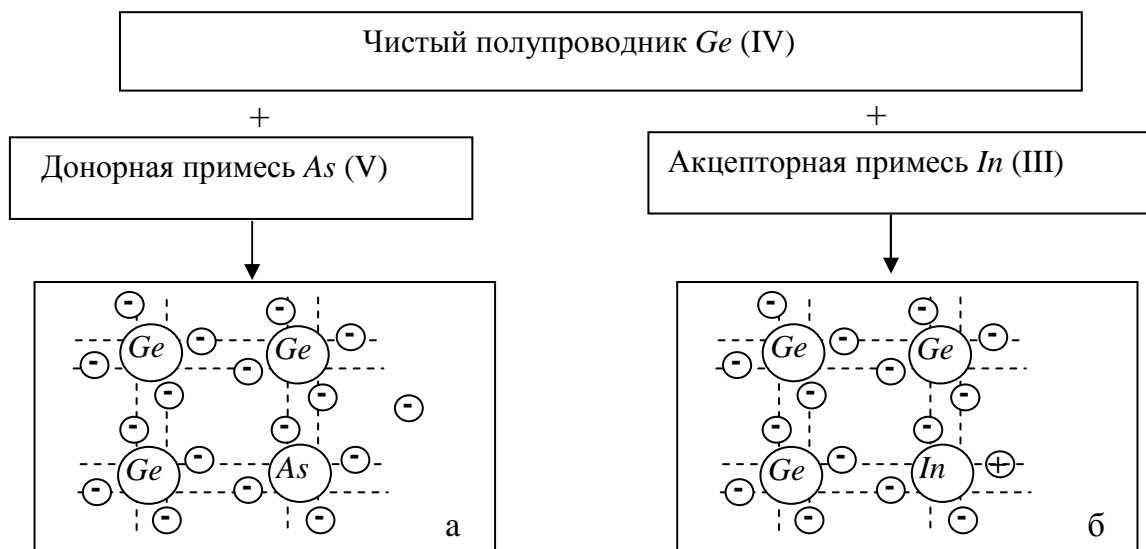


Рис. 1.1.2

Электрическая проводимость полупроводников, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей, называется **примесной** проводимостью, а процесс введения примесей – **легированием**. При наличии примесей число носителей электрического тока в

полупроводнике резко возрастает, и он приобретает либо преимущественно электронную проводимость, либо преимущественно дырочную проводимость.

Если при выращивании монокристалла германия в расплав добавить небольшое количество мышьяка или сурьмы, то при кристаллизации атомы примеси вытесняют отдельные атомы германия из их мест в кристаллической решетке. Мышьяк (*As*) и сурьма (*Sb*) имеют по пять валентных электронов. Поэтому атомы примеси, образовав ковалентные связи с четырьмя ближайшими атомами германия и использовав для этого четыре валентных электрона, будут иметь по одному лишнему электрону, слабо связанному с атомным ядром. Вследствие теплового движения почти все лишние электроны атомов примеси оказываются свободными (рисунок 1.1.2, а). При добавлении одной десятиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными** (от латинского слова *dono* – дарю) примесями. При наличии электрического поля свободные электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нем возникает **электронная примесная проводимость**. Полупроводники с такой проводимостью называют **полупроводниками *n*-типа** (от латинского слова *negativus* – отрицательный). Поскольку в проводнике *n*-типа число электронов значительно больше числа дырок, то электроны являются основными носителями заряда, а дырки – неосновными.

Если при выращивании монокристалла германия в расплав добавить некоторое количество трехвалентных атомов, например, индия (*In*) или галлия (*Ga*), то при образовании кристалла атомы примеси вытеснят из своих мест отдельные атомы германия. При замещении в кристаллической решетке атома германия атомом примеси, имеющим три валентных электрона, три связи атома примеси с атомами германия окажутся заполненными, а одна связь четвертого атома германия (соседа атома примеси) – незаполненной. Следовательно, в решетке образуется дырка (рисунок 1.1.2, б). Каждый атом трехвалентной примеси образует в кристалле полупроводника одну дырку. Такого рода примеси называются **акцепторными** (от латинского слова *acceptor* – принимающий). Под действием электрического поля дырки перемещаются в направлении вектора напряженности электрического поля (от более высокого электрического потенциала к более низкому), и в полупровод-

нике возникает **дырочная примесная проводимость**. Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называются **полупроводниками *p*-типа** (от латинского слова *positivus* – положительный). В полупроводниках *p*-типа основными носителями электрического заряда являются дырки, а неосновными – электроны.

Если в полупроводник одновременно вводятся и донорные и акцепторные примеси, то характер проводимости полупроводника (*n*- или *p*-тип) определяется примесью с более высокой концентрацией носителей электрического заряда – электронов или дырок.

1.2. Электронно-дырочный переход

В большинстве полупроводниковых приборов используется контакт полупроводников с разными типами примесной проводимости. Если одна область полупроводникового кристалла имеет электронную проводимость, а другая – дырочную, то на границе между ними возникает слой, называемый **электронно-дырочным переходом**. Поскольку такой слой образуется в месте контакта *p*- и *n*-областей полупроводника, то иначе его называют ***p-n*-переходом**.

Как только переход образован, часть свободных электронов из области *n*-типа вблизи границы переходит в область *p*-типа. Здесь они рекомбинируют с дырками и создают пространственный отрицательный электрический заряд ионизированных атомов акцептора, не скомпенсированный положительным электрическим зарядом дырок. Одновременно

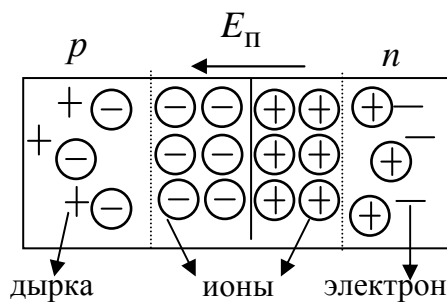


Рис. 1.2.1

происходит диффузия дырок в *n*-область. Здесь создается не скомпенсированный электрическим зарядом электронов пространственный положительный электрический заряд ионов донора. Таким образом, на границе создается двойной слой пространственного электрического заряда, обедненный основными носителями электрического тока (обед-

ненный слой). В этом слое возникает контактное электрическое поле E_{π} , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую (рисунок 1.2.1).

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Но и в этом случае под действием тепла небольшая

часть электронов и дырок будет продолжать проходить через потенциальный барьер, обусловленный пространственными электрическими зарядами, создавая электрический ток диффузии. Однако одновременно с этим под действием контактного поля неосновные носители электрического заряда p - и n -областей (электроны и дырки) создают небольшой электрический ток проводимости. В состоянии равновесия эти токи взаимно компенсируются.

Путем включения полупроводника с электронно-дырочным переходом в электрическую цепь потенциальный барьер обедненного слоя можно либо ослабить, либо усилить. В соответствии с этим различают прямое и обратное включение.

Прямое включение. При прямом включении p -область полупроводника подключается к положительному полюсу источника тока, а n -область – к отрицательному (рисунок 1.2.2). Под действием внешнего электрического поля E потенциальный барьер понижается, и через электронно-дырочный переход начинают двигаться основные носители электрического тока: из n - в p -область – электроны, а из p - в n -область – дырки. Поскольку основных носителей в полупроводнике достаточно много, через p - n -переход может идти значительный электрический ток. Электрическое сопротивление перехода при прямом включении невелико.

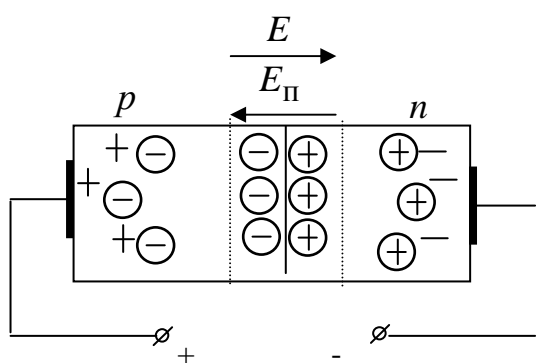


Рис. 1.2.2

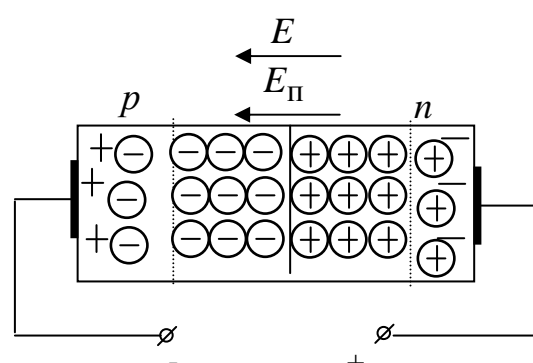


Рис. 1.2.3

Обратное включение. В этом случае p -область полупроводника подключается к отрицательному полюсу источника тока, а n -область – к положительному (рисунок 1.2.3). Под действием внешнего электрического поля потенциальный барьер увеличивается, а обедненный слой расширяется, и через электронно-дырочный переход смогут теперь идти лишь неосновные носители электрического тока: из n - в p -область – дырки, а из p - в n -область – электроны. Но в p -области мало свободных электронов, а в n -области мало дырок. Поэтому электрический ток через

p - n -переход при обратном включении оказывается пренебрежимо малым.

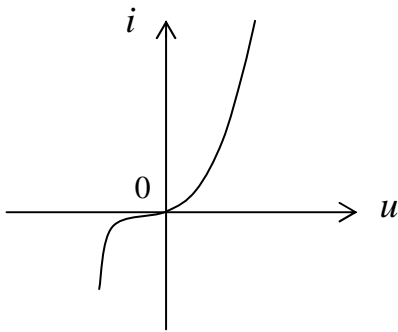


Рис. 1.2.4

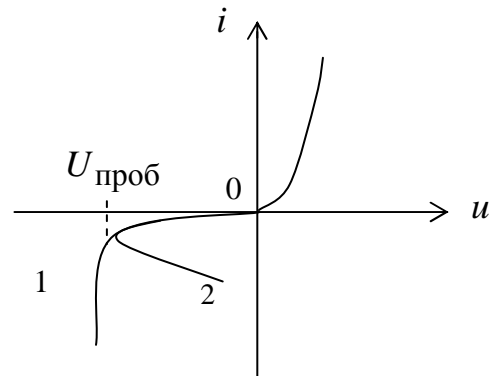


Рис. 1.2.5

Зависимость тока через переход от приложенного напряжения называют **вольтамперной характеристикой (ВАХ) перехода**. Ее общий вид показан на рисунке 1.2.4. Часть характеристики при токе $i \geq 0$ называют прямой ветвью, а другую часть при токе $i \leq 0$ – обратной. Как видно из рисунка, вольтамперная характеристика имеет явно выраженный вентильный эффект – большой прямой ток и весьма малый ток обратного включения. Если обратное напряжение увеличивать, то при его некотором (определенном) значении $U_{\text{проб}}$ обратный ток резко возрастает – происходит пробой перехода.

Различают два вида пробоя: электрический и тепловой. При электрическом пробое напряжение на переходе практически не изменяется, структура полупроводника не нарушается, поэтому после снижения или отключения напряжения работоспособность перехода полностью восстанавливается. При тепловом пробое p - n -переход разогревается, вызывая лавинообразное повышение обратного тока, что приводит к дальнейшему разогреву перехода и его разрушению. На рисунке 1.2.5 показаны вольтамперные характеристики p - n -перехода при пробое: 1 – электрическом, 2 – тепловом.

1.3. Управляемые изменением температуры полупроводниковые резисторы

Терморезистор (термистор) – это полупроводниковый резистивный элемент, обладающий свойством существенно изменять своё электрическое сопротивление при изменении температуры. Главными параметрами терморезистора являются диапазон рабочих температур и температур-

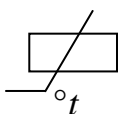


Рис. 1.3.1

ный коэффициент сопротивления (ТКС), определяемый как относительное приращение сопротивления (в процентах) при изменении температуры на один градус. Различают терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, у которых электрическое сопротивление с ростом температуры убывает, и с положительным температурным коэффициентом сопротивления (позисторы), у которых оно возрастает. Условное графическое изображение полупроводникового терморезистора представлено на рисунке 1.3.1.

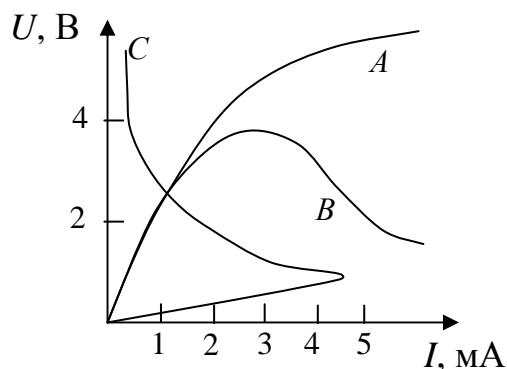


Рис. 1.3.2

На рисунке 1.3.2 приведены вольтамперные характеристики терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (кривые A , B) и позистора (кривая C). При малых электрических токах в терморезисторе выделяется малое количество тепла, и терморезистор имеет свойство обычного резистора. С увеличением тока возрастает количество выделяемого тепла, увеличивается количество электронов проводимости, и электрическое сопротивление начинает уменьшаться. Если у терморезистора хороший теплоотвод, то электрическое сопротивление уменьшается сравнительно медленно, и график его изменения отображается кривой A (рисунок 1.3.2). Если терморезистор помещен в вакуум и выделяющееся в нем тепло плохо отводится, то электрическое сопротивление уменьшается в соответствии с кривой B (рисунок 1.3.2).

Позисторы наиболее часто выполняются на основе титаната бария ($BaTiO_3$) с добавлением редкоземельных элементов. Для изготовления терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления обычно используют поликристаллические полупроводники на основе оксидов меди (CuO), никеля (NiO), титана (TiO_2), кобальта (CoO), марганца (MnO_2) и их смесей. Терморезисторы выпускаются в виде стержней, трубок, дисков, шайб и бусинок, загерметизированных с

помощью лаков, смол, пластиков или залитых в стекло. Размеры терморезисторов варьируются от нескольких микрометров до нескольких сантиметров.

Полупроводниковые терморезисторы с рабочей точкой на начальном (линейном) участке вольтамперной характеристики (рисунок 1.3.2) используются для измерения и контроля температуры и компенсации температурных изменений параметров электрических цепей и электронных приборов.

Терморезисторы с рабочей точкой на нисходящем участке вольтамперной характеристики применяются в качестве пусковых реле, реле времени, измерителей мощности электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах, стабилизаторов температуры и напряжения.

Режим работы терморезистора, при котором рабочая точка находится также на ниспадающем участке вольтамперной характеристики (при этом используется зависимость сопротивления терморезистора от температуры и теплопроводности окружающей среды), характерен для терморезисторов, применяемых в системах теплового контроля и пожарной сигнализации, регулирования уровня жидких и сыпучих сред; действие таких терморезисторов основано на возникновении релейного эффекта в электрической цепи с терморезистором при изменении температуры окружающей среды или условий теплообмена терморезистора со средой.

Варистор – это полупроводниковый резистор, электрическое сопротивление (электрическая проводимость) которого изменяется нелинейно и одинаково под действием как положительного, так и отрицательного напряжения. Для изготовления варисторов применяют порошкообразный карбид кремния (SiC) и связующее вещество (глину, жидкое стекло, лаки, смолы и другие материалы), которые запрессовывают в форму и спекают в ней при температуре порядка $1700^{\circ}C$. Затем поверхность образца металлизуют и припаивают к ней выводы. Условное графическое изображение терморезистора представлено на рисунке 1.3.3, а. Конструктивно варисторы выполняются обычно в виде дисков, таблеток, стержней; существуют бусиновые и плёночные варисторы (рисунок 1.3.3, б).

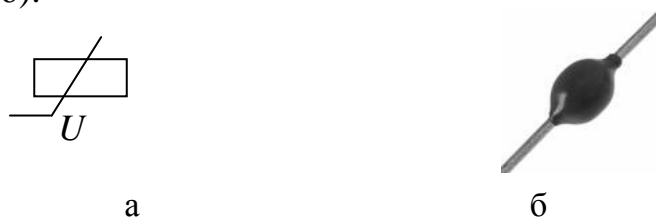


Рис. 1.3.3

Нелинейность характеристик варисторов (рисунок 1.3.4) обусловлена локальным нагревом соприкасающихся граней многочисленных кристаллов карбида кремния (или иного полупроводника). При локальном повышении температуры на границах кристаллов электрическое сопротивление последних существенно снижается, что приводит к уменьшению общего сопротивления варисторов.

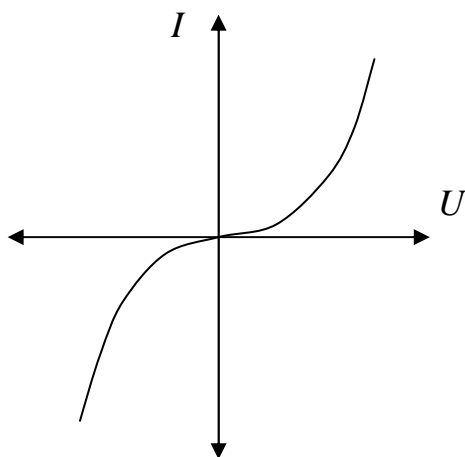


Рис. 1.3.4

Низковольтные варисторы изготавливают на рабочее напряжение от 3 до 200 В и ток от 0,1 мА до 1 А; высоковольтные варисторы – на рабочее напряжение до 20 кВ. Варисторы способны выдерживать значительные электрические перегрузки, просты по конструкции и дешевы, обладают высокой надежностью, малой инерционностью (предельная рабочая частота достигает до 500 кГц), но имеют значительный низкочастотный шум и меняют свои параметры со временем и при изменении температуры.

Варисторы применяют для стабилизации и регулирования низкочастотных токов и напряжений, возведения в степень, извлечения корней и других математических действий над заданными величинами, для защиты от разрушения контактов вследствие перенапряжений в электрических цепях (например, высоковольтные линии передачи электроэнергии, линии связи, электрические приборы) и др.

1.4. Полупроводниковые диоды

Так называют полупроводниковые приборы с одним $p-n$ -переходом и двумя выводами, которые называются анодом (А) и катодом (К) (рисунок 1.4.1), для

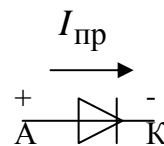


Рис. 1.4.1

включения в электрическую цепь. Обозначение полупроводниковых диодов в электрических схемах – VD .

Основным рабочим элементом полупроводникового диода является кристалл германия (или кремния), обладающий проводимостью n -типа за счет небольшой добавки донорной примеси. Для создания в нем p - n -перехода в одну из его поверхностей вплавляют индий (In). Вследствие диффузии атомов индия в глубь монокристалла германия, в нем образуется область p -типа. Между этими двумя областями и возникает p - n -переход. Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметический корпус. Некоторые типы полупроводниковых диодов представлены на рисунке 1.4.2.

Считают, что диод подключен в прямом направлении, когда к аноду подключен положительный электрический потенциал, а к катоду – отрицательный электрический потенциал источника тока (рисунок 1.4.1), при таком включении диод открыт, и проводимость p - n -перехода увеличивается. Этому соответствует ветвь вольтамперной характеристики в первом квадранте (рисунок 1.2.4). В прямом направлении через диод проходит большой прямой ток $I_{пр}$. При подключении диода в обратном направлении (положительный электрический потенциал на катоде, а отрицательный на аноде) обратный ток $I_{обр}$ очень мал и исчисляется в микроамперах. Этому включению соответствует ветвь в третьем квадранте (рисунок 1.2.4). В этом случае диод закрыт и его электрическая проводимость практически равна нулю.

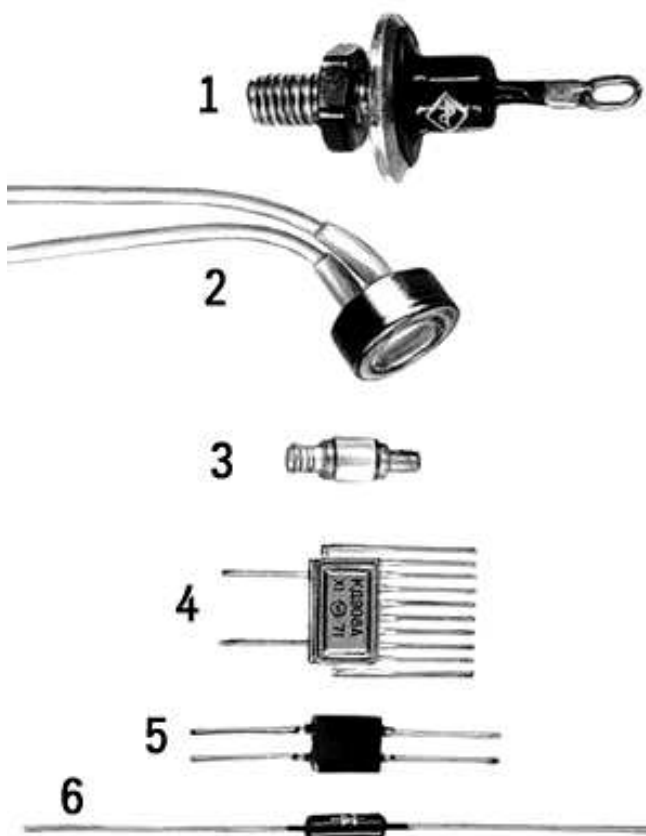


Рис. 1.4.2

Таким образом, полупроводниковые диоды обладают односторонней электрической проводимостью – пропускают электрический ток только в одном направлении.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

– прямое напряжение $U_{\text{пр}}$, которое нормируется при определенном прямом токе $I_{\text{пр}}$;

– максимально допустимый прямой ток диода $I_{\text{пр.мах}}$;

– максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{\text{обр.мах}}$;

– обратный ток диода $I_{\text{обр}}$, который нормируется при определенном обратном напряжении.

Достоинствами полупроводниковых диодов являются малые габаритные размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность; существенным недостатком – зависимость их параметров от температуры.

В настоящее время существуют диоды, предназначенные для работы в очень широком диапазоне электрических токов и напряжений. В зависимости от применяемого материала они бывают германиевые и кремниевые. В зависимости от технологии изготовления диоды разделяются на точечные и плоскостные.

Точечный диод – это полупроводниковый диод с очень малой площадью электрического перехода, который может быть получен сплавлением металлической иглы с нанесенной на неё примесью в полупроводниковую пластинку с определенным типом электрической проводимости. Благодаря малой площади p - n -перехода и, как следствие, маленькой ёмкости перехода, точечный диод обычно имеет предельную частоту около 300 ÷ 600 МГц. При использовании более острой иглы без электроформовки получают точечные диоды с предельной частотой порядка десятков гигагерц. Малая площадь p - n -перехода обуславливает также и недостатки точечного диода: максимальное обратное напряжение обычно не превышает 3 ÷ 5 В, максимальный электрический ток также сильно ограничен. Прямой ток такого диода составляет десятки миллиампер (так как площадь перехода мала).

Плоскостной диод – это полупроводниковый диод, в котором p - n -переход образуется двумя полупроводниками с разными типами электропроводности. Площадь перехода лежит в пределах от сотых долей квадратного микрометра (микроплоскостные диоды) до нескольких квадратных сантиметров (силовые диоды). Благодаря большой площади

p-n-перехода прямой электрический ток плоскостных диодов составляет $1 \div 100$ А.

Для сохранения работоспособности германиевого диода его температура не должна превышать $+85^\circ$, кремниевого – $+150^\circ$.

Диоды применяют в схемах выпрямителей (преобразуют переменный ток в постоянный), также они используются в электрических схемах в качестве ограничителей электрических сигналов.

По мощности выпрямительные диоды подразделяются на мало-мощные (прямой ток до 0,3 А), средней (ток от 0,3 А до 10 А) и большой мощности (ток от 10 А до 1000 А и выше). Для наиболее мощных диодов максимальный прямой ток $I_{пр.мах}$ составляет килоамперы, максимальное обратное напряжение $U_{обр.мах}$ – киловольты, обратный ток $I_{обр.}$ – до 5000 мкА.

Стабилитрон – это полупроводниковый диод, работающий в режиме электрического пробоя, который возникает при обратном включении диода и предназначенный для стабилизации напряжения в электрических цепях радиоэлектронной аппаратуры. Условное графическое

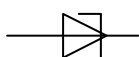


Рис. 1.4.3

обозначение стабилитрона представлено на рисунке 1.4.3. Конструкция одного из типов стабилитрона представлена на рисунке 1.4.4. Отличие стабилитрона от выпрямительного диода – в относительно низком напряжении пробоя при обратном включении. Когда это напряжение превышено, обратный ток возрастает скачком (эффект Зенера). В выпрямительных диодах такой режим является аварийным, а стабилитроны нормально работают при обратном электрическом токе, не превышающем максимально допустимого значения.

Изобразим для примера вольтамперные характеристики кремниевого стабилитрона Д814Д (рисунок 1.4.5). В режиме пробоя при значительном изменении электрического тока стабилитрона его напряжение изменяется несущественно. Эта особенность вольтамперной характеристики $i(u)$ стабилитрона используется для стабилизации и сглаживания пульсации напряжения U_2 на нагрузке, подключенной параллельно стабилитрону. Таким образом, стабилитроны могут применяться в устройствах, предназначенных для уменьшения изменения выходного



Рис. 1.4.4

напряжения, то есть для его стабилизации, при значительном изменении входного напряжения.

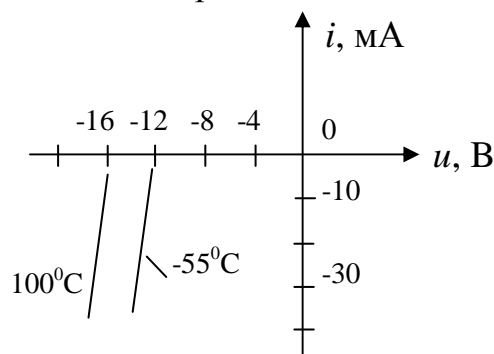


Рис. 1.4.5

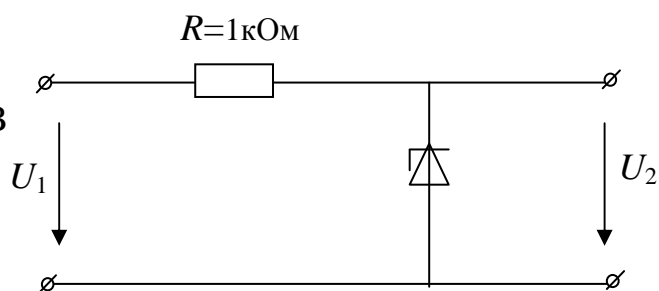


Рис. 1.4.6

Рассмотрим простейшую схему стабилизатора напряжения, изображенную на рисунке 1.4.6. На вход электрической цепи подается входное напряжение U_1 , изменяющееся в пределах от 7 до 12 В. Напряжение на выходе электрической цепи U_2 равно разности электрических потенциалов на стабилитроне и поэтому постоянно при изменении входного напряжения в широких пределах. Входное напряжение стабилизатора должно быть, по крайней мере, на два или три вольта выше, чем требуемое выходное напряжение, чтобы задать соответствующий ток через стабилитрон, при котором обеспечивается его работа в режиме пробоя. Резистор в данной схеме ограничивает максимальный допустимый ток, текущий через стабилитрон.

Степень стабилизации, которую обеспечивает данная схема, можно охарактеризовать коэффициентом стабилизации, равным отношению изменения входного напряжения в процентах, к вызываемому изменению выходного напряжения в процентах:

$$k = \frac{\Delta U_1, \%}{\Delta U_2, \%}.$$

Простейший стабилизатор напряжения со стабилитроном, подобный изображенному на рисунке 1.4.6, обычно обеспечивает коэффициент стабилизации в пределах $5 \div 20$, в то время как некоторые более сложные интегральные регуляторы дают коэффициент стабилизации больше тысячи.

Варикап – это специальный полупроводниковый диод, предназначенный для работы в качестве конденсатора, электрическая емкость

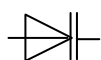


Рис. 1.4.7

которого нелинейно зависит от приложенного к нему электрического напряжения (рисунок 1.4.7). Закрытый $p-n$ -переход обладает электрической емкостью, значе-

ние которой зависит от его площади и ширины, а также от диэлектрической проницаемости запирающего слоя. При увеличении обратного напряжения ширина $p-n$ -перехода возрастает, а емкость уменьшается подобно емкости конденсатора, у которого расстояние между обкладками увеличивается.

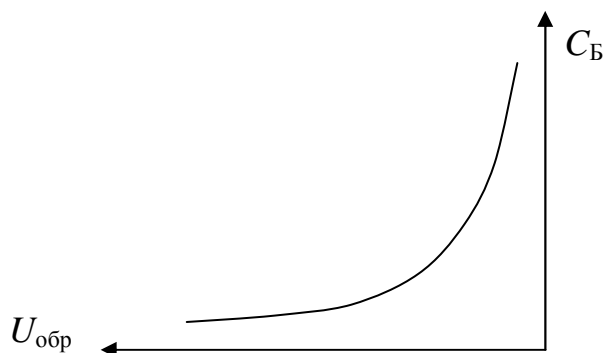


Рис. 1.4.8

Эта емкость называется барьерной и изменяется от единиц до сотен пикофарад при изменении обратного напряжения на несколько десятков вольт. Зависимость барьерной емкости C_B от приложенного обратного напряжения $U_{обр}$ приведена на рисунке 1.4.8.

Варикапы изготавливают на базе кремния, германия, арсенида галлия ($GaAs$). В радиоэлектронных устройствах свойство нелинейности изменения емкости варикапа применяют для получения параметрического усиления, умножения частоты и других операций.

Свойства управляемой емкости $p-n$ -перехода часто используют в радиоприемных и телевизионных системах для настройки LC -контура на определенную частоту.

На рисунке 1.4.9 приведена схема LC -контура с включённым параллельно варикапом. Источник электродвижущей силы – $E_{упр}$ служит для смещения $p-n$ -перехода варикапа в обратном направлении и управления его ёмкостью.

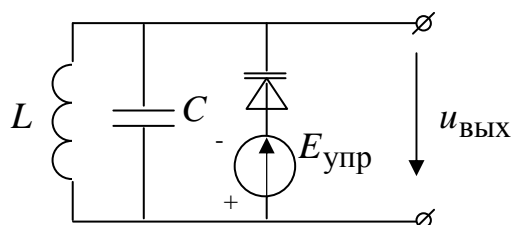


Рис. 1.4.9.

Частота настройки контура ω_p в этом случае определяется формулой

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L(C + C_0 + C_B)}},$$

где C_B – барьерная емкость p - n -перехода, управляемая напряжением управления $E_{упр}$;

C_0 – паразитная емкость варикапа.

Диод Шоттки – это полупроводниковый диод, выполненный на основе контакта металл-полупроводник (рисунок 1.4.10). Он назван в

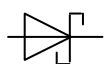


Рис. 1.4.10

честь немецкого физика Вальтера Шоттки, создавшего в 1938–1939 гг. основы теории таких диодов. При изготовлении диодов Шоттки на очищенную поверхность полупроводникового кристалла (*Si*, *GaAs*, реже *Ge*) наносят тонкий слой металла (*Au*, *Al*, *Ag*, *Pt* и другие). В приконтактной области полупроводника, как и в диодах с p - n -переходом, возникает потенциальный барьер, изменение высоты которого под действием внешнего напряжения приводит к изменению электрического тока через прибор. Ток через контакт металл-полупроводник, в отличие от тока через p - n -переход, обусловлен только основными носителями электрического заряда.

В то время, как обычные кремниевые диоды имеют прямое падение напряжения около $0,6 \div 0,7$ вольт, применение диодов Шоттки позволяет снизить это значение до $0,2 \div 0,4$ вольт.

Отличительные особенности таких диодов по сравнению с полупроводниковыми диодами других типов:

- возможность получать требуемую высоту потенциального барьера посредством выбора соответствующего металла;
- значительная нелинейность вольтамперной характеристики при малых прямых смещениях;
- очень малая инерционность;
- технологическая совместимость с интегральными схемами;
- простота изготовления.

Недостатки:

- при кратковременном превышении максимального обратного напряжения необратимо выходят из строя;
- характеризуются повышенными (относительно обычных кремниевых диодов) обратными токами, возрастающими с ростом температуры кристалла.

Диоды Шоттки служат главным образом СВЧ-диодами различного назначения (детекторными, смесительными, лавинно-пролётными, параметрическими, импульсными, умножительными); кроме того, их применяют в качестве приёмников излучения, детекторов ядерного излучения, модуляторов света, а также используют в выпрямителях тока высоких частот, солнечных батареях и так далее.

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольтамперной характеристике при прямом напряжении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением

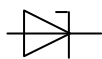


Рис. 1.4.11

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU_{\text{пр}}}{dI_{\text{пр}}}.$$

Условное графическое обозначение туннельного диода представлено на рисунке 1.4.11.

Для изготовления туннельных диодов используют полупроводниковый материал с очень высокой концентрацией примесей, вследствие чего получается малая толщина p - n -перехода (около 10^{-2} микрометра), что на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах, и сквозь тонкий потенциальный барьер возможно туннелирование свободных носителей электрического заряда.

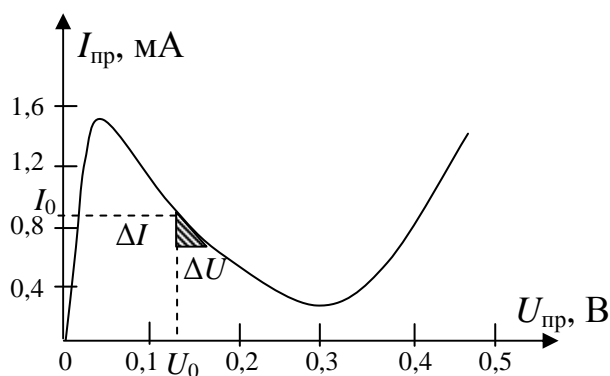


Рис. 1.4.12

На рисунке 1.4.12 представлена прямая ветвь вольтамперной характеристики германиевого туннельного усилительного диода, предназначенного для усиления в диапазоне волн $2 \div 10$ сантиметров (что соответствует частоте более 1 ГГц).

Наличие участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением на вольтамперной характеристике обеспечивает возможность использования туннельных диодов в качестве усилительного элемента.

Схема усилителя напряжения (иллюстрирующая принципиальную возможность использования отрицательного сопротивления для усиления напряжения сигнала) приведена на рисунке 1.4.13.

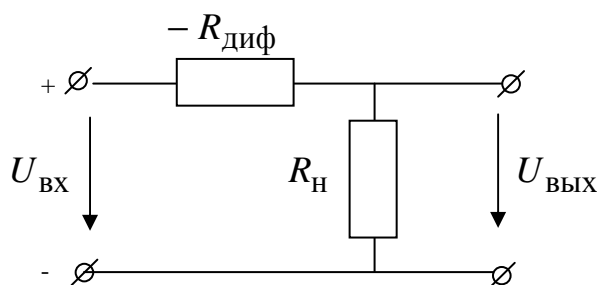


Рис. 1.4.13

В схеме для упрощения опущена электрическая цепь питания, устанавливающая режим работы туннельного диода таким образом, чтобы через него протекал постоянный ток I_0 , и падало напряжение U_0 (смотри рисунок 1.4.12), при этом туннельный диод работает в режиме отрицательного дифференциального сопротивления

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Если входной сигнал $U_{\text{ВХ}}$ достаточно мал, то в электрической цепи протекает некоторый ток

$$I = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}} - R_{\text{диф}}}.$$

Напряжение сигнала на выходе схемы определяется как

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \times R_{\text{Н}} = U_{\text{ВХ}} \times \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} - R_{\text{диф}}}.$$

Коэффициент передачи схемы, определяемый как отношение выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ к входному напряжению $U_{\text{ВХ}}$

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} - R_{\text{диф}}},$$

может быть значительно больше единицы – в зависимости от величины разности сопротивлений нагрузки и дифференциального сопротивления диода ($R_{\text{Н}} - R_{\text{диф}}$). Таким образом, приведенная схема обеспечивает усиление напряжения входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$ (это происходит за счет отбора энергии от источника питания).

При туннельном переходе электроны не затрачивают энергию, и переход совершается со скоростью, близкой к скорости света. Это позволяет использовать туннельные диоды для усиления и генерирования СВЧ-сигналов, создания сверхбыстродействующих переключателей различных импульсных устройств.

1.5. Транзисторы

1.5.1. Биполярный транзистор

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами, имеющий три вывода. Действие биполярного транзистора основано на использовании носителей электрического заряда обоих знаков (дырок и электронов), а управление протекающим через него током осуществляется с помощью управляющего тока.

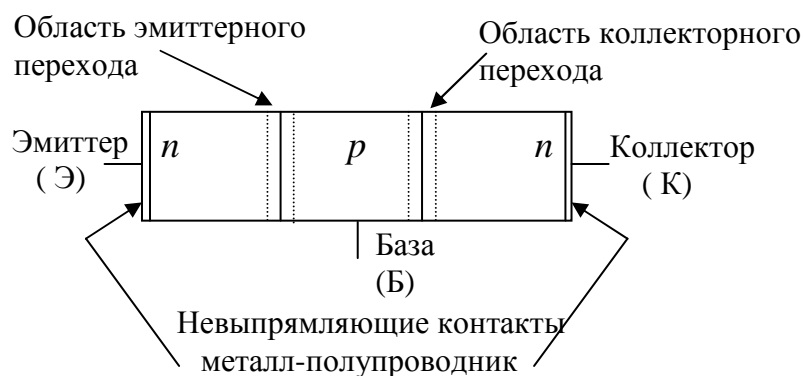
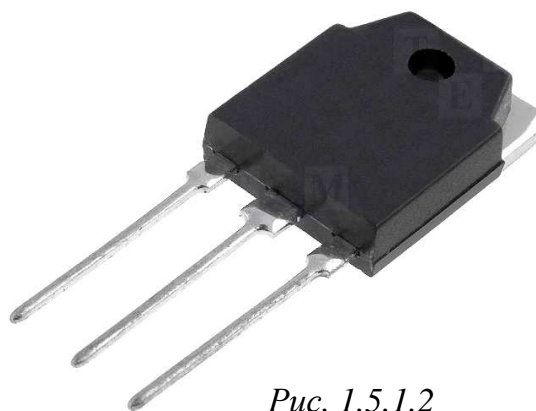


Рис. 1.5.1.1

Биполярный транзистор является наиболее распространенным активным полупроводниковым прибором. Современные биполярные транзисторы способны пропускать электрические токи в сотни ампер, выдерживать напряжение в несколько тысяч вольт, коммутируя мощности в несколько сотен ватт, сохраняя свои управляющие свойства в диапазоне частот управляющих сигналов в несколько тысяч мегагерц. Конструктивное исполнение полупровод-



никового транзистора показано на рисунке 1.5.1.2.

Современные технологии позволяют в одном кубическом сантиметре полупроводникового материала выполнить несколько тысяч транзисторов, что делает возможным выпускать функционально законченные электронные блоки на основе одной конструктивной единицы микросхемы.

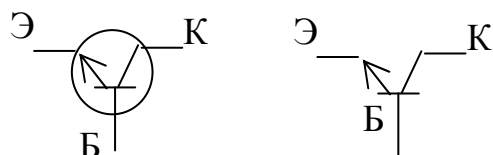


Рис. 1.5.1.3

Биполярный полупроводниковый транзистор в своей основе содержит три слоя полупроводника ($p-n-p$ - или $n-p-n$ -типа) и, соответственно, два $p-n$ -перехода. Каждый слой полупроводника через невыпрямляющий контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу.

Средний слой и соответствующий вывод называют **базой** (Б), один из крайних слоев и соответствующий вывод называют **эмиттером** (Э), а другой крайний слой – **коллектором** (К) (рисунок 1.5.1.1).

Средний слой и соответствующий вывод называют **базой** (Б), один из крайних слоев и соответствующий вывод называют **эмиттером** (Э), а другой крайний слой – **коллектором** (К) (рисунок 1.5.1.1).

Схематичное, упрощенное изображение структуры полупроводникового транзистора типа $n-p-n$ представлено на рисунке 1.5.1.1, а два допустимых варианта условного графического обозначения – на рисунке 1.5.1.3.

Полупроводниковый транзистор типа $p-n-p$ устроен аналогично, упрощенное изображение его структуры дано на рисунке 1.5.1.4, а, более простой вариант условного графического обозначения представлен на рисунке 1.5.1.4, б.

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна.

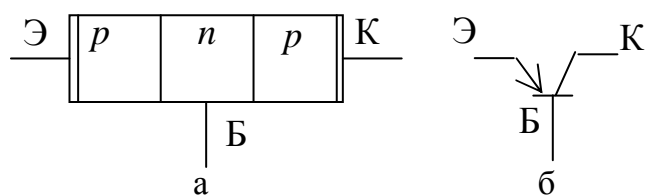


Рис. 1.5.1.4

Транзистор называют биполярным, так как в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки. Но в различных типах транзисторов роль электронов и дырок различна.

Транзисторы типа $n-p-n$ более распространены в сравнении с транзисторами типа $p-n-p$, так как обычно имеют лучшие параметры. Это можно объяснить следующим образом: основную роль в электрических процессах в транзисторах типа $n-p-n$ играют электроны, а в транзисторах типа $p-n-p$ – дырки. Электроны же обладают подвижностью в два-три раза большей, чем дырки.

Важно отметить, что реально площадь коллекторного перехода значительно больше площади эмиттерного перехода – такая несимметрия значительно улучшает свойства транзистора.

Для определенности обратимся к транзистору типа $n-p-n$. Основными элементами транзистора являются два соединенных $p-n$ -перехода, которые сильно взаимодействуют друг с другом. Это означает, что электрический ток одного перехода сильно влияет на электрический ток другого, и наоборот. Указанное взаимодействие имеет исключительно простую главную причину, а именно: очень малое расстояние между переходами транзистора (от $20 \div 30$ микрометров до одного микрометра и менее). Это расстояние называют толщиной базы.

Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в эмиттере сравнительно велика, поэтому этот слой низкоомный. Концентрация атомов примеси (и дырок) в базе сравнительно низка, поэтому этот слой высокоомный. Концентрация атомов примеси (и свободных электронов) в коллекторе может быть как больше концентрации атомов примеси в базе, так и меньше ее.

Рассмотрим характерные схемы включения транзистора и соответствующие характеристики.

Различают три схемы включения транзистора: с общей базой, с общим коллектором и с общим эмиттером. Обычно управляющим переходом является переход база-эмиттер, а нагрузочная электрическая цепь включается или в электрическую цепь коллектор-база (схема с общей базой), или в электрическую цепь коллектор-эмиттер (схема с общим эмиттером).

Хотя на практике в качестве основной используется схема с общим эмиттером, для простоты пояснения физики процесса управления обычно рассматривается схема с общей базой (рисунок 1.5.1.5).

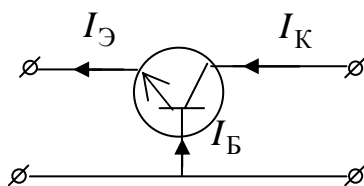


Рис. 1.5.1.5

В рабочем режиме к выводам транзистора подключают источники питания. При этом если оба перехода оказываются под обратным напряжением, токи в электрических цепях транзистора практически от-

существуют, поскольку сопротивления переходов очень велики. Такой режим транзистора называют *отсечкой*.

Если оба перехода оказываются под прямым напряжением, через оба перехода (с малым сопротивлением) будут проходить большие токи, что равносильно короткому замыканию между выводами транзистора. Транзистор в этом режиме (*режим насыщения*) можно представить узлом электрической цепи, токи через который определяются параметрами внешней электрической цепи.

Более сложная картина наблюдается, когда на эмиттерный переход подано прямое напряжение, а на коллекторный переход – обратное (рисунок 1.5.1.6). Такой режим называют *активным*.

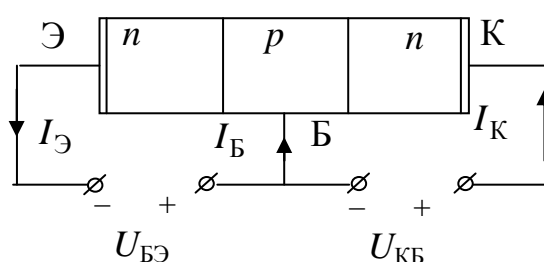


Рис. 1.5.1.6

Через эмиттерный переход потечет электрический ток $I_{Э}$, который будет обеспечиваться главным образом движением электронов из эмиттера в базу. Перемещение дырок из базы в эмиттер будет незначительным вследствие указанного выше различия в концентрации атомов примесей. Из-за малой толщины базы почти все электроны через так называемое время пролета достигают коллектора. Только малая доля электронов рекомбинирует в базе с дырками. Убыль этих дырок компенсируется протеканием тока базы $I_{Б}$. Из вышеизложенного следует, что ток базы много меньше тока эмиттера

$$I_{Б} \ll I_{Э}.$$

Обратное смещение коллекторного перехода способствует тому, что электроны, подошедшие к нему, захватываются электрическим полем перехода и переносятся в коллектор. В то же время это поле препятствует переходу электронов из коллектора в базу. Ток коллектора лишь незначительно меньше тока эмиттера: $I_{К} \approx I_{Э}$.

Так как напряжение коллектор-база $U_{КБ}$ (запирающее) может быть выбрано много больше, чем напряжение база-эмиттер $U_{БЭ}$ на открытом переходе (для кремния это около 0,7 В), то можно записать

$$(P_{И} = U_{КБ} \times I_{К}) \gg (P_{У} = U_{БЭ} \times I_{Э}),$$

то есть мощность источника энергии $P_{И}$, управляемая транзистором, много больше мощности управления $P_{У}$, что является обязательным свойством любого управляемого элемента. В этом смысле говорят, что биполярный транзистор является усилительным элементом.

Если рассматривать ток коллектора, как функцию тока эмиттера, то можно сказать, что транзистор является прибором, управляемым током. Отношение тока коллектора к току базы называется коэффициентом усиления тока.

Главным недостатком схемы с общей базой, из-за которого эта схема в чистом виде практически не используется, является большая величина тока, а, следовательно, мощность управления ($I_{К} \approx I_{Э}$). Реальные источники сигналов в большинстве случаев не могут из-за ограниченной мощности обеспечить такой ток (мощность).

Поскольку ток базы вызывается тем же самым напряжением $U_{ЭБ}$, что и ток эмиттера и так как $I_{Б} = I_{Э} - I_{К}$, то из этого следует, что получить одинаковый ток коллектора можно за счет задания тока базы, значительно меньшего, чем ток эмиттера.

Это достигается в схеме включения биполярного транзистора с общим эмиттером (ОЭ). На рисунке 1.5.1.7 представлен активный режим схемы с общим эмиттером.

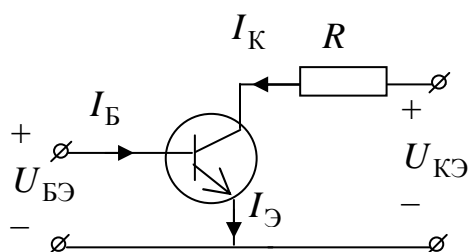


Рис. 1.5.1.7

В этой схеме электрическая мощность, потребляемая от управляющего источника,

$$P_{У} = U_{БЭ} \times I_{Б}$$

много меньше, чем в схеме с общей базой, благодаря чему схема с общим эмиттером является основной схемой, используемой в практической деятельности.

В типичном маломощном кремниевом транзисторе приблизительно один из ста электронов рекомбинирует в базе, так что усиление тока имеет значение порядка 100. Таким образом, если в результате подклю-

чения источника напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ появится некоторый весьма малый ток базы I_B в электрической цепи база-эмиттер, то в электрической цепи эмиттер-коллектор начнет протекать весьма значительный электрический ток коллектора I_K .

Для анализа работы транзистора и для расчета схем при больших сигналах используются вольтамперные характеристики транзистора. Для схемы с общим эмиттером выходной характеристикой называют зависимость тока коллектора I_K от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ при заданном токе базы I_B (рисунок 1.5.1.8, а).

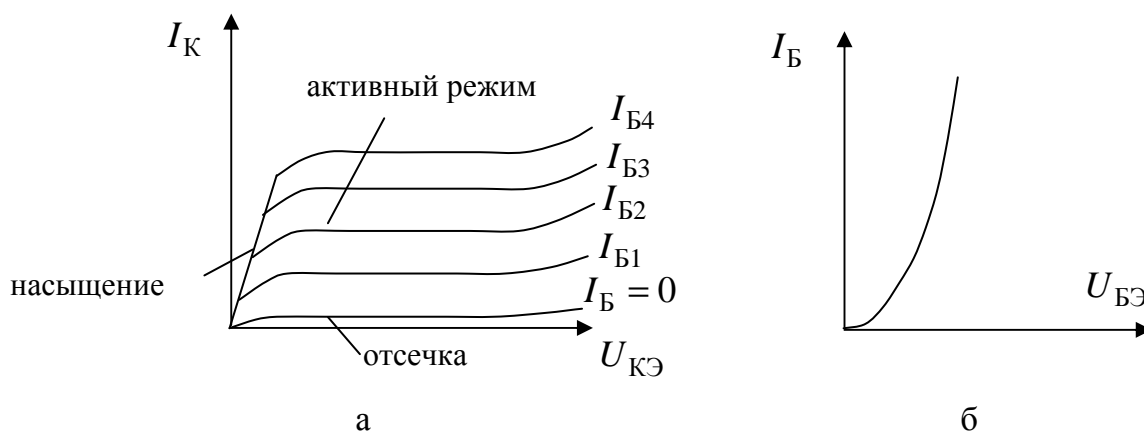


Рис. 1.5.1.8

Входной характеристикой называют зависимость тока базы I_B от напряжения база-эмиттер $U_{БЭ}$ при заданном напряжении коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ (рисунок 1.5.1.8, б). Входная характеристика практически не зависит от напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$, а выходные почти прямолинейны в широком диапазоне изменения напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$.

Для аналитических расчетов малосигнальных устройств с биполярными транзисторами часто используются h -параметры транзистора. Электрическое состояние транзистора характеризуют четыре величины, две из которых – ток базы I_B и напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ – считаются независимыми, а две другие – напряжение база-эмиттер $U_{БЭ}$ и ток коллектора I_K – могут быть выражены через них. При малых изменениях сигналов электрическое состояние транзистора в пределах линейной части выходных характеристик описывается системой линейных уравнений:

$$\Delta U_{БЭ} = h_{11}\Delta I_B + h_{12}\Delta U_{КЭ};$$

$$\Delta I_K = h_{21}\Delta I_B + h_{22}\Delta U_{КЭ},$$

где

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}(\Delta U_{КЭ} = 0) \text{ – входное электрическое}$$

сопротивление биполярного транзистора;

$$h_{12} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \text{ при } I_B = \text{const}(\Delta I_B = 0) \text{ – безразмерный коэффициент}$$

внутренней обратной связи по напряжению; $h_{12} = 0,002 \div 0,0002$ и в большинстве практических расчетов им можно пренебречь, то есть полагать $h_{12} \approx 0$;

$$h_{21} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \text{ при } U_{КЭ} = \text{const}(\Delta U_{КЭ} = 0) \text{ – коэффициент усиления по}$$

току;

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \text{ при } I_B = \text{const}(\Delta I_B = 0) \text{ – выходная электрическая}$$

проводимость транзистора.

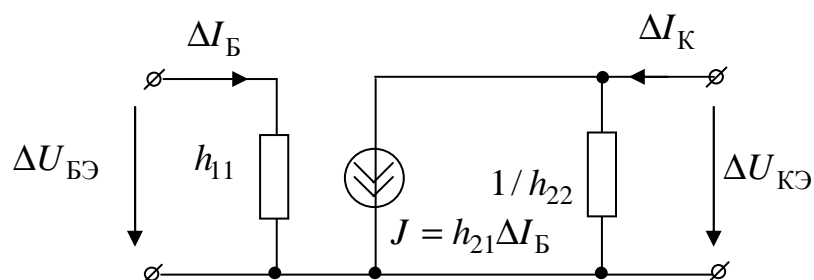


Рис. 1.5.1.9

h -параметры полупроводникового транзистора позволяют достаточно просто создать его схему замещения, например, на рисунке 1.5.1.9 представлена схема замещения транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.

1.5.2. Полевой транзистор

Полевой транзистор является очень широко используемым активным (то есть способным усиливать сигналы) полупроводниковым прибором. Впервые он был предложен в 1930 г. Особенностью полевых транзисторов является практически нулевая мощность управления в статическом состоянии.

Полевыми транзисторами называют активные полупроводниковые приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля и которые предназначены для усиления электрической мощности. Работа такого транзистора основана на изменении электрического сопротивления полупроводникового материала под воздействием поперечного электрического поля.

Полевые транзисторы называют также униполярными, так как в процессе протекания электрического тока участвуют только основные носители. Технология полевых транзисторов обеспечивает значительно большую плотность элементов в одном кубическом миллиметре, что позволяет создавать микросхемы огромной функциональной сложности (однокристалльные электронные вычислительные машины).

На полевых транзисторах выполняются цифровые устройства, не потребляющие энергии в статическом состоянии, также на них удобно строить бесконтактные ключи переменного тока. Мощные полевые транзисторы обладают значительно меньшим электрическим сопротивлением в открытом состоянии при работе в ключевом режиме, что обеспечивает более высокие значения коэффициента полезного действия преобразователей энергии.

Принцип действия полевых транзисторов заключается в том, что носители заряда перемещаются по каналу от электрода, называемого **истоком**, к электроду, называемому **стоком**. С помощью третьего электрода – **затвора** – создается поперечное движению электрических зарядов управляющее поле, позволяющее регулировать проводимость, а, следовательно, и электрический ток канала.

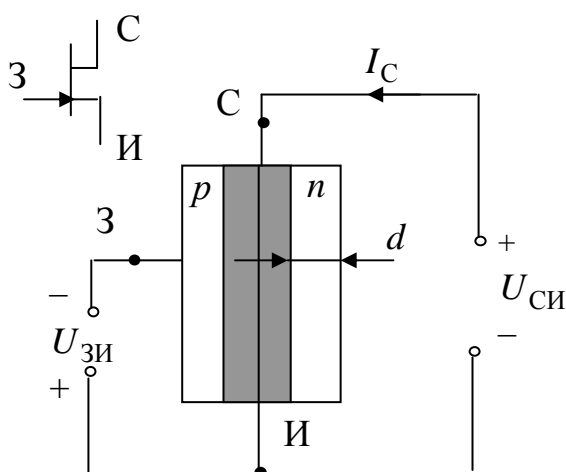


Рис. 1.5.2.1

По типу управления током такие транзисторы делятся на два вида: с управляющим *p-n*-переходом и МОП-транзисторы (транзисторы с изолированным затвором).

В электронной технике наибольшее практическое применение в силу удобства управления и высокой технологичности нашли полевые МОП-транзисторы.

Рассмотрим принцип действия **полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом**. Упрощенная конструк-

ция этого транзистора и его условное изображение представлены на рисунке 1.5.2.1. Регулируемое напряжение сток-исток $U_{СИ}$ подключено к проводящему каналу между стоком (С) и истоком (И), образованным n -слоем p - n -перехода. Управляющее напряжение затвор-исток $U_{ЗИ}$ прикладывается между затвором (З) и истоком запирающей для p - n -перехода полярностью. Электрическое сопротивление проводящего канала сток-исток зависит от его длины, удельного сопротивления слоя n и площади поперечного сечения, определяемой шириной канала d .

При увеличении (относительно исходного нулевого) значения запирающего напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$ ширина обедненной области p - n -перехода (заштриховано) увеличивается, а ширина проводящего n -канала уменьшается. В результате имеем функциональную зависимость

$$I_C = F(d, U_{СИ}), \quad d = f(U_{ЗИ}), \quad I_C = F(U_{ЗИ}, U_{СИ}),$$

подтверждающую управляемость тока стока.

В силу того, что управляющий p - n -переход находится в запертом состоянии, ток затвора, равный обратному току p - n -перехода, очень мал по величине и не является током управления, поскольку практически не зависит от напряжения затвор-исток $U_{ЗИ}$.

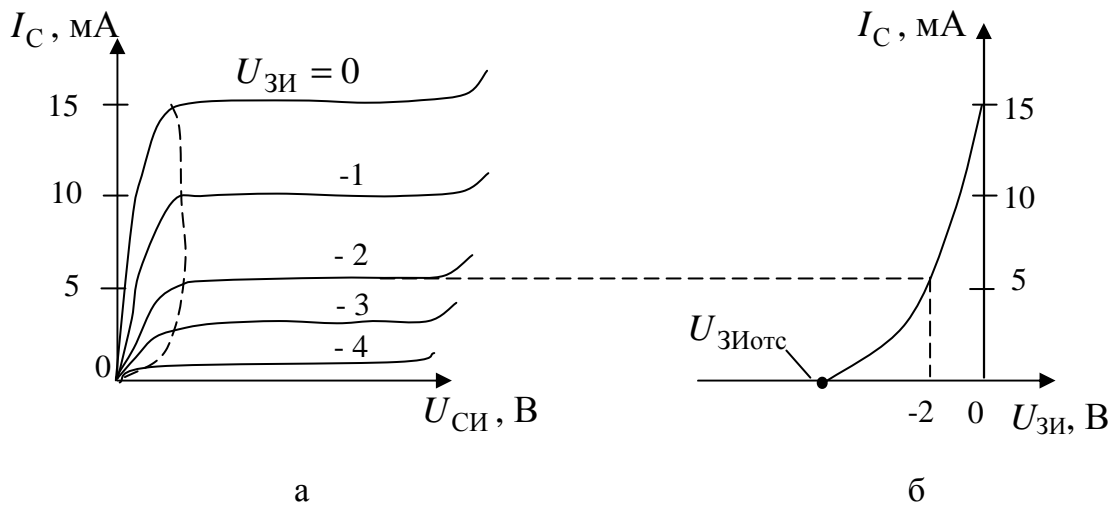


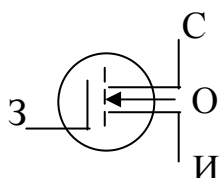
Рис. 1.5.2.2

Вольтамперная характеристика полевого транзистора приведена на рисунке 1.5.2.2. Зависимость $I_C = f(U_{СИ})$ при напряжении затвор-исток $U_{ЗИ} = const$ (рисунок 1.5.2.2, а) называется выходной или стоковой характеристикой. На начальном участке характеристик ток I_C растет с ростом напряжения сток-исток $U_{СИ}$. При дальнейшем росте напряжения $U_{СИ}$ происходит насыщение, и рост тока прекращается. Область, находящаяся справа от пунктирной линии, (рисунок 1.5.2.2, а) яв-

ляется рабочей областью полевого транзистора. Чрезмерное увеличение напряжения сток-исток $U_{СИ}$ вызывает лавинный пробой между затвором и стоком.

По выходным характеристикам может быть построена передаточная характеристика (рисунок 1.5.2.2, б). На участке насыщения она практически не зависит от напряжения сток-исток $U_{СИ}$. При напряжении затвор-исток $U_{ЗИ}$, меньшем напряжения отсечки $U_{ЗИотс}$, канал закрыт. Изменение полярности напряжений сток-исток $U_{СИ}$ и затвор-исток $U_{ЗИ}$ нарушает работу затвора.

Как управляемый элемент, полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом не очень удобен: входное сопротивление сохраняется высоким только при подаче на затвор запирающего напряжения; полярность запирающего напряжения противоположна полярности источника питания, то есть для работы этого элемента требуются два разнополярных напряжения, что приводит к усложнению схемы. От этих недостатков свободны **полевые МОП-транзисторы**.



Полевые МОП-транзисторы отличаются от полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом тем, что в них электрод затвора изолирован от канала слоем диэлектрика. В названии транзистора отражается эта структура (МОП – металл-оксид-полупроводник).

Рассмотрим принцип работы **МОП-транзистора с индуцированным каналом**, конструкция которого представлена на рисунке 1.5.2.3. Стоком и истоком являются области n -типа, сформированные в кремниевом бруске p -типа, который называют **подложкой** или **основанием** (O). Затвор представляет собой металлический электрод, изолированный от кремниевого бруска слоем оксида кремния (SiO_2).

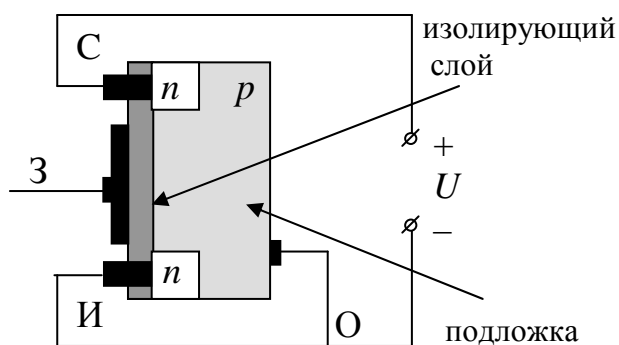


Рис. 1.5.2.3

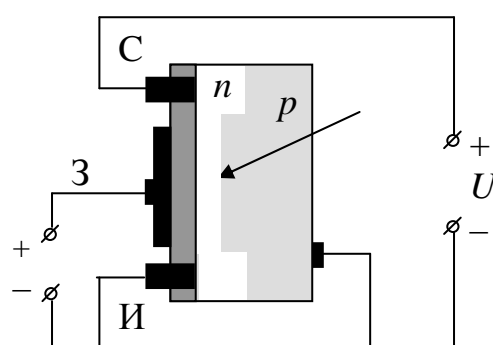


Рис. 1.5.2.4

Как показано на рисунке 1.5.2.3, МОП-транзистор включен в простую электрическую цепь, в которой на сток подано положительное напряжение относительно истока. В этих условиях ток не течет, поскольку p - n -переход на стыке сток-подложка смещен в обратном направлении. Даже если бы сток и исток поменялись местами, ток все равно не протекал бы, так как p - n -переход на стоке был бы смещен в обратном направлении.

Рассмотрим схему на рисунке 1.5.2.4, где на затвор подано положительное напряжение относительно истока. Поле положительного затвора отталкивает дырки в подложке p -типа, в результате чего вблизи поверхности с изолирующим покрытием остается узкий канал n -типа. Этот узкий канал и обеспечивает электрическую проводимость между стоком и истоком.

Таким образом, при наличии некоторого положительного напряжения на затворе, поддерживающего транзистор в проводящем состоянии, величиной электрического тока стока можно управлять, изменяя напряжение на затворе.

На рисунке 1.5.2.5 представлены выходные (рисунок 1.5.2.5, а) и передаточная (рисунок 1.5.2.5, б) характеристики полевого транзистора с индуцированным n -каналом.

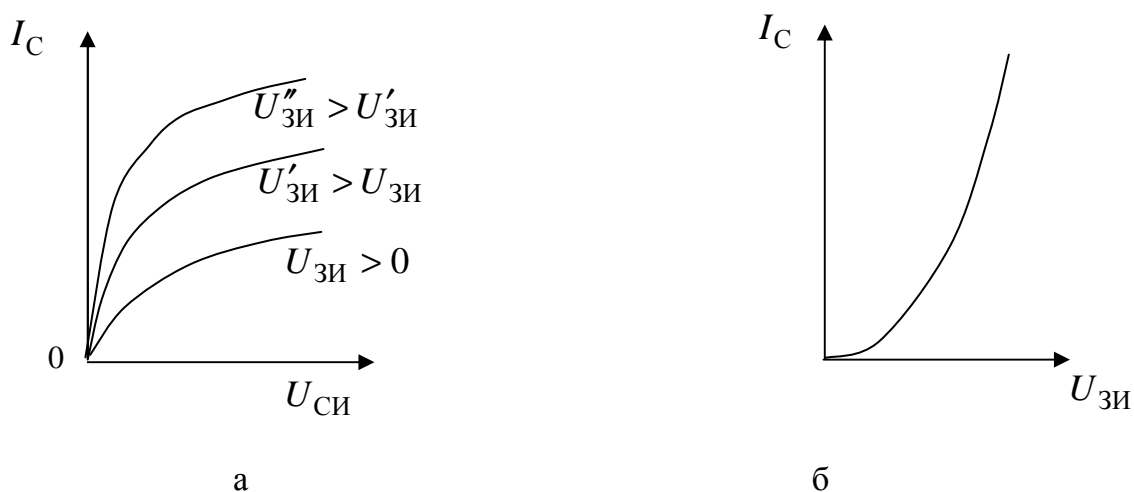


Рис. 1.5.2.5

Итак, по принципу действия МОП-транзистор похож на полевой полупроводниковый транзистор с p - n -переходом за исключением того, что последний проводит при нулевом напряжении на затворе, и канал запирается только при подаче на затвор определенного отрицательного напряжения. Чтобы подчеркнуть различие между полевыми транзисторами двух типов, говорят, что описываемый сейчас МОП-транзистор

работает в режиме *обогащения*, а транзистор с *p-n*-переходом – в режиме *обеднения*.

1.6. Тиристоры

Тиристоры – это полупроводниковые приборы с двумя устойчивыми режимами работы (включен, выключен), имеющие три или более *p-n*-переходов.

Полупроводниковый тиристор по своему принципу – прибор ключевого действия. Во включенном состоянии он подобен замкнутому ключу, а в выключенном – разомкнутому. Именно поэтому слово тиристор происходит от греческого *thyra*, означающего дверь.

Полупроводниковые тиристоры обладают как очень высоким напряжением пробоя, так и очень большим коэффициентом усиления тока. Те тиристоры, которые не имеют специальных электродов для подачи сигналов с целью изменения состояния, а имеют только два силовых



Рис. 1.6.1

электрода (анод и катод), называют неуправляемыми, или диодными, тиристорами (динисторами). Иначе тиристоры называют управляемыми. Конструктивное исполнение некоторых типов тиристоров представлено на рисунке 1.6.1.

Тиристоры являются основными элементами в силовых устройствах электроники, которые называют также устройствами преобразовательной техники. Типичными представителями таких устройств являются **управляемые выпрямители** (преобразуют переменное напряжение в однонаправленное) и **инверторы** (преобразуют постоянное напряжение в переменное).

Динисторы, как правило, используются в слаботочных импульсных устройствах. Основу динистора составляет кристалл полу-

проводника четырехслойной структуры, схематически показанной на рисунке 1.6.2, б, а его условное обозначение и вольтамперная характеристика показаны на рисунках 1.6.2, а и в, соответственно. Крайние области полупроводника называют анодом (p -область) и катодом (n -область). Тиристор обладает тремя p - n -переходами, обозначенными на рисунке Π_1 , Π_2 , Π_3 .

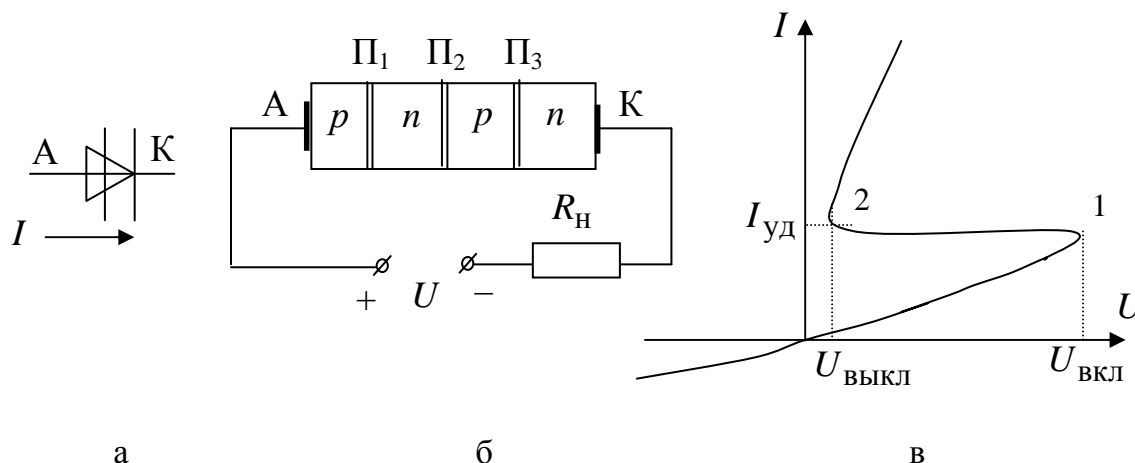


Рис. 1.6.2

При подаче напряжения между анодом и катодом с полярностью, показанной на рисунке 1.6.2, б, переходы Π_1 и Π_3 смещаются в прямом направлении, а Π_2 – в обратном. В этом состоянии электрический ток через динистор весьма мал, так как переход Π_2 оказывается закрытым. При повышении напряжения ток динистора медленно растет до начала ионизации в переходе Π_2 . За счет ионизации возникают дополнительные носители электрического заряда (дырки и электроны), увеличивающие ток через все переходы. При напряжении равном напряжению включения $U_{\text{вкл}}$ (точка 1 на вольтамперной характеристике) переход Π_2 открывается, а напряжение на динисторе при неизменном электрическом токе скачком падает до величины, соответствующей точке 2 характеристики. Эта точка определяет начало участка включенного состояния. На участке 2÷3 характеристика динистора подобна вольтамперной характеристике диода.

Для перехода динистора в закрытое состояние необходимо снизить ток до величины $I \leq I_{\text{уд}}$, где $I_{\text{уд}}$ – ток удержания.

Рассмотрим работу **управляемого тиристора** n - p - n - p -типа (рисунок 1.6.3). Управляемый тиристор также обладает тремя p - n -переходами, и анодное напряжение включено так, что переходы Π_1 и

Π_3 работают в прямом направлении, а переход Π_2 – в обратном. Две промежуточные области называют p -базой и n -базой. В области p -базы расположен управляющий электрод (УЭ). Он подключается к дополнительному источнику напряжения U_y , который создает ток управления I_y . При включении анодного напряжения U сопротивление обратного p - n -перехода очень велико и ток в электрической цепи тиристора практически равен нулю. Если на p -базу подать управляющее напряжение U_y , то, как и в обычном транзисторе, электроны, образованные в области катода, пройдут через p -базу и попадут в область n -базы, в которой будет наблюдаться избыток электронов. В результате возникнет встречное движение дырок из p -области анода, которые проходят p -базу и вызывают дополнительное движение электронов из области катода. Развивается лавинообразный процесс, и ток в электрической цепи резко скачком возрастает.

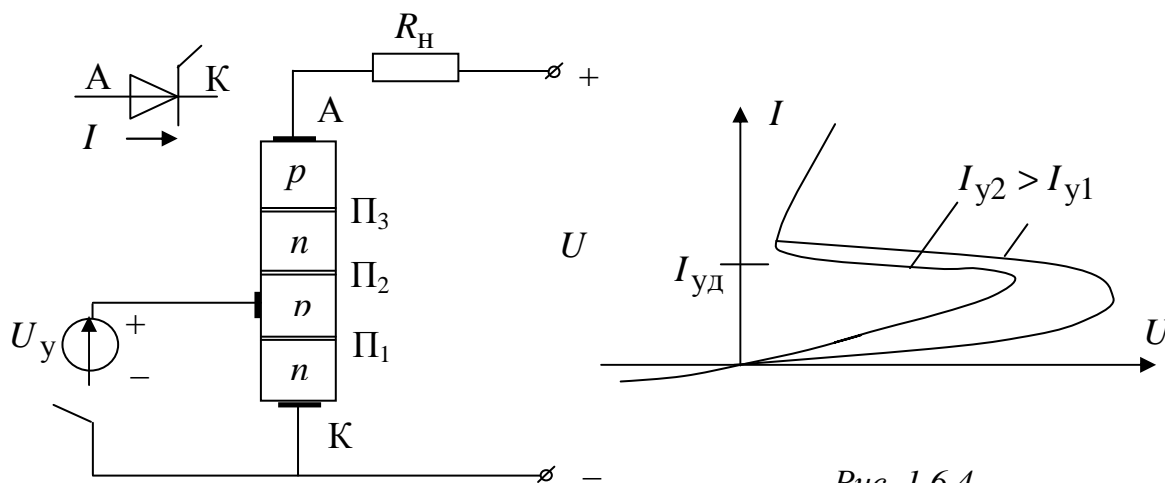


Рис. 1.6.3

Рис. 1.6.4

Если теперь отключить управляющее напряжение, то ток в электрической цепи не изменится. Это объясняется тем, что на p -базе и n -базе накоплено много электронов и дырок, которые продолжают притягивать электрические заряды противоположного знака с анода и катода.

Вольтамперные характеристики управляемого диода при двух значениях тока управления приведены на рисунке 1.6.4.

В этом заключается принципиальное отличие тиристора от транзистора. В транзисторе величина тока коллектора увеличивается или уменьшается в зависимости от изменения напряжения на базе. Напряжение на базе тиристора может «открыть» электрическую цепь тири-

стора, но после этого тиристор теряет управление, и величина тока уже не зависит от напряжения на базе.

Для того чтобы отключить ток в «открытой» электрической цепи полупроводникового тиристора, необходимо отключить анодное напряжение, после чего носители электрических зарядов на p - и n - базах рассасываются, и тиристор возвращается в исходное состояние. При работе в электрических цепях переменного тока тиристоры выключаются при смене полярности, прикладываемого к их электродам напряжения. В этом случае говорят, что тиристоры работают с естественной коммутацией.

Тиристор также выключается, если ток, текущий через тиристор, становится меньше тока удержания $I \leq I_{уд}$. При этом напряжение на тиристоре увеличивается скачкообразно. Этот способ выключения на практике используется редко, так как время выключения при этом оказывается значительным.

При соответствующих размерах p - n -переходов с помощью тиристора можно переключать электрические токи величиной в сотни ампер, при этом на нем падает напряжение всего лишь порядка вольта.

Основные недостатки тиристоров – неполная управляемость и относительно низкое быстродействие (десятки микросекунд). Для построения полностью управляемого тиристорного ключа необходимо применение специальных схем искусственной коммутации с дополнительными коммутирующими элементами.

Наряду с тиристорами в качестве переключающих элементов используются биполярные и полевые транзисторы, которые являются полностью управляемыми элементами.

1.7. Оптоэлектронные приборы

Оптоэлектронные приборы – это полупроводниковые приборы, которые чувствительны к электромагнитному излучению в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях (оптический диапазон спектра), а также приборы, производящие или использующие такое излучение.

Оптический диапазон – это электромагнитные волны с длиной от 1 нм до 1 мм, что соответствует частотам $0,5 \times 10^{12} \div 5 \times 10^{17}$ Гц. Видимому диапазону соответствуют длины волн от 3,88 до 0,78 мкм (частота около 10^{15} Гц).

В практической деятельности используются источники излучения (излучатели), приемники излучения (фотоприемники) и оптроны (оптопары).

Оптро́н – это полупроводниковый прибор, в котором имеется и источник, и приемник излучения, конструктивно объединенные и помещенные в один корпус.

Из источников излучения нашли широкое применение светодиоды и лазеры, а из приемников – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры.

Широко используются оптроны, в которых применяются пары светодиод-фотодиод, светодиод-фототранзистор, светодиод-фототиристор.

Основными достоинствами оптоэлектронных полупроводниковых приборов являются:

- высокая информационная емкость оптических каналов передачи информации (большие значения используемых частот);
- отсутствие влияния приемника излучения на источник (односторонность потока информации);
- невосприимчивость оптических каналов к электромагнитным полям (высокая помехозащищенность).

1.7.1. Светодиод

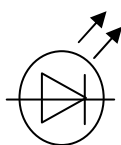


Рис. 1.7.1.1

Светодиод или излучающий диод (СИД, в английском варианте *LED – light emitting diode*) – это полупроводниковый диод, преобразующий электрический ток непосредственно в световое излучение. Условное графическое изображение светодиода представлено на рисунке 1.7.1.1.

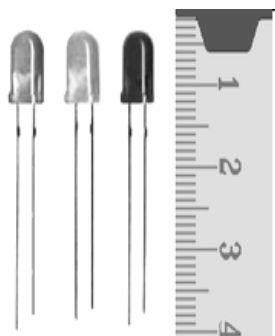


Рис. 1.7.1.2

Светодиод состоит из полупроводникового кристалла на подложке, корпуса с контактными выводами и оптической системы. Современные светодиоды мало похожи на первые корпусные светодиоды, применявшиеся для индикации. Конструкция некоторых типов современных полупроводниковых светодиодов изображена на рисунке 1.7.1.2.

Свечение возникает при протекании прямого тока диода в результате рекомбинации электронов и дырок в области *p-n*-перехода и в областях, прилегающих к ней. При рекомбинации электронов и дырок излучаются фотоны. Цвет свечения опреде-

ляется типом используемых полупроводниковых материалов, образующих p - n -переход.

Для того чтобы p - n -переход излучал свет, необходимо выполнить два условия, которые в той или иной степени противоречат друг другу:

1. Ширина запрещенной зоны в активной области полупроводникового светодиода должна быть близка к энергии квантов света видимого диапазона.

2. Вероятность излучения при рекомбинации электронно-дырочных пар должна быть высокой, для чего полупроводниковый кристалл должен содержать мало дефектов, из-за которых рекомбинация происходит без излучения.

Реально, чтобы соблюсти оба условия, одного p - n -перехода в кристалле оказывается недостаточно, и приходится изготавливать многослойные полупроводниковые структуры, так называемые гетероструктуры, за изучение которых российский физик академик Жорес Алферов получил Нобелевскую премию 2000 года.

Цвет излучения диода зависит от используемого в качестве источника света редкоземельного полупроводникового элемента. Зная, какой именно полупроводниковый материал используется, можно легко вычислить длину излучаемой волны, а в свою очередь, зная длину световой волны можно определить какой будет цвет свечения. Важнейшими элементами, используемыми в *LED*-светодиодах, являются:

– алюминий (*Al*), галлий (*Ga*), индий (*In*), фосфор (*P*), вызывающие свечение в диапазоне от красного цвета до жёлтого;

– индий (*In*), галлий (*Ga*), азот (*N*) используют для получения голубого и зелёного свечений.

Кроме того, если к кристаллу, вызывающему голубое свечение, добавить люминофор, то получается белый цвет диода.

К преимуществам светодиодов можно отнести:

– низкое энергопотребление – не более 10% от потребления при использовании ламп накаливания;

– долгий срок службы – до 100 000 часов (так указывают производители);

– ударная и вибрационная устойчивость;

– чистота и разнообразие цветов, направленность излучения;

– регулируемая интенсивность;

– низкое рабочее напряжение;

– не содержат в своем составе ртути и почти не нагреваются;

– высокий коэффициент полезного действия;

– миниатюрность.

Недостатки светодиодов:

- высокая стоимость (один люмен, излученный светодиодом, стоит в 100 раз выше, чем галогенная лампа);
- малый световой поток от одного элемента (в светильнике 10÷15 светодиодов);
- деградация параметров светодиодов со временем.

Первые светодиоды появились в 1962 году, а в 1968 г. была создана первая светодиодная лампочка. Световой поток первых светодиодов был слабым, всего 0,001 лм, а цвет только красным. К 1976 году были получены оранжевые, желтые и желто-зеленые светодиоды, яркие настолько, что их можно было разглядеть и при солнечном свете. До 1985 года они использовались исключительно в качестве индикаторов, со световым потоком всего лишь 0,1 лм на одну точку. С 1985 года их световой поток увеличился до 1÷100 лм, и они уже стали применяться в качестве отдельных световых элементов, таких, например, как лампы в автомобилях. В 1990 г. светоотдача полупроводников достигла уже 10 лм/Вт, что позволило им стать адекватной заменой лампам накаливания.

В настоящее время появилось много новых применений светодиодов, как высокоэффективных источников света: светофоры и активные дорожные знаки, автомобильный и железнодорожный транспорт, подсветка сотовых телефонов, световая реклама, полноцветные светодиодные дисплеи, архитектура и многое другое. Более того, сверхяркие светодиоды начали вытеснять обычные лампы накаливания и галогеновые лампы. В настоящее время белые светодиоды, используемые для задач освещения, по объему потребления превысили 50% от общего потребления ярких светодиодов.

1.7.2. Фоторезистор

Фоторезистор – это полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего электрического сопротивления при облучении светом. Поток фотонов, падающих на полупроводник, вызывает появление пар электрон-дырка, увеличивающих электрическую проводимость. Это явление называют внутренним фотоэффектом (эффектом фотопроводимости). Ус-

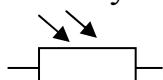


Рис. 1.7.2.1

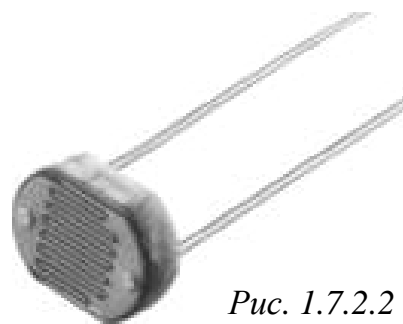


Рис. 1.7.2.2

ловное графическое изображение фоторезистора представлено на рисунке 1.7.2.1.

Фоторезисторы изготавливают из светочувствительных материалов (сульфид кадмия CdS , селенид кадмия $CdSe$). Полупроводниковый материал наносят в виде тонкого слоя на стеклянную или кварцевую подложку или вырезают в виде тонкой пластинки из монокристалла. Слой или пластинку полупроводника снабжают двумя электродами и помещают в защитный корпус. Конструктивное исполнение одного из типов полупроводникового фоторезистора представлено на рисунке 1.7.2.2.

Фоторезисторы используют для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании; в охранных датчиках; в устройствах автоматического открывания дверей; в тестирующем оборудовании для измерения интенсивности света.

1.7.3. Фотодиод

Фотодиод – это приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в $p-n$ -переходе. Фотодиоды имеют структуру

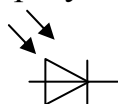


Рис. 1.7.3.1

обычного полупроводникового диода. Основное физическое явление, которое используется при работе полупроводникового фотодиода – генерация пар электрон-дырка в области $p-n$ -перехода и в прилегающих к нему областях под действием излучения.

Условное графическое изображение фотодиода представлено на рисунке 1.7.3.1.

Конструкция полупроводникового фотодиода приведена на рисунке 1.7.3.2.

Полупроводниковые фотодиоды могут работать либо в режиме фотогенератора (без внешнего источника электрической энергии) либо в режиме фотопреобразователя (с внешним источником электрической энергии).

Фотогенератор преобразует световую энергию в электрическую. При этом фотоны, проникая в область $p-n$ -перехода, вызывают

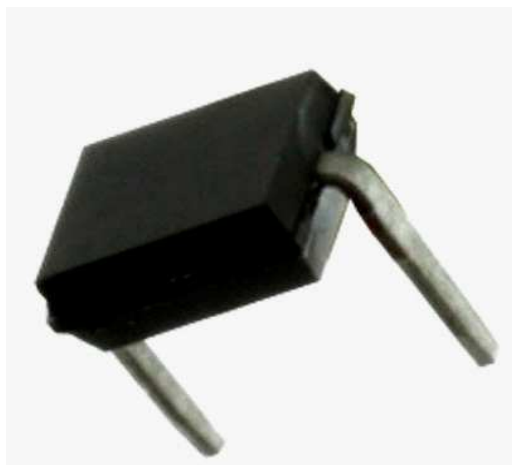


Рис. 1.7.3.2

генерацию пар электрон-дырка. Под действием электрического поля перехода дырки движутся к электроду слоя p , электроны – к электроду слоя n . В результате между электродами возникает напряжение, которое увеличивается при увеличении светового потока. В этом режиме работают солнечные батареи (рисунок 1.7.3.3).



Рис. 1.7.3.3

Собственно солнечные батареи представляют собой группы из нескольких фотоэлектрических модулей, соединенных последовательно-параллельно для получения требуемых мощности и напряжения. Модуль, в свою очередь, объединяет несколько солнечных ячеек – фотоэлементов. Обычно мощность ячейки около 1 Вт, размер – несколько квадратных миллиметров.

Солнечные элементы на основе кремния имеют коэффициент полезного действия $12 \div 15\%$. Коэффициент полезного действия лабораторных образцов достигает 23% . Мировое производство солнечных элементов превышает 50 МВт в год и увеличивается ежегодно на 30% . Лидерами в производстве фотоэлектрических модулей являются Япония, США, Германия, Индия.

Несомненно, фотоэнергетика получит дальнейшее развитие, как в мире, так и в России во многом благодаря следующим своим качествам:

- фотоэлектричество является экологически чистым источником энергии;

- сырьевая база фотоэнергетики (кремний) практически неисчерпаема, содержание кремния в земной коре превышает запасы урана в 100 тысяч раз;

- фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) обладают высокими эксплуатационными качествами: долговечность ($25 \div 30$ лет), высокая надежность из-за отсутствия вращающихся частей и полная автоматизация.

Однако, несмотря на положительные тенденции мирового рынка, высокая стоимость электроэнергии от фотоэлектрических преобразова-

телей сдерживает их более широкое применение. Она обусловлена как дороговизной основного материала, так и дороговизной технологического процесса. Поэтому в мире ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на удешевление фотоэлектрических преобразователей.

За последние 50 лет произошло значительное снижение удельной стоимости фотоэлектрических модулей. Если в 1950 году их удельная стоимость составляла 1000 \$/Вт, сейчас она находится на уровне 4÷5 \$/Вт. Это огромный прогресс, однако, удельная стоимость еще высока и это обстоятельство сдерживает развитие энергетики на солнечных фотоэлектрических модулях.

Фотопреобразователь используется для управления током. К фотодиоду прикладывается обратное напряжение и через него в обратном направлении течет малый электрический ток. При увеличении светового потока этот ток увеличивается.

1.7.4. Фототранзистор и фототиристор

Фототранзистор – это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, вариант биполярного транзистора. Отличается от классического варианта тем, что область базы доступна для светового облучения, за счёт чего появляется возможность управлять усилением электрического тока с помощью оптического излучения. Фототранзистор предназначен для преобразования светового потока в электрический ток. Условное графическое изображение фототранзистора представлено на рисунках 1.7.4.1, а, б, где а – фототранзистор типа *p-n-p*; б – фототранзистор типа *n-p-n*.

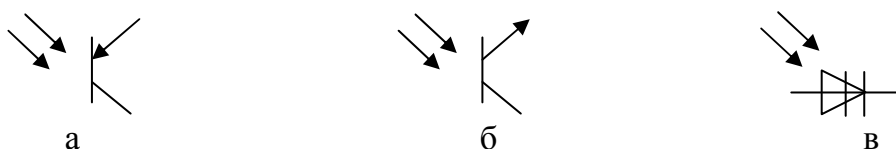


Рис. 1.7.4.1

Выходные характеристики фототранзистора подобны выходным характеристикам обычного биполярного транзистора, но положение характеристик определяется не током базы, а уровнем освещенности (или величиной светового потока).

Недостатком фототранзисторов является большая инерционность, что ограничивает их применение в качестве быстродействующих выключателей.

Фототиристор – это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, имеющий структуру, схожую со структурой обычного тиристора, но отличающийся тем, что включается не напряжением, а светом, падающим на тиристорную структуру. Условное графическое изображение полупроводникового фототиристора представлено на рисунке 1.7.4.1, в.

Этот прибор применяется в управляемых светом выпрямителях и наиболее эффективен в управлении сильными токами при высоких напряжениях. Скорость отклика на свет – менее 1 мкс.

Оптрон – это полупроводниковый прибор, содержащий источник излучения и приемник излучения, объединенные в одном корпусе и связанные между собой оптически, электрически или одновременно обеими связями. Очень широко распространены оптроны, у которых в качестве приемника излучения используются фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и фототиристор.

Рассмотрим оптопару светодиод-фотодиод. Условное графическое изображение представлено на рисунке 1.7.4.2.

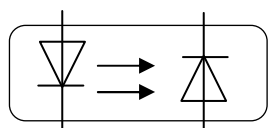


Рис. 1.7.4.2

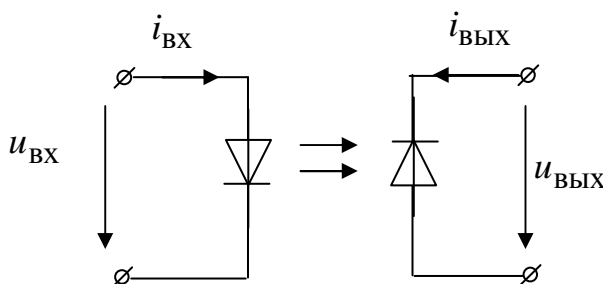


Рис. 1.7.4.3

Схема включения представлена на рисунке 1.7.4.3. В данной схеме излучающий диод (слева) должен быть включен в прямом направлении, а фотодиод – в прямом (режим фотогенератора) или в обратном направлении (режим фотопреобразователя).

Оптроны используются как датчики во всевозможных детекторах наличия (например, детектор бумаги в принтере), датчиках конца (или начала), счётчиках и дискретных спидометрах на их базе (например, координатные счётчики в механической мыши, ареометры). Также оптроны используются для гальванической развязки электрических цепей – передачи сигнала без передачи напряжения, для бесконтактного управления и защиты.

На принципе полупроводникового оптрона построены такие приспособления как:

- беспроводные пульты управления и оптические устройства ввода-вывода;
- беспроводные (атмосферно-оптические) и волоконно-оптические устройства передачи аналоговых и цифровых сигналов.

Также оптроны используются в неразрушающем контроле как датчики аварийных ситуаций. *GaP*-диоды начинают излучать свет при воздействии на них радиации, а фотоприёмник фиксирует возникшее свечение и сообщает о тревоге.

2. Выпрямители и электрические фильтры

2.1. Неуправляемые однофазные выпрямители

Выпрямитель – это электротехническое устройство, преобразующее электрическую энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока (рис. 2.1.1).

Основными элементами выпрямителя являются трансформатор и вентили, с помощью которых обеспечивается одностороннее протека-



Рис. 2.1.1

ние тока в электрической цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам выпрямителя часто подключают электрический сглаживающий фильтр. Для регулирования или стабилизации выпрямленного напряжения и тока потребителя к входным зажимам выпрямителя подключают регулятор или стабилизатор (стабилизатор может быть включен и на стороне переменного тока выпрямителя).

С помощью трансформатора в преобразовательных устройствах производится преобразование величины входного (для выпрямителей) или выходного (для инверторов) напряжения, электрическое разделение отдельных электрических цепей преобразователя (как правило, разделяются электрические цепи с источниками питания и электрические цепи с нагрузкой), преобразование числа фаз системы напряжений (напряжения, питающего выпрямитель, или напряжения, питающего автономную нагрузку инвертора).

Для выпрямления переменного электрического тока в неуправляемых выпрямителях используют полупроводниковые диоды средней и большой мощности.

2.1.1. Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодный выпрямитель (рисунок 2.1.1.1) состоит из трансформатора, к вторичной обмотке которого последовательно подсоединены выпрямительный диод VD и нагрузочный резистор R_H .

Для упрощения анализа работы выпрямителей однофазный трансформатор и полупроводниковый диод считают идеальными, то есть принимают следующие допущения: у трансформатора активное сопротивление обмоток, а у диода прямое сопротивление равны нулю; обратное сопротивление диода равно бесконечности; в трансформаторе отсутствуют потоки рассеяния. При таких допущениях с подключением первичной обмотки трансформатора к сети переменного синусоидального напряжения во вторичной обмотке будет наводиться синусоидальная электродвижущая сила.

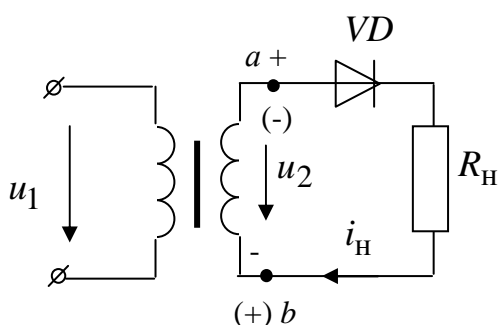


Рис. 2.1.1.1

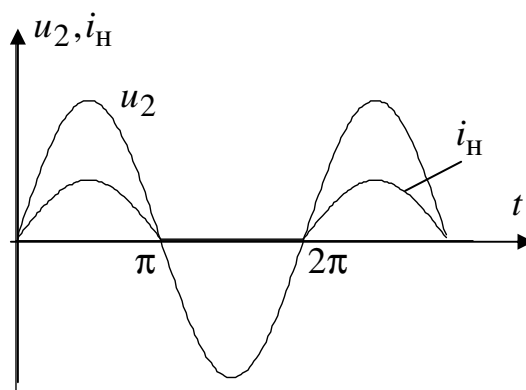


Рис. 2.1.1.2

Работу выпрямителя удобно рассматривать с помощью временных диаграмм (рисунок 2.1.1.2).

В первый полупериод, когда электрический потенциал точки a выше электрического потенциала точки b к диоду приложено прямое напряжение, он открыт и в нагрузку течет ток нагрузки i_H . Во второй половине периода к диоду приложено обратное напряжение, диод закрыт, ток в электрической цепи равен нулю, а к запертому диоду прикладывается обратное напряжение вторичной обмотки трансформатора u_2 (рисунок 2.1.1.2).

Такой выпрямитель «работает» только половину периода, поэтому через нагрузку будет идти сильно пульсирующий периодический электрический ток, состоящий из разделенных паузами отдельных импульсов тока (рисунок 2.1.1.2).

Основными электрическими параметрами однополупериодного выпрямителя являются:

- средние значения выпрямленного электрического тока и напряжения $I_{H.cр}$ и $U_{H.cр}$;
- мощность нагрузочного устройства $P_{H.cр} = U_{H.cр} \times I_{H.cр}$;
- амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения $U_{оснт}$;
- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = \frac{U_{оснт}}{U_{H.cр}}$;
- действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора I_1, U_1 и I_2, U_2 .

В однополупериодном выпрямителе

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

$$\text{или } U_2 = \frac{\pi U_{H.cр}}{\sqrt{2}} \approx 2,22U_{H.cр};$$

$$I_{H.cр} = \frac{U_{H.cр}}{R_H}.$$

Действующее значение электрического тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi U_{H.cр}}{\sqrt{2}R_H} \approx 2,22I_{H.cр}.$$

Коэффициент пульсаций составляет $p = 1,57$. Это значение можно получить из разложения в ряд Фурье выходного напряжения однополупериодного выпрямителя:

$$u_2 = \frac{U_{2m}}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Отсюда амплитуда основной (первой гармоники напряжения) равна $\frac{U_{2m}\pi}{2\pi}$, следовательно, коэффициент пульсаций

$$p = \frac{U_{оснм}}{U_{н.ср}} = \frac{U_{2m}/2}{\sqrt{2}U_2/\pi} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57.$$

Однополупериодная схема имеет существенные недостатки: выпрямленное напряжение (ток) сильно пульсирует, оно значительно меньше приложенного, на диоде большое обратное напряжение, мощность трансформатора используется не полностью.

2.1.2. Двухполупериодные выпрямители

Двухполупериодные выпрямители бывают двух типов: мостовыми и с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора. Они являются более мощными, чем однополупериодные выпрямители, так как с их помощью нагрузочные устройства используют обе полуволны питающего напряжения. Однако это достигается за счет усложнения схем.

Двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из трансформатора и четырех диодов, подключенных к вторичной обмотке по мостовой схеме (рисунок 2.1.2.1).

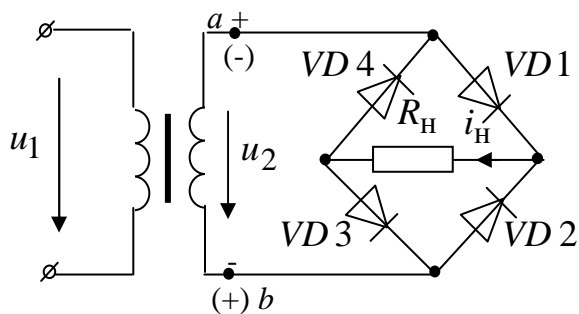


Рис. 2.1.2.1

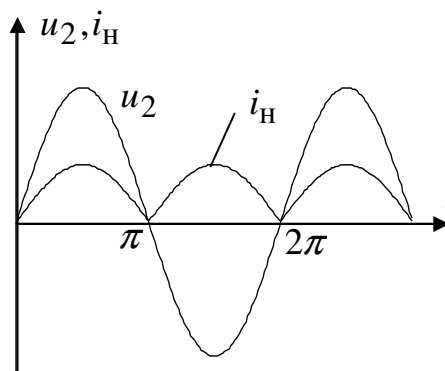


Рис. 2.1.2.2

Диоды $VD1$ и $VD3$ открыты в первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 , когда электрический потенциал точки a выше электрического потенциала точки b . При этом в нагрузочном сопротивлении R_H появляется ток нагрузки i_H . В этом интервале времени диоды $VD2$ и $VD4$ закрыты. В следующий (отрицательный) полупериод напряжения вторичной обмотки электрический потенциал точки b выше электрического потенциала точки a , диоды $VD1$ и $VD3$ закрыты, а $VD2$ и $VD4$ открыты. В оба полупериода напряжения, как видно из рисунка 2.1.2.2, ток через нагрузочный резистор R_H имеет одно и то же направление.

При этом средние значения выпрямленных напряжений $U_{H.cр}$ и токов $I_{H.cр}$ запишутся следующим образом:

$$U_{H.cр} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0,9U_2 ;$$

$$I_{H.cр} = \frac{U_{H.cр}}{R_H} .$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора:

$$U_2 = \frac{\pi U_{H.cр}}{2\sqrt{2}} \approx 1,11U_{H.cр} .$$

Средний ток каждого диода равен

$$I_{a.cр} = 0,5I_{H.cр} ,$$

а действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора –

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi U_{H.cр}}{2\sqrt{2}R_H} \approx 1,11 \frac{U_{H.cр}}{R_H} .$$

Максимальное обратное напряжение на диодах

$$U_{обр.max} = \sqrt{2}U_2 .$$

Максимальный прямой ток диода

$$I_{a.max} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R_H} = \frac{\pi U_{H.cр}}{2R_H} \approx 1,57 \frac{U_{H.cр}}{R_H} .$$

Разложив напряжение $u_H = i_H R_H$ в ряд Фурье, получим числовое значение коэффициента пульсаций:

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

Амплитуда основной гармоники напряжения частотой 2ω равна $\frac{2U_{H, \text{ср}}}{3}$, следовательно, коэффициент пульсаций – $p \approx 0,67$.

Мостовой выпрямитель по сравнению с однополупериодным выпрямителем имеет следующие преимущества: средние значения выпрямленного тока и напряжения в два раза больше, а коэффициент пульсаций меньше.

В то же время максимальное обратное напряжение на каждом из закрытых диодов, которые по отношению к вторичной обмотке включены параллельно, имеет такое же значение, как и в однополупериодном выпрямителе, то есть $U_{\text{обр. max}} = \sqrt{2}U_2$. Все эти преимущества достигнуты за счет увеличения числа диодов в четыре раза, что является основным недостатком мостового выпрямителя.

Двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рисунок 2.1.2.3) можно рассматривать как сочетание двух однополупериодных выпрямителей, включенных на один нагрузочный резистор R_H .

В каждый из полупериодов напряжения u_{2ab} работает либо верхняя, либо нижняя часть выпрямителя. Если в каждой половине вторичной обмотки считать положительным то направление тока, при котором соответствующий диод открыт, то ток в каждой половине обмотки и в каждом диоде будет синусоидальным в течение положительного (для этой половины) полупериода и равным нулю в течение отрицательного полупериода. При этом независимо от того, какой из диодов открыт, ток в нагрузочном резисторе R_H сохраняет свое направление. При одинаковых значениях напряжений u_{2a} и u_{2b} эти токи будут равны (рисунок 2.1.2.4).

При идеальном трансформаторе ток в первичной обмотке с числом витков w_1 синусоидальный

$$i_1 = (i_{VD1} - i_{VD2}) \frac{w_2}{w_1}$$

и совпадает по фазе с напряжением сети (рис. 2.1.2.5). В вышеприведенной формуле i_{VD1}, i_{VD2} – токи, текущие через диоды; w_2 – число витков каждой половины вторичной обмотки трансформатора.

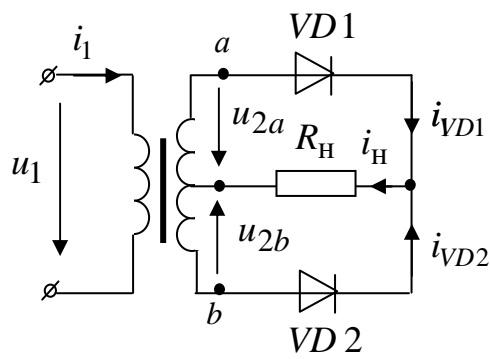


Рис. 2.1.2.3

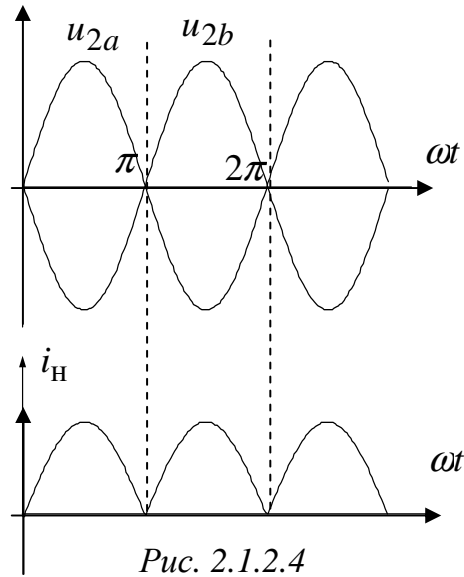


Рис. 2.1.2.4

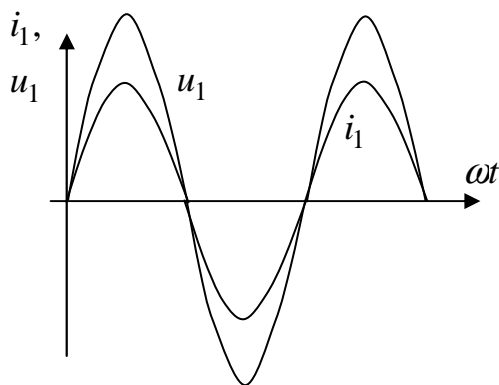


Рис. 2.1.2.5

Данный тип выпрямителя имеет те же преимущества перед однополупериодным выпрямителем, что и мостовой выпрямитель, за исключением максимального обратного напряжения $U_{\text{обр.max}}$, которое определяется напряжением u_{2ab} . При $U_{\text{обр.max}} = \sqrt{2}U_{2ab}$ и одинаковых значениях сопротивления нагрузки R_H

$$U_{\text{обр.max}} = \pi U_{\text{н.ср}} \approx 3,14 U_{\text{н.ср}}.$$

Все остальные соотношения для токов и напряжений определяются по формулам, полученным для мостового выпрямителя, при этом коэффициент пульсации составляет $p \approx 0,67$.

В рассматриваемом выпрямителе габариты, масса и стоимость трансформатора значительно больше, чем в однополупериодном и мостовом выпрямителях, так как вторичная обмотка имеет вдвое большее число витков и требуется вывод от средней точки.

Двухполупериодные выпрямители применяются для питания нагрузочных устройств малой и средней мощности.

Помимо рассмотренных схем в маломощных выпрямителях широко применяют схемы умножения напряжения, позволяющие получать постоянное выпрямленное напряжение, значительно большее, чем амплитуда входного переменного напряжения $u(t) = U_m \sin \omega t$.

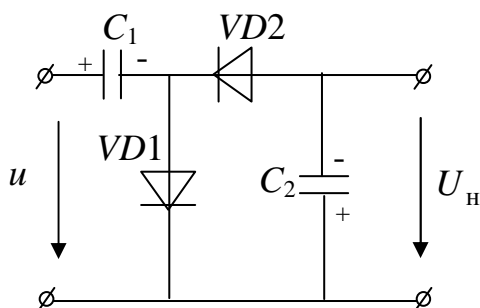


Рис. 2.1.2.6

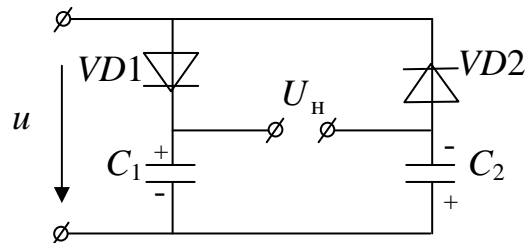


Рис. 2.1.2.7

На рисунке 2.1.2.6 показана схема последовательного выпрямителя-удвоителя напряжения. Во время положительного полупериода входного напряжения конденсатор C_1 заряжается через диод $VD1$ до амплитудного значения переменного напряжения U_m . Во время отрицательного полупериода напряжение на конденсаторе C_1 складывается с входным напряжением источника, вследствие чего конденсатор C_2 заряжается через диод $VD2$ до удвоенного значения амплитуды входного напряжения. Таким образом, напряжение на нагрузке $U_n \approx 2U_m$.

В параллельной схеме выпрямления с удвоением (рисунок 2.1.2.7) во время отрицательного полупериода конденсатор C_2 заряжается через диод $VD2$. Конденсатор C_1 заряжается во время положительного полупериода. Выходное постоянное напряжение равно сумме напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 .

2.1.3. Трехфазные неуправляемые выпрямители

Трехфазные выпрямители применяют как выпрямители средней и большой мощностей. Существует два основных типа выпрямителей: с нейтральным выводом и мостовой.

Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом состоит из трехфазного трансформатора, обмотки которого соединены звездой, трех диодов, каждый из которых включен в фазу трансформатора и нагрузочного резистора R_n (рисунок 2.1.3.1).

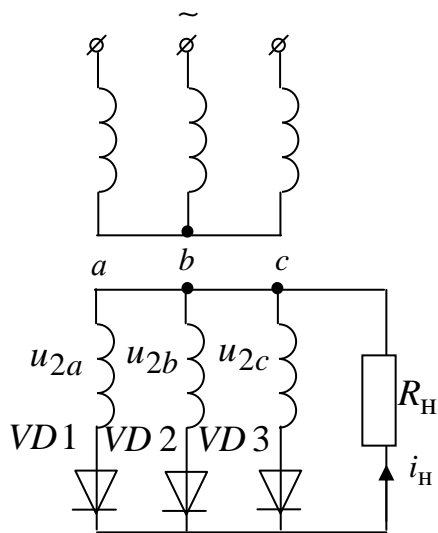


Рис. 2.1.3.1

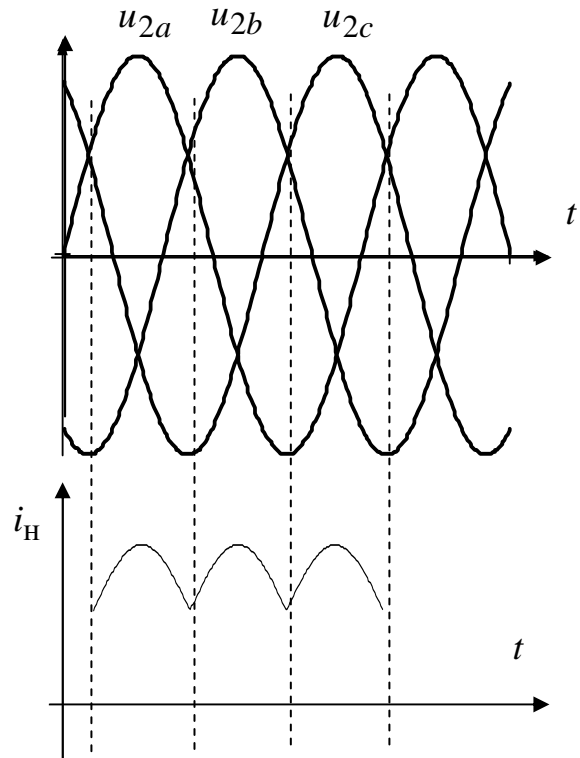


Рис. 2.1.3.2

Диоды работают поочередно, каждый в течение трети периода, когда электрический потенциал начала одной из фазных обмоток (например, a) более положителен, чем двух других (b и c). Выпрямленный ток в нагрузочном резисторе R_H (рисунок 2.1.3.2) создается токами каждого диода, имеет одно и то же направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз:

$$i_H = i_a + i_b + i_c.$$

Коэффициент пульсаций схемы выпрямления при этом составляет $p = 0,25$.

Данный выпрямитель служит для питания нагрузочных устройств, в которых средние значения выпрямленного тока доходят до сотен ампер, а напряжение – до десятков киловольт. К достоинствам выпрямителя можно отнести высокую надежность (минимальное количество диодов), к недостаткам – подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током, что снижает коэффициент полезного действия выпрямителя.

Трехфазный мостовой выпрямитель содержит выпрямительный мост из шести диодов (рисунок 2.1.3.3). Данная схема выпрям-

ления была предложена в 1923 г. профессором А.Н.Ларионовым (схема Ларионова).

Диоды $VD 1, VD 3, VD 5$ образуют группу, в которой соединены все катодные выводы, а у второй половины диодов ($VD 2, VD 4, VD 6$) соединены все анодные выводы (рисунок 2.1.3.3). Примем значение электрического потенциала нейтральной точки n обмоток $\varphi_n = 0$. При этом электрические потенциалы выводов вторичной обмотки трансформатора равны

$$\begin{aligned}\varphi_a &= u_a = U_m \sin \omega t ; \\ \varphi_b &= u_b = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ \varphi_c &= u_c = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) .\end{aligned}$$

В каждый момент времени работает тот диод первой группы, у которого анодный вывод имеет наибольший положительный электрический потенциал относительно электрического потенциала точки n , а вместе с ним – диод второй группы, у которого катодный вывод имеет наибольший по абсолютному значению отрицательный электрический потенциал относительно нейтральной точки.

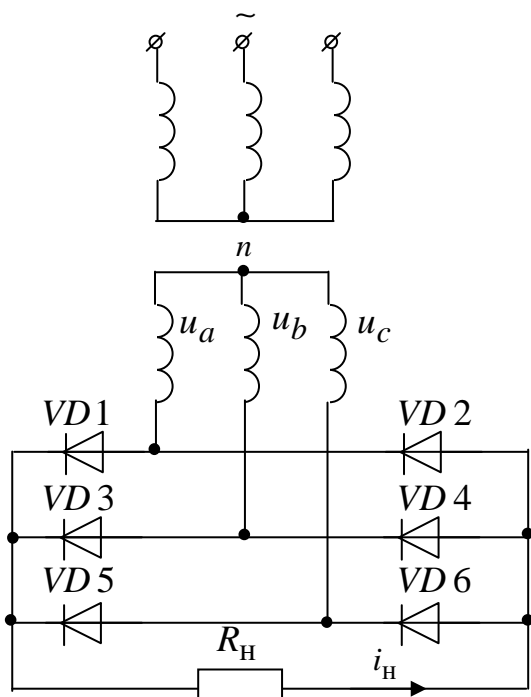


Рис. 2.1.3.3

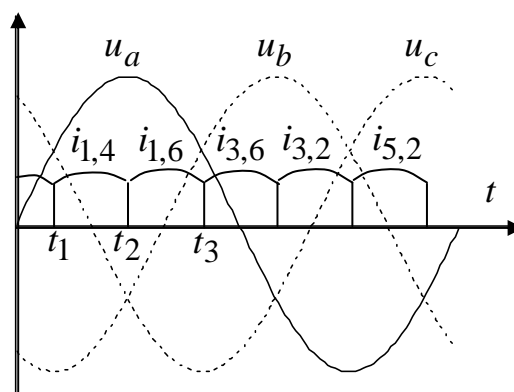


Рис. 2.1.3.4

Например, в интервал времени $t_1 \div t_2$ (рисунок 2.1.3.3) ток возникает в электрической цепи диод $VD 1$ – нагрузочный резистор R_H – диод $VD 4$, так как анодный вывод диода $VD 1$ имеет наибольший положительный электрический потенциал $\varphi_{a \max}$, а катодный вывод диода $VD 4$ имеет наибольший по абсолютному значению отрицательный электрический потенциал $\varphi_{b \max}$. При этом к этим диодам будет приложено наибольшее в этом интервале времени линейное напряжение u_{ab} . В интервал времени $t_2 \div t_3$ (рисунок 2.1.3.4) открыты диоды $VD 1$ и $VD 6$, так как к ним приложено наибольшее в этом интервале линейное напряжение u_{ac} и так далее (рисунок 2.1.3.4). Во все интервалы времени ток в нагрузке имеет одинаковое направление.

Из временных диаграмм (рисунок 2.1.3.4) видно, что пульсации выпрямленного тока значительно меньше, чем в трехфазном выпрямителе с нейтральным выводом. Коэффициент пульсаций для данной схемы составляет 0,057.

2.2. Электрические фильтры

Для того чтобы уменьшить пульсации и приблизить выпрямленный ток (напряжение) к постоянному, используют сглаживающие и резонансные электрические фильтры.



Рис. 2.2.1

Сглаживающим электрическим фильтром называют электротехническое устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке.

Общий вид силового электрического фильтра изображен на рисунке 2.2.1.

При любой электрической схеме выпрямления, помимо постоянной составляющей, в кривой выходного напряжения содержится переменная

составляющая, называемая пульсацией напряжения. Эта пульсация напряжения может быть столь значительной, что непосредственное питание нагрузки от выпрямителя возможно относительно редко: зарядка аккумуляторных батарей, питание электродвигателей, цепей сигнализации и так далее, то есть там, где приемник энергии не чувствителен к переменной составляющей в кривой выпрямленного напряжения.

Сглаживающий электрический фильтр представляет собой большое сопротивление для переменной составляющей тока. Поэтому переменная составляющая напряжения на входе значительно больше переменной составляющей на выходе сглаживающего электрического фильтра. Наряду с ослаблением переменной составляющей напряжения, сглаживающий электрический фильтр уменьшает его постоянную составляющую. Чем меньше степень уменьшения постоянной составляющей при неизменном ослаблении переменной составляющей, тем качественнее электрический фильтр.

Электрический фильтр включается между выпрямителем и нагрузкой (рисунок 2.2.2).

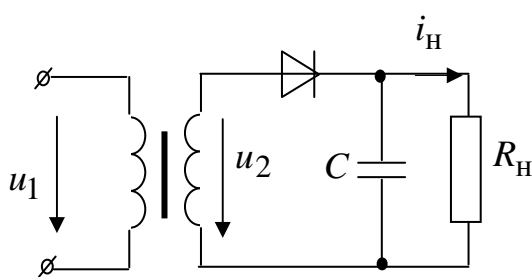


Рис. 2.2.2

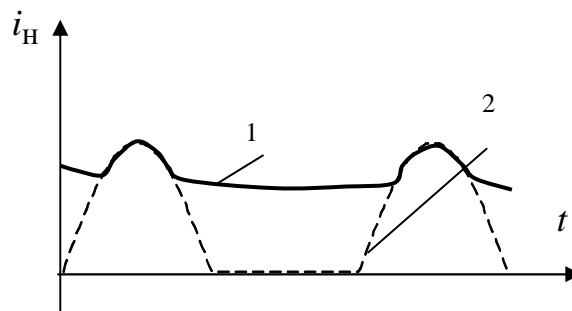


Рис. 2.2.3

Основным параметром, характеризующим эффективность действия сглаживающего электрического фильтра, является **коэффициент сглаживания**, равный отношению коэффициентов пульсаций на входе и выходе электрического фильтра:

$$q = \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВЫХ}}}.$$

Рассмотрим принцип работы простейших однозвенных электрических фильтров, включенных на выход однополупериодного выпрямителя.

В простейшем случае для маломощных потребителей электрическим фильтром служит конденсатор большой емкости C , подключенный параллельно нагрузке R_{H} (рисунок 2.2.2). Заряжаясь от импульсов

тока, конденсатор C в момент спада тока или его исчезновения (между импульсами) разряжается через сопротивление нагрузки R_H . Если конденсатор достаточно большой емкости, то за время между импульсами тока он не успевает полностью разрядиться, и через нагрузку R_H будет непрерывно поддерживаться ток (рисунок 2.2.3, 1 – с электрическим фильтром; 2 – без электрического фильтра).

Для обеспечения значительного сглаживания пульсаций необходимо, чтобы емкостное сопротивление конденсатора было значительно меньше, чем сопротивление нагрузки. В этом случае можно считать, что переменная составляющая тока вентиля (диода) равна току конденсатора C , а постоянная составляющая – току нагрузки R_H .

Основными недостатками емкостных электрических фильтров являются перегрузка источника питания большими электрическими токами зарядки конденсатора и увеличение обратного напряжения до такой величины, при которой может возникнуть электрический пробой вентиля.

Для выпрямителей средней и большой мощности используются индуктивные электрические фильтры (рисунок 2.2.4), обеспечивающие непрерывность тока в электрической цепи нагрузки и благоприятный режим работы для вентиля выпрямителя.

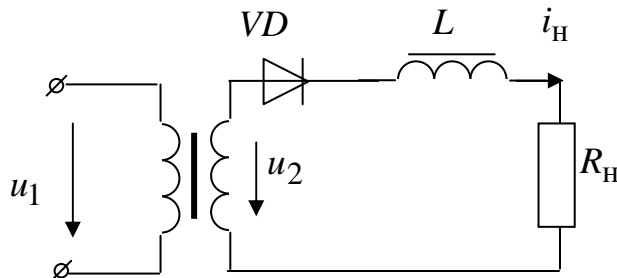


Рис. 2.2.4

Принцип действия индуктивного электрического фильтра основан на создании в обмотке дросселя L (индуктивная катушка с ферромагнитным сердечником), включенного последовательно в электрическую цепь нагрузки R_H , противо-ЭДС самоиндукции, препятствующей изменению тока в электрической цепи. Уменьшение относительных изменений переменной составляющей тока в электрической цепи вызывает уменьшение относительных изменений пульсаций напряжения на нагрузке.

Для лучшего сглаживания пульсаций необходимо, чтобы индуктивное сопротивление дросселя было значительно больше, чем сопро-

тивление нагрузки. Так как дроссель и последовательно включенная с ним нагрузка образует для переменной составляющей делитель напряжения, то при выполнении данного условия переменное напряжение на зажимах нагрузки будет значительно меньше, чем напряжение на зажимах дросселя. Активное сопротивление дросселя обычно намного меньше сопротивления нагрузки, поэтому активным падением напряжения на дросселе можно пренебречь и считать, что постоянная составляющая напряжения на входе электрического фильтра равна постоянной составляющей на его выходе.

Основными недостатками индуктивных электрических фильтров являются изменение сглаживающего действия при изменении электрического тока нагрузки и возможность появления перенапряжений в схеме при обрыве электрической цепи нагрузки или резком уменьшении тока в электрической цепи за счет электродвижущей силы самоиндукции дросселя.

Многосвязные электрические фильтры применяют тогда, когда с помощью односвязных фильтров не удастся достичь необходимых коэффициентов сглаживания. Эти электрические фильтры, являясь более сложными, обеспечивают значительно большее уменьшение коэффициента пульсаций. Простейшими многосвязными электрическими фильтрами являются Г-образные (рисунок 2.2.5) и П-образные (рисунок 2.2.6) электрические фильтры.

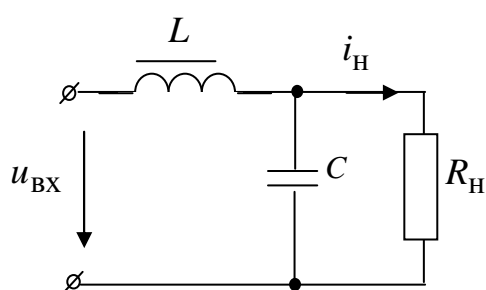


Рис. 2.2.5

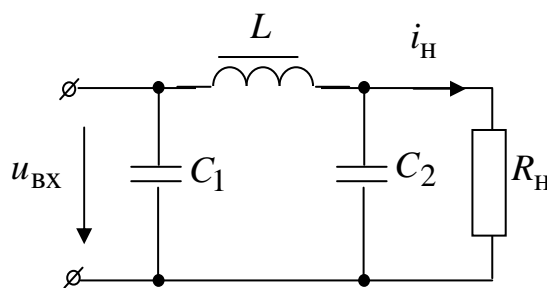


Рис. 2.2.6

Снижение пульсаций Г-образным электрическим фильтром объясняется совместным действием индуктивной катушки L и конденсатора C . Снижение переменных составляющих выпрямленного напряжения обусловлено как сглаживающим действием конденсатора, так и значительным падением переменных составляющих напряжения на индуктивной катушке. В то же время постоянная составляющая напряжения на нагрузочном резисторе $R_{Н}$ практически не уменьшается, так как

практически отсутствует падение напряжения этой составляющей на дросселе.

Π-образный электрический фильтр (рисунок 2.2.6), состоит из емкостного фильтра C_1 и Г-образного LC -фильтра (L, C_2). Коэффициент сглаживания многозвенных электрических фильтров равен произведению коэффициентов сглаживания составных фильтров (звеньев). Поэтому коэффициент сглаживания Π-образного электрического фильтра

$$q_{\Pi} = q_C q_{\Gamma},$$

где q_C, q_{Γ} – коэффициенты сглаживания С-фильтра и Г-образного фильтра, соответственно.

Π-образные электрические фильтры целесообразно применять, если коэффициент сглаживания должен быть равен $100 \div 1000$ и более. Но такой высокий коэффициент достигается за счет ухудшения таких параметров выпрямителя, как габариты, масса и стоимость.

Резонансные фильтры применяют при необходимости фильтрации напряжения выпрямителя от определенных гармоник. Достоинствами таких электрических фильтров является их большая компактность и меньшая стоимость по сравнению с обычными LC -фильтрами.

По принципу действия резонансные электрические фильтры делятся на два типа:

- фильтры-пробки – электрические фильтры, действие которых основано на резонансе токов (рисунок 2.2.7);
- режекторные фильтры – электрические фильтры, действие которых основано на резонансе напряжений (рисунок 2.2.8).

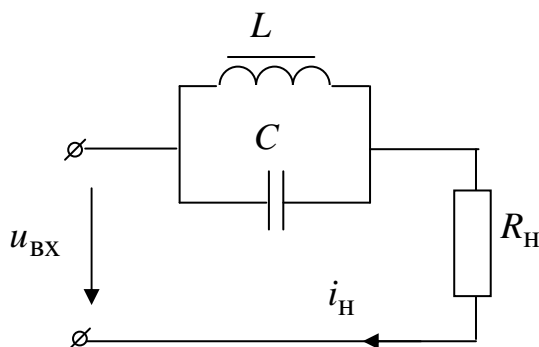


Рис. 2.2.7

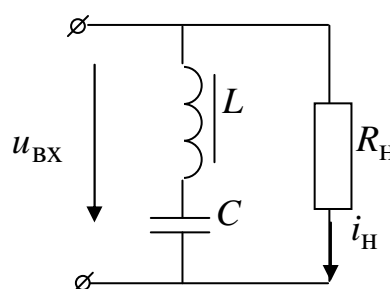


Рис. 2.2.8

Фильтры-пробки обычно используются вместо дросселя в LC -фильтре. Например, если такой электрический фильтр настроить на резонанс токов для третьей гармоники, то его сопротивление для этой гармоники будет очень большим (в идеале – бесконечно большим), а

постоянная составляющая тока пройдет через дроссель L , практически не встречая сопротивления. Применяя цепочку фильтров-пробок, настроенных каждая в резонанс на определенную гармонику, можно осуществить фильтрацию нескольких гармоник.

Режекторные фильтры (рисунок 2.2.8) обычно используются в Г-образных фильтрах вместо конденсатора для фильтрации определенной гармоники. Если такой электрический фильтр настроить на резонанс напряжений, например, для пятой гармоники, то для нее сопротивление режекторного фильтра будет очень мало, и практически весь ток пятой гармоники пройдет через фильтр, а постоянная составляющая потечет в нагрузочный резистор R_H .

К недостаткам резонансных электрических фильтров можно отнести необходимость индивидуальной настройки каждого фильтра и снижение коэффициента фильтрации при изменении частоты внешнего источника питания.

2.3. Управляемые выпрямители

Рассмотренные ранее выпрямители являлись нерегулируемыми, так как величина выходного постоянного напряжения однозначно определялась входным напряжением выпрямителя.

Управляемые выпрямители позволяют регулировать выходное напряжение. Они, как правило, строятся на управляемых тиристорах. Все рассмотренные ранее схемы выпрямления могут быть построены на тиристорах.

Для примера рассмотрим схему однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой, выполненного на тиристорах $VS1$ и $VS2$ (рисунок 2.3.1).

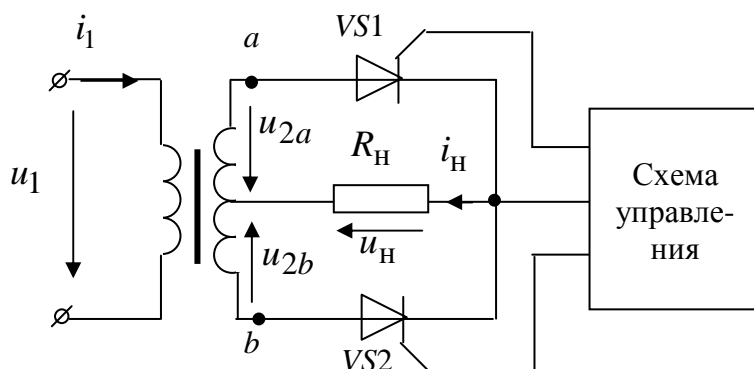


Рис. 2.3.1

Если импульсы управления подаются сразу после появления на тиристорах положительных напряжений, то схема будет работать точно также как схема на диодах (рисунок 2.1.2.4).

Режим работы выпрямителя в общем случае зависит от значения параметров электрической цепи нагрузки. Наиболее часто встречаются два случая. Схема замещения может содержать либо резистивный элемент с сопротивлением R_H , либо последовательное соединение резистивного R_H и индуктивного L_H элементов.

Для упрощения примем, что трансформатор с числом витков первичной w_1 и половины вторичной обмоток w_2 – идеальный.

Рассмотрим работу схемы при угле управления α и отсутствии в электрической цепи нагрузки индуктивности. Угол $\alpha = \omega t_{\text{вкл}}$ называют углом управления. Предположим, что, начиная с момента $\omega t = 0$, оба тиристора выключены. При этом электрический потенциал точки a положителен, а электрический потенциал точки b – отрицателен. В момент времени $\omega t = \alpha$ система управления подает на управляющий электрод тиристора $VS1$ импульс управляющего тока i_{y1} (рисунок 2.3.2). Тиристор включается и в нагрузке R_H течет ток i_H под действием напряжения u_{2a} (рис. 2.3.2).

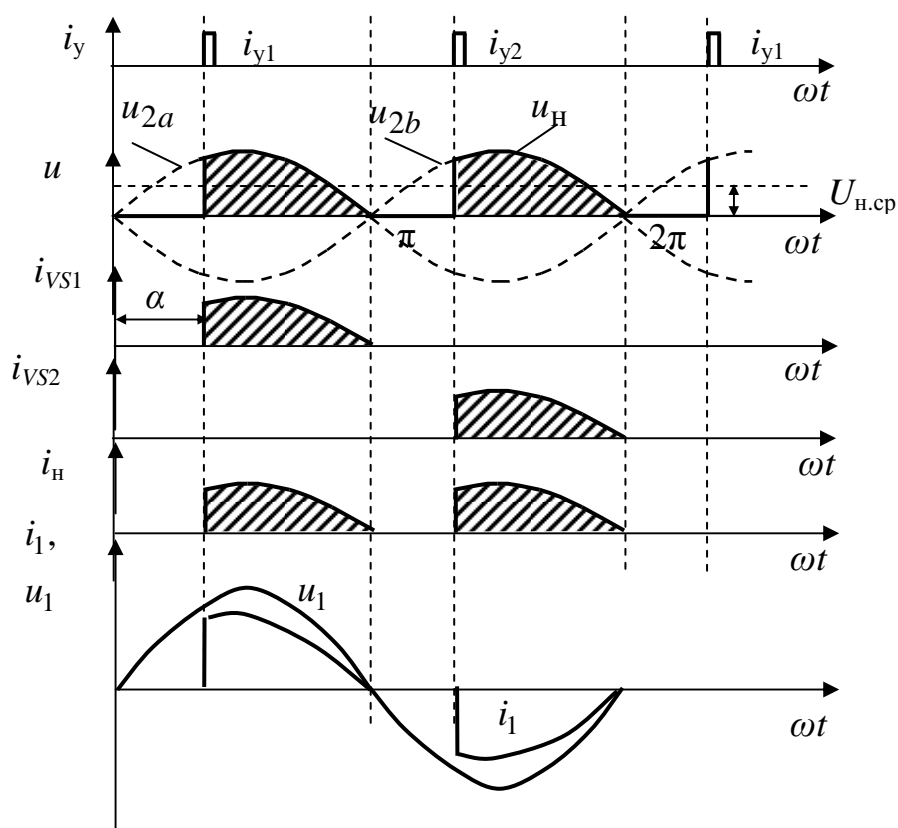


Рис. 2.3.2

Тиристор $VS1$ выключится в момент времени $\omega t = \pi$. Так как через половину периода полярность напряжения на вторичной обмотке трансформатора изменяется на противоположную, то, при подаче управляющего импульса на тиристор $VS2$, в момент времени $\omega t = \pi + \alpha$ он включится. Затем указанные процессы повторяются в каждом периоде.

На рисунке 2.3.2 представлены временные диаграммы напряжений и токов при активной нагрузке R_H для произвольного значения угла регулирования α , определяемого положением отпирающих импульсов тока управляемых вентилях (тиристорах) i_{y1} и i_{y2} .

При угле управления $\alpha \leq \pi$ ток в первичной обмотке трансформатора

$$i_1 = (i_{VS1} - i_{VS2}) \frac{w_2}{w_1},$$

где i_{VS1}, i_{VS2} – токи, текущие через соответствующие тиристоры, в отличие от получающегося в электрической цепи на рисунке 2.1.2.3, не синусоидальный (рисунок 2.3.2), а ток в электрической цепи нагрузки представляет собой последовательность импульсов.

Возможность осуществлять задержку по фазе моментов включения тиристоров на определенный угол позволяет изменять выходное напряжение, то есть, при необходимости его стабилизировать. Угол управления α отсчитывается относительно моментов естественной коммутации тиристоров (при изменении полярности напряжения когда $\omega t = \pi, 2\pi, 3\pi \dots$).

Из рисунка 2.3.2 видно, что с увеличением угла управления α среднее значение выходного напряжения выпрямителя будет уменьшаться. Аналитически эта зависимость может быть выражена следующей формулой

$$U_{н.ср} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} (1 + \cos \alpha).$$

Угол управления α оказывает существенное влияние на установленные мощности основных элементов схемы выпрямителя. Поэтому расчетные мощности обмоток и типовую мощность трансформатора определяют, исходя из условий неуправляемого режима как наиболее тяжелого.

Наличие индуктивности в электрической цепи нагрузки (рисунок 2.3.3) изменяет характер процесса в выпрямителе. После открывания

тиристора $VS1$ или $VS2$ ток в нем и в электрической цепи нагрузки плавно увеличивается и в магнитном поле индуктивного элемента запасается энергия. За счет этой энергии ток в соответствующем тиристоре и в электрической цепи нагрузки не уменьшится до нуля при изменении полярности питающего напряжения. Интервалы открытого состояния тиристоров тем больше, чем больше индуктивность нагрузки L_H . При некотором значении индуктивности ток в электрической цепи становится непрерывным, а при индуктивности нагрузки L_H стремящейся к бесконечности – постоянным. Переключение тиристоров при принятых допущениях (трансформатор – идеальный, диоды – идеальные ключи) происходит мгновенно.

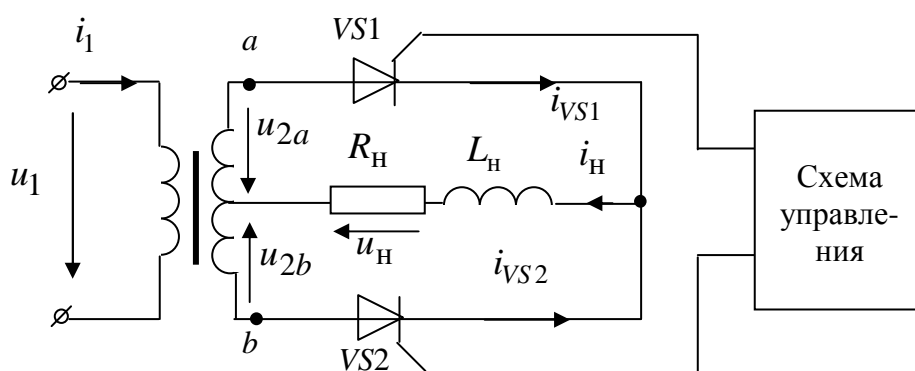


Рис. 2.3.3

Пусть индуктивность нагрузки L_H стремится к бесконечности, и к моменту времени $t=0$ тиристор $VS1$ был закрыт, а тиристор $VS2$ – открыт.

Импульс тока управления i_{y1} открывает тиристор $VS1$ и напряжение на нем становится равным нулю. При угле управления $\alpha < 180^\circ$ напряжение на тиристоре $VS2$ становится отрицательным ($u_{VS2} = u_{2b} - u_{2a} < 0$), что приводит к его закрыванию. При этом положительное напряжение u_{2a} определяет ток в открытом тиристоре $VS1$ и в электрической цепи нагрузки.

Через половину периода под действием импульса тока i_{y2} откроется тиристор $VS2$, при этом напряжение на тиристоре $VS1$ станет отрицательным ($u_{VS1} = u_{2a} - u_{2b} < 0$) и он закроется. Далее процесс переключения тиристоров повторяется, и токи в них i_{VS1} и i_{VS2} представляют собой последовательность прямоугольных импульсов, при этом ток в нагрузке будет постоянным $i_H = i_{VS1} + i_{VS2} = I_{H,ср}$ (рисунок 2.3.4). Ток в

первичной обмотке трансформатора $i_1 = (i_{VS1} - i_{VS2}) \frac{w_2}{w_1}$ получается в виде прямоугольных разнополярных импульсов с амплитудой $\frac{w_2}{w_1} I_{H.c.p}$ (рисунок 2.3.4).

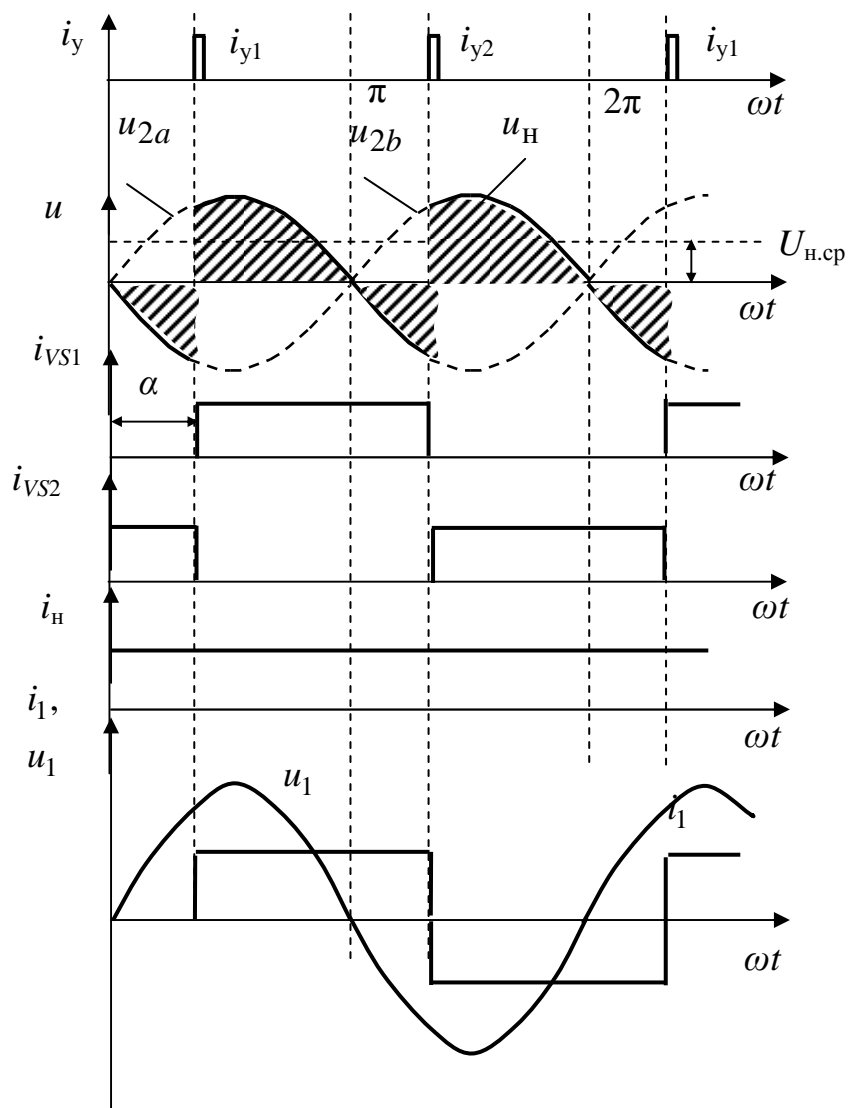


Рис. 2.3.4

Принцип работы однофазной мостовой схемы, построенной на тиристорах (рисунок 2.3.5), аналогичен схеме на диодах: каждые половины периода работают по два тиристора. При работе схемы с углом управления α на активную нагрузку диаграммы токов и напряжений на элементах схемы будут такими же, как для однофазной схемы выпрямления со средней точкой (рисунок 2.3.1).

Диаграммы токов и напряжений при работе схемы на активно-индуктивную нагрузку с углом управления α показаны на рисунке 2.3.6, где i_{VS1} , i_{VS3} – токи, текущие через тиристоры VS1 и VS3 при подаче управляющего сигнала в положительный полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора u_2 ; i_{VS2} , i_{VS4} – токи, текущие через тиристоры VS2 и VS4 при подаче управляющего сигнала в отрицательный полупериод напряжения u_2 .

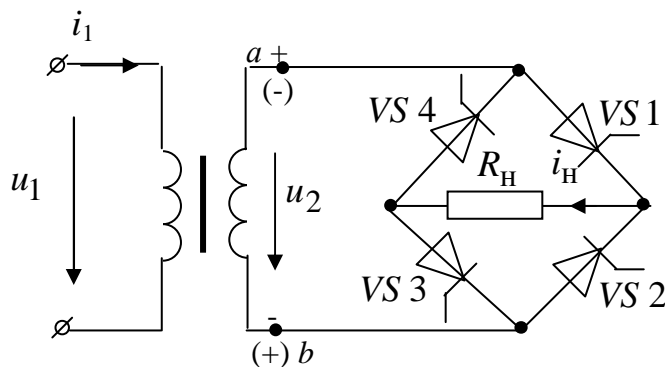


Рис. 2.3.5

Наличие индуктивности приводит к тому, что после прохождения напряжения на вторичной обмотке через нуль, через открытые тиристоры продолжает протекать ток за счет энергии, накопленной в индуктивности. Например, тиристоры VS1 и VS3 продолжают проводить ток и после того, как напряжение u_2 станет отрицательным (рисунок 2.3.6).

Но в данном примере энергии, накопленной в индуктивности, оказывается недостаточно для обеспечения протекания тока через тиристор в течение половины полупериода. В результате вентиль, проводящий этот ток, выключается раньше, чем будет подан отпирающий импульс на другой тиристор, то есть раньше момента, определяемого углом управления α (рисунок 2.3.6).

Сдвиг тока i_1 относительно напряжения u_2 на угол управления α также приводит к появлению в выпрямленном напряжении u_H отрицательных участков, что вызывает снижение его среднего значения $U_{H,ср}$ (рисунок 2.3.6).

Диаграммы напряжений трехфазного мостового выпрямителя, построенного на тиристорах, который работает на активную нагрузку, представлены на рисунке 2.3.7.

Управляющие импульсы на тиристоры поступают с задержкой на угол управления α относительно момента пересечения фазных напряжений (точек естественной коммутации). В результате задержки моментов коммутации тиристоров среднее значение выпрямленного напряжения $U_{н.ср}$, образованного из соответствующих частей линейных напряжений, уменьшается.

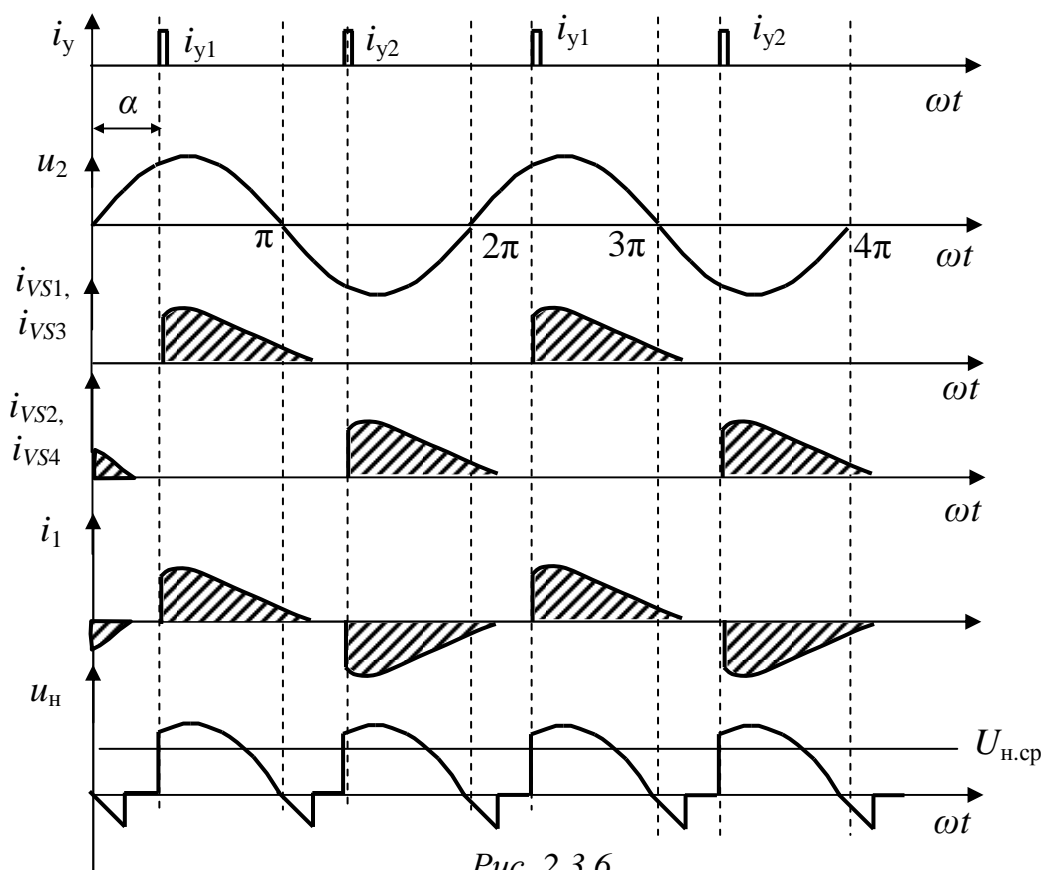


Рис. 2.3.6

При угле управления находящегося в пределах $0 < \alpha < \frac{\pi}{3}$ среднее значение выпрямленного напряжения для активной и активно-индуктивной нагрузки описывается формулой

$$U_{н.ср} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \cos \alpha.$$

При углах управления $\alpha > \frac{\pi}{3}$, начиная с угла управления $\alpha = \frac{\pi}{3}$, среднее выпрямленное напряжение рассчитывается по формуле

$$U_{\text{н.ср}} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 (1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)).$$

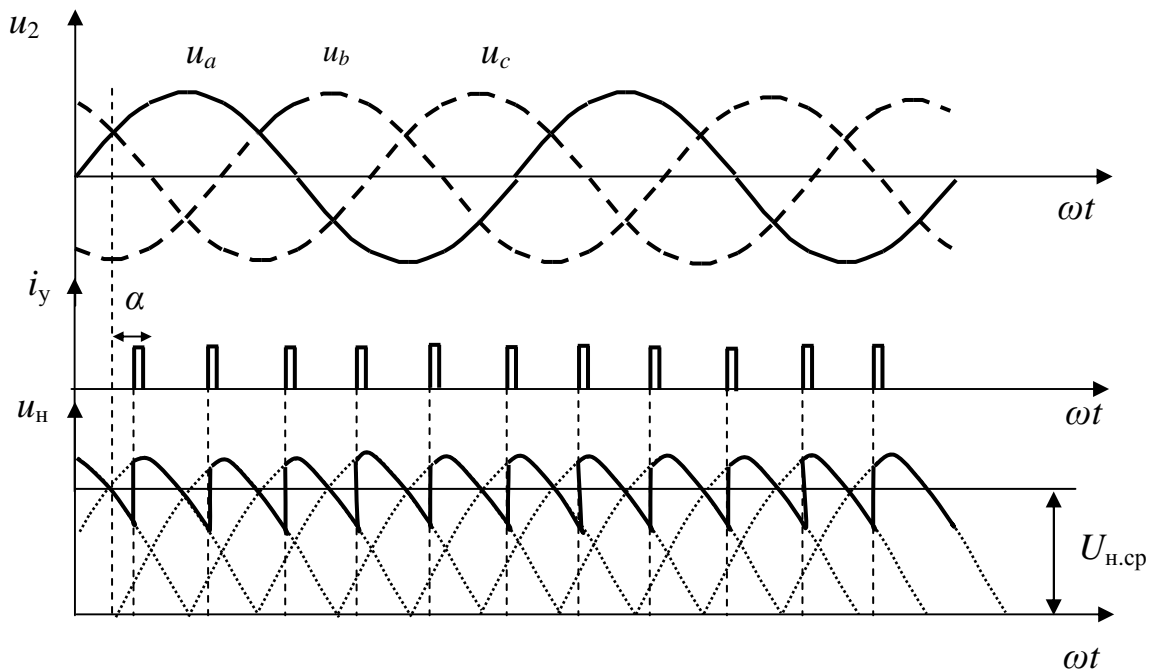


Рис. 2.3.7

2.4. Области применения выпрямителей

Благодаря возможности регулирования выпрямленного напряжения и обмена активной мощностью между электрическими цепями переменного и постоянного тока управляемые выпрямители широко используются в электроприводах постоянного тока. Рассмотрим принцип действия реверсного управления электрическим двигателем постоянного тока с «электрическим» торможением. Типичная схема такого электрического привода с якорным управлением частоты вращения приведена на рисунке 2.4.1.

Предположим, что электродвигатель работает в установившемся режиме и питается от цепи переменного тока через выпрямитель. Для эффективного и быстрого торможения необходимо перевести выпрямитель в инверторный режим. При этом энергия, накопленная во вращающихся частях привода, обеспечивает работу двигателя в генераторном режиме с инвертированием генерируемого постоянного тока в сеть переменного тока. Для перевода выпрямителя в инверторный режим достаточно переключить контакторы (K_1 – замкнуто, K_2 – разомкнуто) и перевести углы управления тиристорами в область $\alpha > \pi/2$.

Такой режим работы называется режимом рекуперации. Широкое применение рекуперативное торможение находит в электротранспорте. Для бесконтактного осуществления режима рекуперации и реверса обычно используются два вентильных комплекта, подключенных встречно-параллельно.

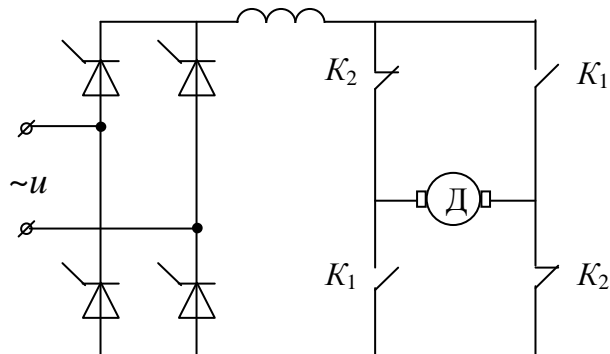


Рис. 2.4.1

На рисунке 2.4.2 показан **преобразователь выпрямительно-инверторный** ВИП-5600 УХЛ2 для магистральных электровозов ВЛ65.

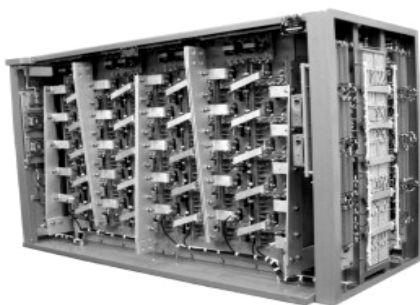


Рис. 2.4.2

Преобразователь предназначен для выпрямления однофазного переменного тока частотой 50 Гц в постоянный в цепи питания тяговых электрических двигателей в режиме тяги и преобразования постоянного тока в однофазный переменный ток частотой 50 Гц в режиме рекуперативного торможения электровозов переменного тока.

Другой широкой областью применения постоянного тока является электротехнология, например электролизные установки для производства цветных металлов. Обычно электролизные установки представляют собой группы последовательно соединенных электролизных ванн, напряжение каждой из которых составляет от 3 В до 7 В.

Группы электролизных ванн питаются от **выпрямительных подстанций**, токовая нагрузка которых может достигать сотен тысяч ампер. В качестве выпрямительных агрегатов применяют полупроводниковые выпрямители серий ВАК, ВАКР, В-ППД, В-ТПВД, ВГ-ТПЕ, ВГ-ТПВ и так далее. Мощность отдельных полупроводниковых преобразователей достигает 120000 кВА. Напряжение питания составляет 0,38; 6; 10 и 35 кВ.

На рисунке 2.4.3 представлен внешний вид выпрямительного шкафа, предназначенного для питания электролизных и гальванических ванн. Кроме того, выпрямители могут использоваться для питания станков электрохимической обработки металлов, установок сточных вод и другого технологического оборудования.



Рис. 2.4.3

Весьма распространенным технологическим процессом является электрическая сварка. Дуговая сварка на постоянном токе имеет определенные технологические преимущества, что способствует расширению областей ее применения. Источник питания электросварочного агрегата на постоянном токе состоит из сварочного трансформатора, выпрямителя и иногда дросселя, включаемого в цепь постоянного тока.

В сварочных выпрямителях используются однофазные и трехфазные схемы выпрямления. Более распространена трехфазная мостовая схема, обеспечивающая устойчивость сварочной дуги, а также равномерную загрузку всех фаз питающей сети. Напряжение питания источников электросварки – 380/220 В, потребляемая мощность – от 5 до 40 кВА.

Выпрямители сварочные универсальные (рисунок 2.4.4) используются для комплектации сварочных и наплавочных полуавтоматов и автоматов, а также ручной дуговой сварки, резки и воздушно-дуговой сварки угольным электродом. Выпрямители обеспечивают плавное регулирование и стабилизацию сварочного тока и напряжения на дуге, ос-

нащены светодиодной индикацией тепловой перегрузки и правильности подключения фаз питающей сети.



Рис. 2.4.4

Машины контактной сварки многоэлектродные (рисунок 2.4.5) применяются в самых разнообразных производствах: в производстве различных железобетонных конструкций в крупнопанельном домостроении, автомобильном производстве, обеспечивают высокое качество сварки и высокую производительность технологического процесса. С помощью управляемых выпрямителей в этих установках обеспечивается стабилизация сварочного тока при изменении напряжения сети, ступенчато-плавная (фазовая) регулировка сварочного тока, дискретное регулирование позиций сварочного цикла и так далее.

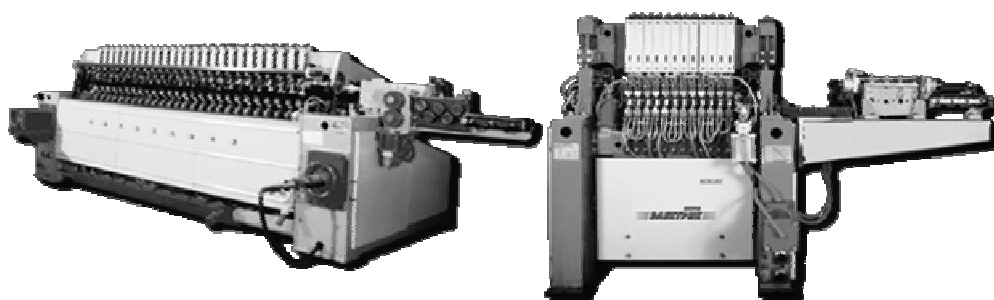


Рис. 2.4.5

Одной из самых известных областей применения является использование выпрямителей для зарядки аккумуляторных батарей и запуска двигателей автомобилей и сельхозтехники. Малогабаритные экономичные **зарядные и пускозарядные выпрямители** предназначены для зарядки аккумуляторных батарей емкостью от 55 до 220 А/ч напряжением 12 В или 24 В всех типов автомобилей и тракторов, а также для запуска двигателей в зимних условиях (рисунок 2.4.6).

Экономичное транспортирование электроэнергии на большие расстояния позволяют осуществлять линии электропередач постоянного тока. Преимуществами постоянного тока являются: большая пропуск-

ная способность линии, меньшие капитальные затраты, меньшие потери энергии, возможность несинхронной работы системы.

Для построения линии электропередачи постоянного тока необходимы две преобразовательные подстанции: первая подстанция – для выпрямления первичного напряжения переменного тока, а вторая подстанция – для инвертирования полученной электроэнергии в приемную сеть переменного тока.



Рис. 2.4.6

Преобразовательные подстанции на различные диапазоны мощностей энергосистем могут быть построены на основе мощных полупроводниковых вентилей, соединенных последовательно-параллельными группами.

Широко применяются полупроводниковые выпрямители в системах возбуждения синхронных машин. Конструктивно такие выпрямители могут выполняться как стационарные, питаемые от возбудителей, так и вращающиеся, устанавливаемые на ротор возбудителя. В последнем случае системы возбуждения получают бесконтактные.

3. Инверторы

Инвертор – это электротехническое устройство, преобразующее энергию постоянного тока в энергию переменного тока. Термин «инвертирование» происходит от латинского слова *inversion* – переворачивание, перестановка. Этот термин в преобразовательной технике применен для обозначения процесса, обратного выпрямлению, при котором поток энергии от источника постоянного тока поступает к потребителям переменного тока.

Общий вид исполнения силового инвертора представлен на рисунке 3.1.

Различают два типа инверторов: инверторы, ведомые сетью (зависимые инверторы) и автономные инверторы. Первые служат для передачи энергии в сеть переменного тока заданной частоты, которая и определяет необходимую частоту преобразования. Вторые служат

для питания автономных приемников, а частота преобразования задается системой управления инвертором.



Рис. 3.1

3.1. Инверторы, ведомые сетью

Инверторный режим управляемого выпрямителя возможен только в тех преобразователях, у которых в электрической цепи нагрузки имеется либо источник электродвижущей силы, либо индуктивность, либо то и другое.

Принцип действия *инвертора, ведомого сетью*, рассмотрим на примере однофазной схемы со средней точкой, представленной на рисунке 3.1.1.

Для передачи электроэнергии, вырабатываемой источником электродвижущей силы E в сеть переменного тока необходимо, чтобы ток i_1 и напряжение u_1 находились в противофазе, то есть угол управления $\alpha = 180^\circ$. Подобный сдвиг фаз возможен, если тиристор $VS2$ будет открыт при отрицательной полярности напряжения u_{2b} , а тиристор $VS1$ – при отрицательной полярности напряжения u_{2a} . При этом происходит поочередное подключение вторичных обмоток трансформатора к источнику электродвижущей силы E .

Однако если отпирать очередной тиристор точно при угле управления $\alpha = \pi$ (рисунок 3.1.2, а), то при этом другой тиристор не успеет закрыться, так как для этого ему нужно время $t_{\text{выкл}}$.

За время $t_{\text{ВЫКЛ}}$ запирающий тиристор создаст короткое замыкание по электрической цепи: вторичная обмотка трансформатора – источник электродвижущей силы E . Указанное явление называют срывом инвертирования или опрокидыванием инвертора.

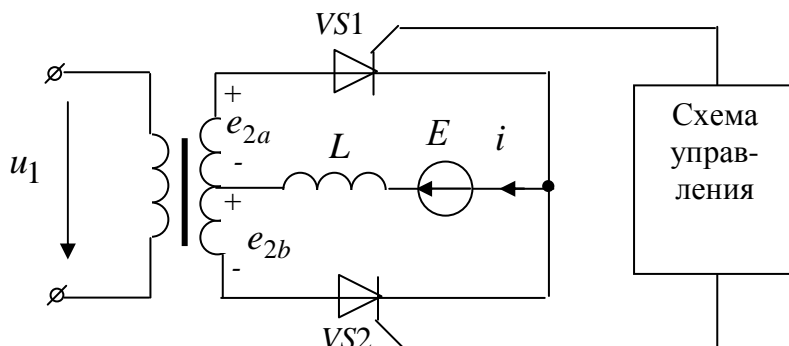


Рис. 3.1.1

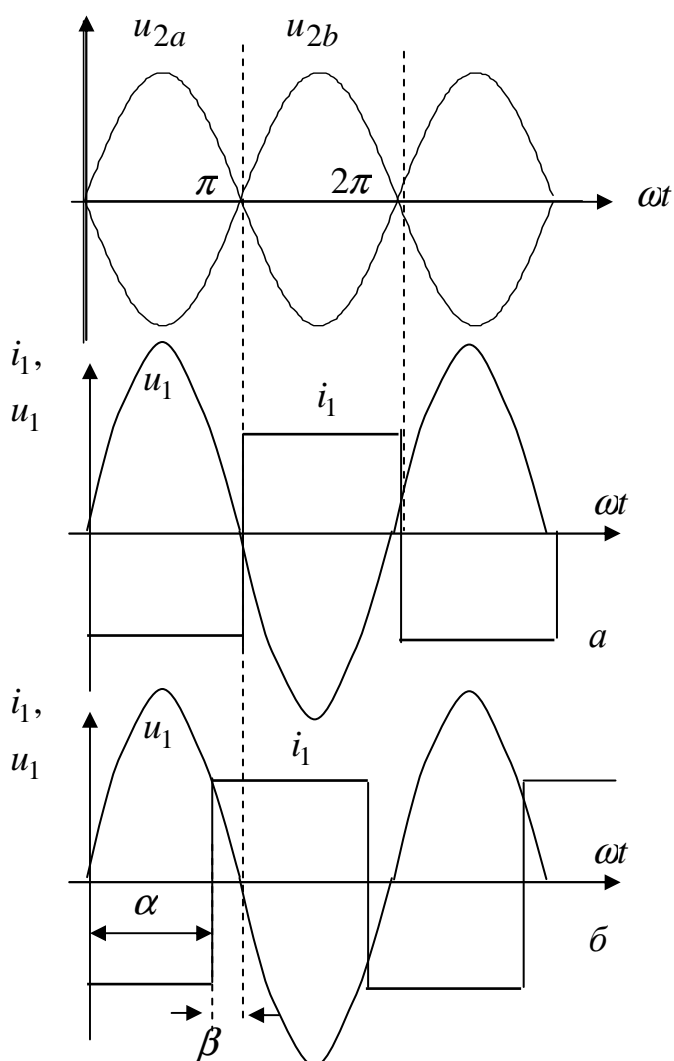


Рис. 3.1.2

Чтобы устранить это явление, необходимо сделать угол управления $\alpha < \pi$. Для этого вводится понятие угла опережения β (рисунок 3.1.2, б), который равен $\beta = \pi - \alpha$. Ток в электрической цепи состоит из разнополярных прямоугольных импульсов из-за наличия индуктивности в схеме, которая препятствует изменению тока. Запирание и отпирание тиристорov происходит под воздействием напряжения вторичной обмотки трансформатора, создаваемого сетью переменного тока. Поэтому такой инвертор называется ведомым сетью.

Рассмотрим более подробно работу инвертора (рисунок 3.1.1). В мо-

мент времени $\omega t = 0$ полярность электродвижущей силы $e_{2a} = u_{2a}$ и $e_{2b} = u_{2b}$ на вторичной обмотке трансформатора указана на рисунке 3.1.1. Пусть в момент времени $\omega t = 0$ система управления включает тиристор $VS2$. Тогда в электрической цепи источника электродвижущей силы E потечет ток через нижнюю половину вторичной обмотки трансформатора, преодолевая при этом противо-ЭДС этой полуобмотки e_{2b} . Тиристор $VS1$ в это время должен быть закрыт, так как в его электрической цепи электродвижущая сила источника E и e_{2a} включены согласно, и, если тиристор $VS1$ открыть, то произойдет короткое замыкание. Система управления включает тиристор $VS1$ в момент $(\pi - \beta)$, когда электродвижущая сила e_{2a} мала. Ток источника E , стремясь пройти по пути наименьшего сопротивления, перейдет из электрической цепи тиристора $VS2$ в электрическую цепь тиристора $VS1$, где не только нет противо-ЭДС, но есть согласно включенная электродвижущая сила e_{2a} , при этом тиристор $VS2$ закроется, так как ток в нем станет равным нулю. Перевести ток с тиристора $VS2$ на тиристор $VS1$ необходимо, так как при угле π полярность электродвижущей силы e_{2b} меняется и e_{2b} становится согласно включенной по отношению к электродвижущей силе E и, если до угла π не выключить тиристор $VS2$, то в этой электрической цепи начнется короткое замыкание. При открывании тиристора $VS1$, ток переходит в электрическую цепь верхней полуобмотки трансформатора, и, электродвижущая сила e_{2a} из согласно включенной становится противо-ЭДС для источника электродвижущей силы E , и ток будет протекать по верхней полуобмотке трансформатора, преодолевая противо-ЭДС e_{2a} .

Поток энергии на интервалах, где ток источника E преодолевает противо-ЭДС вторичной обмотки трансформатора, направлен из источника постоянного тока E в сеть переменного тока, то есть происходит инвертирование энергии.

Выпрямитель может работать в режиме инвертора и без источника постоянного тока. Рассмотрим работу однофазной схемы преобразователя со средней точкой с активно-индуктивной нагрузкой (рисунок 2.3.3).

В выпрямительном режиме с ростом угла управления α точка переключения вентиля смещается вправо, при этом среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается. С переходом кривой напряжения через нуль проводящий тиристор не закрывается за счет энергии, накопленной в магнитном поле индуктивности L_H , обеспечивающей

идеально сглаженный ток нагрузки i_H (смотри рисунок 2.3.4). Очевидно, что при угле управления $\alpha = \frac{\pi}{2}$ положительная часть выпрямленного напряжения становится равной отрицательной: среднее значение или постоянная составляющая напряжения на нагрузке будет равна нулю.

При угле управления $\alpha > \frac{\pi}{2}$ среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке меняет знак, и выпрямитель переходит в инверторный режим. В этом режиме большую часть работы электрический ток i_1 направлен против напряжения u_1 и активная мощность из электрической цепи нагрузки передается в источник переменного тока (рисунок 3.1.3).

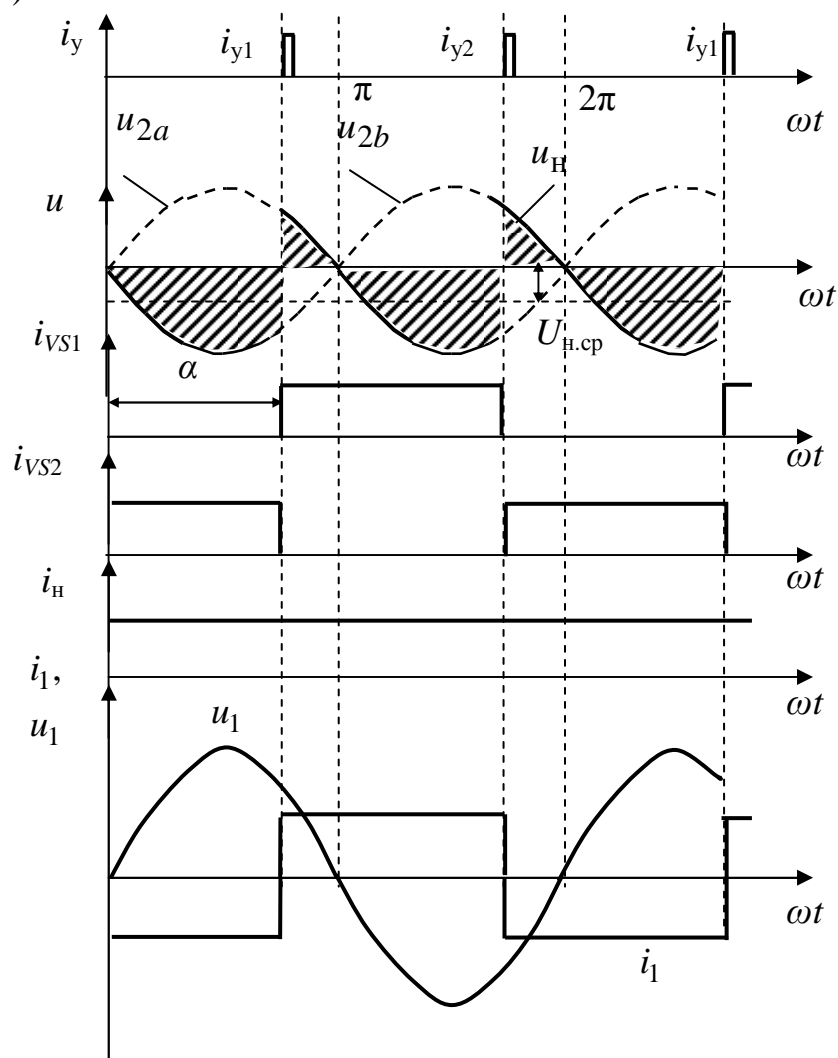


Рис. 3.1.3

Принцип действия более сложных инверторов, в том числе трехфазных, такой же, как и рассмотренного однофазного.

3.2. Автономные инверторы

В отличие от зависимых инверторов, которые не могут работать без сети переменного тока, **автономные инверторы** могут работать независимо.

Простейшая схема автономного инвертора изображена на рисунке 3.2.1. Она представляет собой мост, выполненный на ключах K_1 , K_2 , K_3 , K_4 . В одну диагональ моста включена нагрузка Z_H , в другую – постоянный источник питания $U_{\text{пит}}$. В точке $t=0$ замкнем ключи K_1 и K_3 , при этом через нагрузку потечет ток, а полярность напряжения на нагрузке показана на рисунке 3.2.1 без скобок. Если через половину периода разомкнуть ключи K_1 и K_3 и замкнуть ключи K_2 и K_4 , то полярность напряжения на нагрузке u_H изменится на противоположную (указана на рисунке 3.2.1 в скобках). Таким образом, замыкая и размыкая ключи через равные промежутки времени, можно получить в нагрузке переменное напряжение прямоугольной формы с амплитудой, равной напряжению источника питания и с частотой, которая определяется частотой переключения ключей (рисунок 3.2.2).

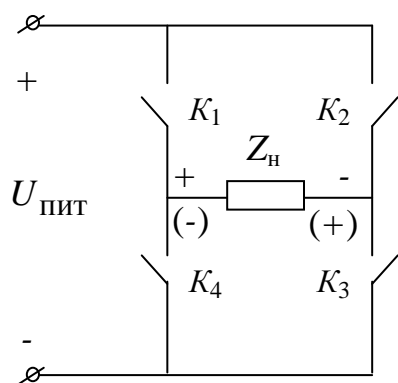


Рис. 3.2.1

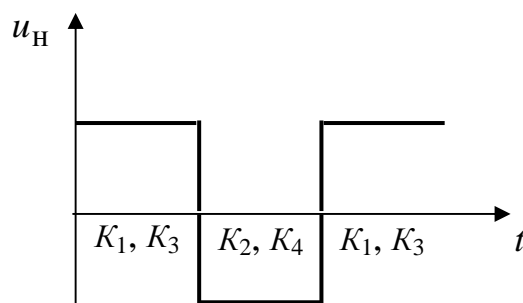


Рис. 3.2.2

В зависимости от характера протекания электромагнитных процессов автономные инверторы подразделяют на три типа: инверторы напряжения, инверторы тока и резонансные инверторы.

В инверторах напряжения источник питания работает в режиме источника напряжения, обладающего малым внутренним сопротивлением. Для этого параллельно источнику питания включается конденсатор

большой емкости, который практически исключает пульсации напряжения при коммутации тиристоров. При этом напряжение на нагрузке имеет прямоугольную форму, а форма кривой тока близка к синусоидальной и зависит от параметров нагрузки (рисунок 3.2.3, а). В этом инверторе нагрузка должна быть активной или активно-индуктивной.

Инверторы напряжения характеризуются относительной стабильностью выходного напряжения при изменении выходной частоты в широких пределах, и имеют жесткую внешнюю характеристику (рисунок 3.2.3, г). Коммутационные процессы в них мало влияют на форму кривой выходного напряжения, а установленная мощность коммутирующих элементов сравнительно небольшая.

Инверторы тока работают в режиме источника тока, что достигается включением в электрическую цепь дросселя с большой индуктивностью. При этом ток в нагрузке имеет прямоугольную форму, а напряжение близко к синусоидальному и зависит от параметров нагрузки (рисунок 3.2.3, б). Внешняя характеристика инверторов тока имеет падающий характер (рисунок 3.2.3, д).

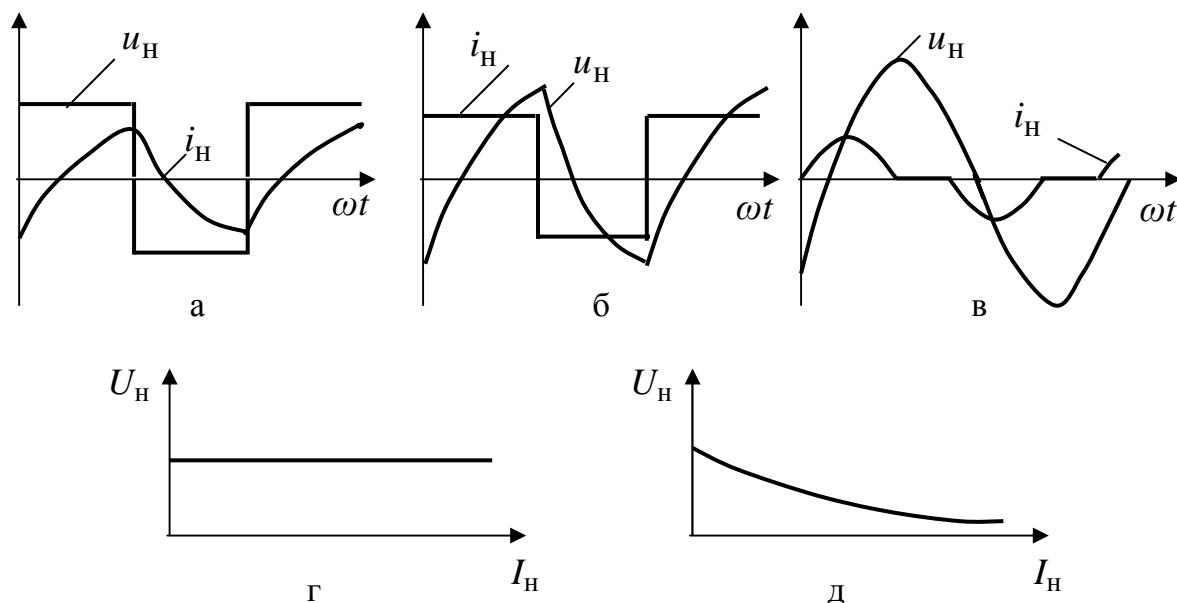


Рис. 3.2.3

В резонансных инверторах нагрузка, имеющая, как правило, значительную индуктивность, образует с реактивными элементами инвертора колебательный контур, в котором наблюдается резонанс напряжений. Они имеют близкие к синусоидальной форме кривые напряжения и тока в нагрузке (рисунок 3.2.3, в), то есть резонансные инверторы могут работать в режимах источника напряжения или источника тока. Собст-

венная частота контура в резонансных инверторах должна быть выше или равна рабочей частоте инвертора.

Автономные инверторы применяют в тех случаях, когда необходимо:

1) иметь переменный ток требуемой частоты, когда источниками питания являются устройства прямого преобразования энергии, такие как топливные элементы, термо- и фотоэлектрические генераторы, контактная сеть электрического транспорта, аккумуляторы и так далее;

2) преобразовать постоянное напряжение одного значения в постоянное напряжение требуемого значения;

3) получить переменный ток высокой частоты для электротермических установок, с помощью которых плавят металлы.

Простейший инвертор тока изображен на рисунке 3.2.4. В электрическую цепь источника питания введена индуктивность L , которая и придает ему свойства источника тока (ток I постоянный по величине и не зависит от нагрузки). В электрическую цепь нагрузки включен конденсатор, емкость которого должна обеспечивать емкостной характер нагрузки. Это необходимо, так как в электрической цепи нагрузки ток I должен менять свое направление, оставаясь неизменным по величине, а это возможно только в электрической цепи с емкостным характером. Одновременно конденсатор C осуществляет функцию коммутации тиристоров. Рассмотрим работу этой схемы.

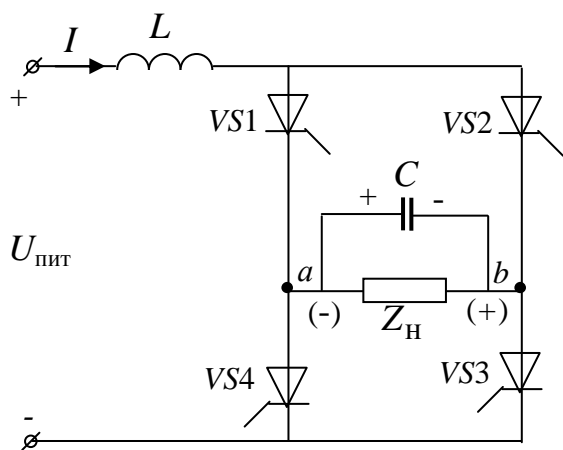


Рис. 3.2.4

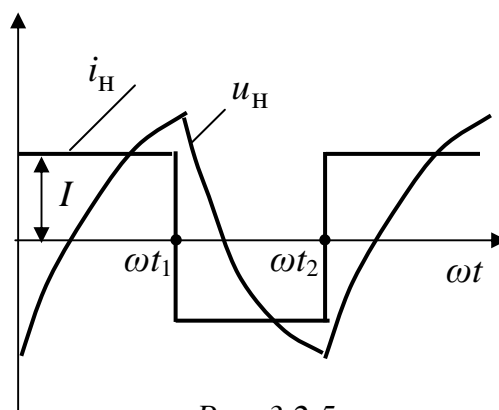


Рис. 3.2.5

В точке $\omega t = 0$ система управления, которая обязательно должна присутствовать в вентильном преобразователе, подает сигнал управления на тиристоры $VS1$ и $VS3$. Тиристоры открываются, и в электрической цепи нагрузки начинает протекать ток I от точки a к точке b . Часть этого тока идет на заряд конденсатора, а другая часть – в нагрузку

Z_H . В точке ωt_1 система управления открывает тиристоры $VS2$ и $VS4$, и в течение короткого промежутка времени будут открыты все четыре тиристора. Но как только откроется тиристор $VS4$, положительный электрический потенциал заряженного конденсатора оказывается приложенным через этот тиристор к катоду ранее открытого тиристора $VS3$, причем к аноду этого тиристора будет приложен отрицательный электрический потенциал конденсатора C . Поэтому тиристор $VS3$ закроется в момент ωt_1 . По этой же причине закроется тиристор $VS1$, так как положительный электрический потенциал конденсатора будет приложен к его катоду, а отрицательный – к его аноду через открытый тиристор $VS2$. Таким образом, на интервале от ωt_1 до ωt_2 работают тиристоры $S2$ и $VS4$, ток в цепи нагрузки направлен от точки b к точке a , а конденсатор перезаряжается до напряжения противоположной полярности (указана в скобках). В точке ωt_2 все процессы повторяются.

Ток в электрической цепи нагрузки имеет прямоугольную форму, а напряжение нагрузки изменяется, как напряжение на конденсаторе C (рисунок 3.2.5). Так как электрическая цепь нагрузки имеет емкостной характер, то ток в нагрузке опережает по фазе входное напряжение (рисунок 3.2.5). Рассмотренная схема представляет собой параллельный инвертор тока, так как конденсатор в ней включается параллельно нагрузке. Если конденсатор включить последовательно с нагрузкой, то инвертор будет называться последовательным инвертором тока.

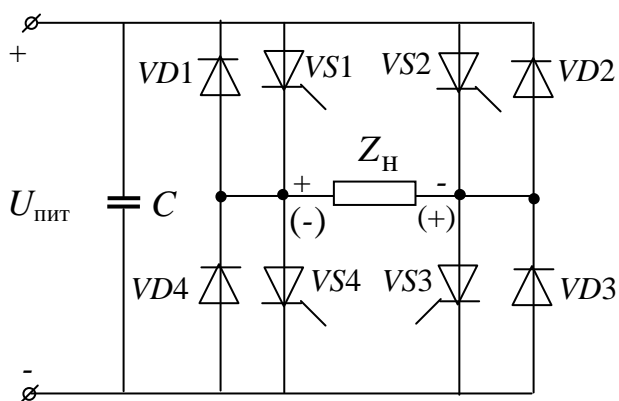


Рис. 3.2.6

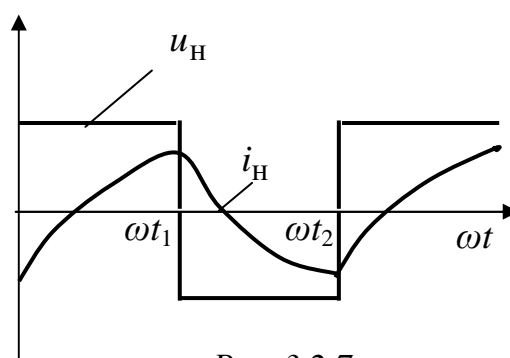


Рис. 3.2.7

Рассмотрим простейший однофазный инвертор напряжения (рисунок 3.2.6). При подаче управляющего сигнала тиристоры $VS1$ и $VS3$ открываются, и на нагрузке формируется прямоугольный импульс напряжения (рисунок 3.2.7) с амплитудой, равной напряжению питания $U_{\text{пит}}$ (если пренебречь падением напряжения в тиристорах). Полярность на-

пряжения на нагрузке показана на рисунке 3.2.6 (без скобок). При чисто активной нагрузке форма тока нагрузки и напряжения на нагрузке будут совпадать. Однако в большинстве случаев нагрузка носит активно-индуктивный характер, и в этом случае ток нагрузки будет нарастать по экспоненциальному закону (рисунок 3.2.7). В точке ωt_1 поступают сигналы управления, запирающие тиристоры $VS1$ и $VS3$ и отпирающие тиристоры $VS2$ и $VS4$. Поскольку ток i_H в индуктивности нагрузки не может измениться скачком, то он продолжает протекать в том же направлении, но уже не через тиристоры $VS1$ и $VS3$, а через диоды $VD4$ и $VD2$, которые включаются при выключении тиристоров $VS1$ и $VS3$ из-за возникновения противо-ЭДС в индуктивности нагрузки, превышающей напряжение источника питания $U_{\text{пит}}$.

Включение диодов $VD4$ и $VD2$ приводит к изменению знака напряжения на нагрузке на противоположное (полярность, указанная на рисунке 3.2.6 в скобках). Под воздействием встречного напряжения ток нагрузки i_H , протекающий через диоды $VD4$ и $VD2$ в источник питания, начинает уменьшаться также по экспоненциальному закону (рисунок 3.2.7).

При спадании тока i_H до нуля диоды $VD4$ и $VD2$ выключаются, и ток нагрузки начинают проводить тиристоры $VS2$ и $VS4$, на которые в момент ωt_1 был подан отпирающий сигнал. Далее аналогичные процессы повторяются. В промежуток времени, когда ток в нагрузке и напряжение противоположны по знаку, запасенная в нагрузке энергия возвращается в источник питания.

Таким образом, на нагрузке будет выделяться напряжение прямоугольной формы. Ток нагрузки будет иметь экспоненциальную форму, а значение его определится параметрами нагрузки. Ток через обратно включенные диоды $VD1 \div VD4$ будет протекать на интервалах, начала которых совпадают с моментами поступления управляющих сигналов, а длительность зависит от индуктивности нагрузки. Во время протекания тока через диоды $VD1 \div VD4$ происходит возврат энергии из нагрузки в источник постоянного тока. Отсутствие диодов в схеме приводило бы к появлению недопустимых перенапряжений на тиристорах.

Следует отметить, что в данной схеме вместо тиристоров можно использовать транзисторы в ключевом режиме.

4. Непосредственные преобразователи частоты

Для преобразования переменного напряжения одной частоты f_1 в переменное напряжение другой более низкой частоты $f_2 < f_1$ используют либо системы выпрямитель-инвертор с промежуточным звеном постоянного тока, либо непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией тока вентилей.

Преобразователи этого типа позволяют осуществить регулирование как выходного напряжения от нуля до максимального, так и частоты f_2 от нуля до примерно $0,7 f_1$. При этом регулирование напряжения и частоты может осуществляться независимо. Часто число фаз на входе непосредственного преобразователя частоты m_1 и на его выходе m_2 неодинаково ($m_1 > m_2$).

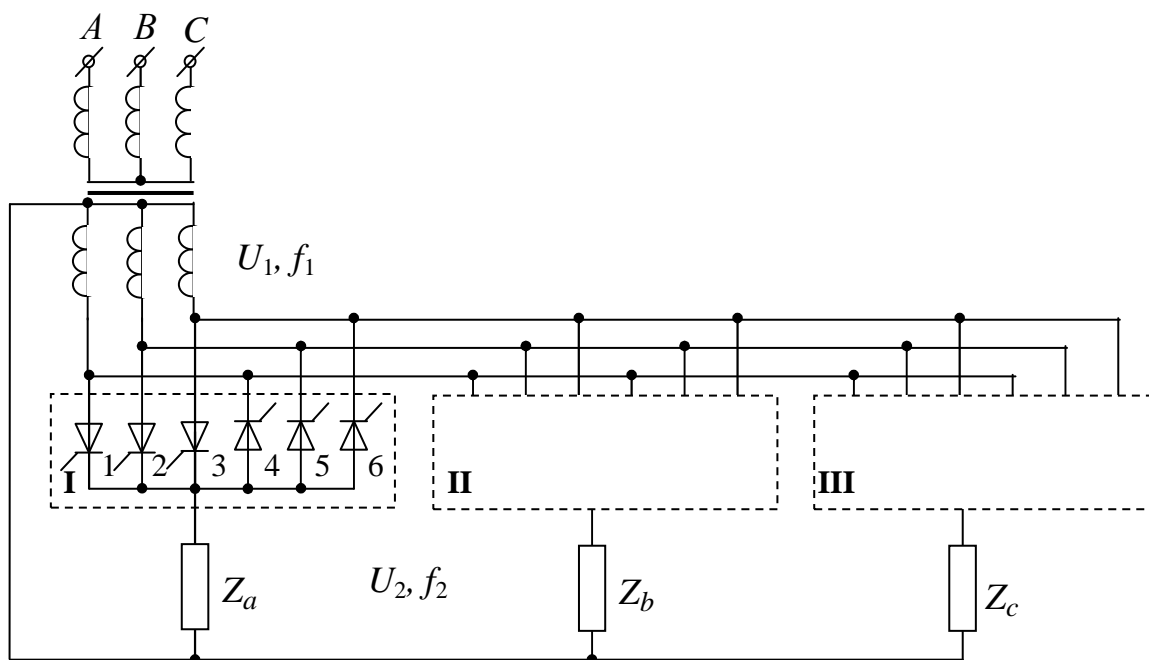


Рис. 4.1

Непосредственные преобразователи частоты широко используются для питания низкочастотных регулируемых электроприводов (шахтные подъемники, механические ножницы, шаровые мельницы цементных заводов и так далее). Кроме того, непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) применяют для питания обмоток электромагнитов, в установках для перематчивания жидкого металла и других устройствах.

Одна из классических трехфазно-трехфазных схем непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией вентилей приведена на рисунке 4.1.

Силовая схема состоит из трех комплектов полупроводниковых тиристоров (I, II, III), каждый из которых представляет собой две встречно-параллельно включенные нулевые схемы. Каждый комплект формирует фазное напряжение U_2 на соответствующей ему нагрузке Z_a , Z_b или Z_c с частотой f_2 . Каждая из фаз преобразователя работает независимо от других.

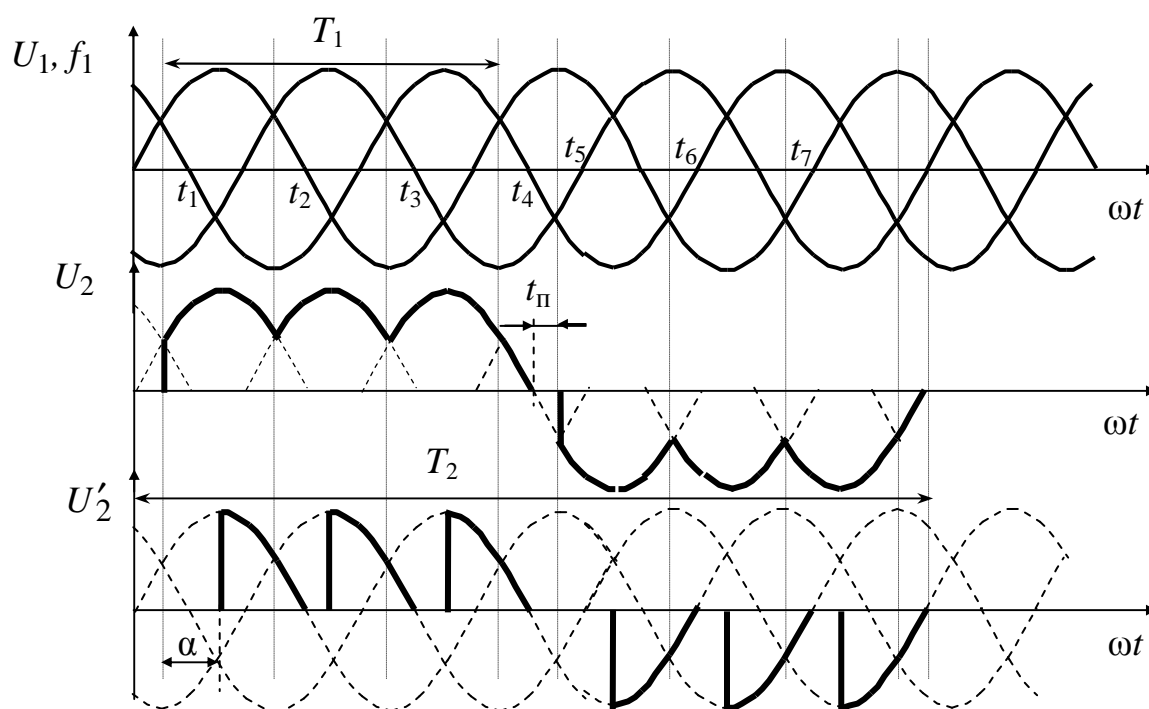


Рис. 4.2

Принцип действия непосредственного преобразователя частоты поясняется временными диаграммами, представленными на рисунке 4.2. Если в моменты времени t_1, t_2, t_3 открывать тиристоры 1, 2, 3, а к моменту времени t_4 снять импульсы управления, то на нагрузке сформируется положительная полуволна выходного напряжения U_2 . Открывая тиристоры 4, 5, 6 в моменты времени t_5, t_6, t_7 , формируется отрицательная полуволна выходного напряжения.

Таким образом, регулируя с помощью системы управления количество полупериодов первичного напряжения U_1 в полупериоде вы-

ходной частоты f_2 , можно дискретно регулировать выходную частоту. Интервал дискретизации соответствует полупериоду напряжения питающей сети U_1 . Частота основной гармоники выходного напряжения может быть определена из выражения:

$$f_2 = \frac{f_1 m_1}{2n + m_1},$$

где n – количество полуволн первичного напряжения;
 m_1 – количество фаз первичной сети.

Для осуществления плавного регулирования частоты применяется регулируемая пауза (t_{Π}) между включением и отключением катодной и анодной групп вентильного комплекта.

Для регулирования величины выходного напряжения управляющие импульсы на тиристоры подаются с запаздыванием относительно точек естественной коммутации ($t_1, t_2, t_3 \dots$) на угол α (напряжение U'_2 на рисунке 4.2).

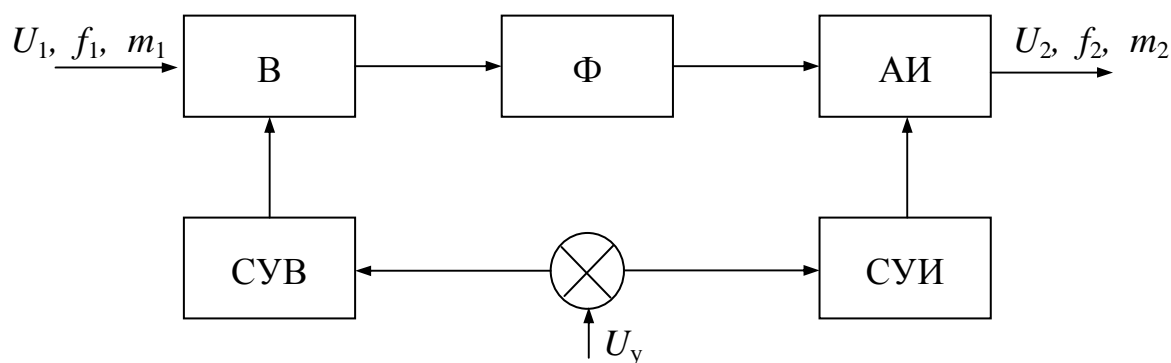


Рис. 4.3

Выпрямительно-инверторные преобразователи частоты строятся в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 4.3. В этом преобразователе переменное напряжение U_1, f_1, m_1 питающей сети выпрямляется с помощью выпрямителя (В), фильтруется электрическим фильтром (Ф) и инвертируется автономным инвертором (АИ) в выходное напряжение U_2 , имеющее частоту f_2 и количество фаз m_2 . Регулирование частоты выходного напряжения осуществляется инвертором, а величины – управляемым выпрямителем. Иногда обе функции выполняет инвертор, а выпрямитель используется неуправляемый. Управление выпрямителем осуществляется системой управления выпрямителя (СУВ), а инвертора – системой управления инвертора (СУИ).

Устройство силового преобразователя частоты приведено на рисунке 4.4.



Рис. 4.4

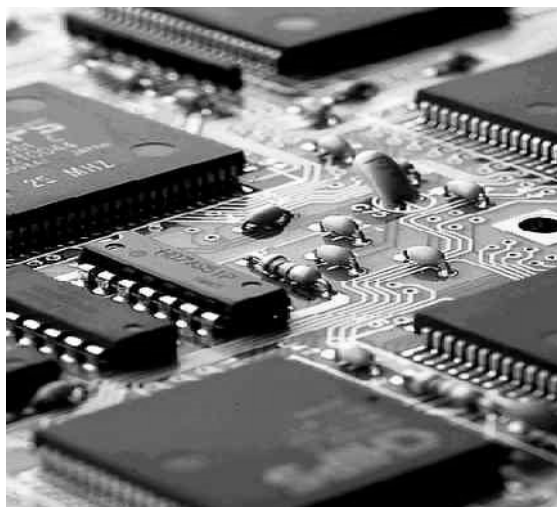
Данный тип преобразователей частоты проще, чем непосредственный преобразователь частоты, и позволяет регулировать выходную частоту f_2 в широком диапазоне, как выше, так и ниже частоты питающей сети.

Недостатком выпрямительно-инверторных преобразователей частоты является двойное преобразование энергии, что ухудшает их коэффициент полезного действия и приводит к увеличению массы и габаритов.

5. Элементы цифровой техники

Цифровые микросхемы предназначены для обработки, преобразования и хранения цифровой информации. Выпускаются они сериями. Внутри каждой серии имеются объединенные по функциональному признаку группы устройств: логические элементы, триггеры, счетчики, элементы арифметических устройств (выполняющие различные математические операции) и так далее. Чем шире функциональный состав серии, тем большими возможностями может обладать цифровое устройство, выполненный на базе микросхем данной серии. Микросхемы, вхо-

дящие в состав каждой серии, имеют единое конструктивно-технологическое исполнение, единое напряжение питания, одинаковые уровни сигналов логического «0» и логической «1». Все это делает микросхемы



одной серии совместимыми.

Основой каждой серии цифровых микросхем является базовый логический элемент. Как правило, базовые логические элементы выполняют операции И-НЕ либо ИЛИ-НЕ и по принципу построения делятся на следующие основные типы: элементы диодно-транзисторной логики (ДТЛ), резистивно-транзисторной логики (РТЛ), транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), эмиттерно-связанной транзисторной логики (ЭСТЛ), микросхемы на так называемых комплементарных МДП структурах (КМДП). Элементы КМДП цифровых микросхем используют пары МДП-транзисторов (со структурой металл-диэлектрик-полупроводник) – с каналами p - и n -типов. Базовые элементы остальных типов выполнены на биполярных транзисторах.

Логические элементы вместе с запоминающими устройствами составляют основу устройств цифровой (дискретной) обработки информации вычислительных машин, цифровых измерительных приборов и устройств.

Цифровую информацию обычно представляют в двоичной форме, в которой сигналы принимают только два значения: «0» (логический ноль) и «1» (логическая единица), соответствующие двум состояниям электронного ключа.

Логические преобразования двоичных сигналов включают три элементарные операции:

1) логическое сложение (логическое ИЛИ), обозначаемое знаками «+» или « \vee »

$$F = X_1 + X_2 + \dots + X_n \text{ или } F = X_1 \vee X_2 \dots;$$

2) логическое умножение (логическое И), обозначаемое знаками «•», « \wedge » или написанием переменных рядом без знаков деления

$$F = X_1 X_2 \dots X_n \text{ или } F = X_1 \wedge X_2 \dots;$$

3) логическое отрицание (логическое НЕ), обозначаемое чертой над переменной

$$F = \overline{X}.$$

Зависимость логического выходного сигнала F от совокупности логических значений входных сигналов X принято представлять в виде **таблицы истинности**.

5.1. Логические функции одной переменной

Таблица истинности логической функции одной переменной $Y = f(X)$ содержит всего две строки, а число функций одной переменной равно четырем.

1. **Логическая функция константа 0**, $Y = 0$. Техническая реализация этой логической функции – соединение вывода Y с общей шиной с нулевым потенциалом. Таким образом, таблица истинности логической функции константа 0 запишется в следующем виде (смотри таблицу 5.1.1):

Таблица 5.1.1

X	$Y = f(X)$
0	0
1	0

2. Логическая функция $Y = f(X) = X$ – **функция повторения**. Техническая реализация логической функции повторения – соединение между собой выводов X и Y . Таблица истинности логической функции повторения имеет следующий вид (таблица 5.1.2):

Таблица 5.1.2

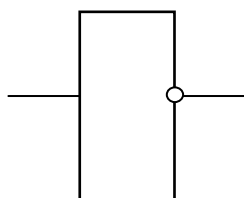
X	$Y = f(X)$
0	0
1	1

3. Логическая функция $Y = f(X) = NOT(X)$ – **отрицание НЕ или инверсия** ($NOT(X)$ – это НЕ X). Техническая реализация этой логической функции – инвертор на любом транзисторе или логическом элементе, или транзисторный ключ. Таблица истинности логической функции отрицания имеет вид (таблица 5.1.3):

Таблица 5.1.3

X	$Y = f(X)$
0	1
1	0

Логический элемент НЕ обозначается на схемах следующим образом (смотри рисунок 5.1.1):



4. **Логическая функция константа 1**, $Y = 1$. Техническая реализация этой логической функции – соединение вывода Y с источником питания. Таблица истинности логической функции константа 1 имеет вид (таблица 5.1.4):

Таблица 5.1.4

X	$Y = f(X)$
0	1
1	1

Важнейшей логической функцией одной переменной является отрицание НЕ, остальные логические функции являются тривиальными.

5.2. Логические функции двух переменных

Таблица истинности логической функции двух переменных $Y = f(X1, X2)$ содержит четыре строки, а число логических функций

двух переменных равно шестнадцати. Рассмотрим только несколько основных логических функций двух переменных.

1. **Логическая функция ИЛИ** (логическое сложение):

$$Y = X1 + X2 = X1 \vee X2$$

Техническая реализация этой логической функции – два параллельно соединенных ключа (смотри рисунок 5.2.1).

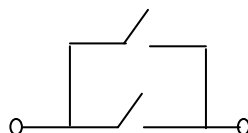


Рис. 5.2.1

Таблица истинности логической функции ИЛИ имеет вид (таблица 5.2.1):

Таблица 5.2.1

$X1$	$X2$	$Y = X1 + X2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логический элемент ИЛИ обозначается на схемах следующим образом (смотри рисунок 5.2.2):

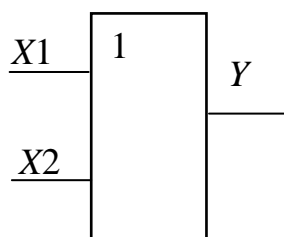


Рис. 5.2.2

2. **Логическая функция И** (логическое умножение, конъюнкция, схема совпадений) представляется выражением:

$$Y = X1X2 = X1 \& X2$$

Техническая реализация логической функции – два последовательно соединенных ключа (смотри рисунок 5.2.3).



Рис. 5.2.3

Таблица истинности логического элемента И имеет вид (таблица 5.2.2):

$X1$	$X2$	$Y = X1X2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Таблица 5.2.2

Логический элемент И обозначается на схемах следующим образом (смотри рисунок 5.2.4):

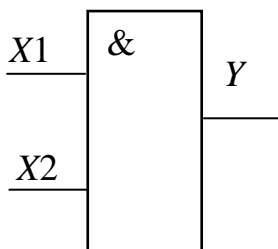


Рис. 5.2.4

3. Логическая функция стрелка Пирса (ИЛИ-НЕ) записывается выражением:

$$Y = NOT(X1 + X2)$$

Таблица истинности логической функции ИЛИ-НЕ представляется в виде (таблица 5.2.3):

Таблица 5.2.3

$X1$	$X2$	$Y = \overline{X1 + X2}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Логический элемент ИЛИ-НЕ обозначается на схемах следующим образом (смотри рисунок 5.2.5):

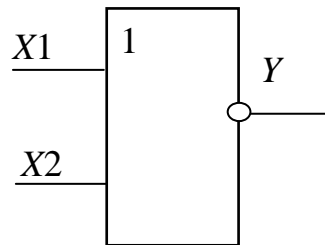


Рис. 5.2.5

4. **Логическая функция штрих Шеффера** (И-НЕ) имеет следующую запись:

$$Y = X1 | X2 = NOT(X1X2)$$

Таблица истинности логической функции И-НЕ запишется в виде следующей таблицы (таблица 5.2.4):

Таблица 5.2.4

$X1$	$X2$	$Y = \overline{X1X2}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Логический элемент И-НЕ обозначается на схемах следующим образом (смотри рисунок 5.2.6):

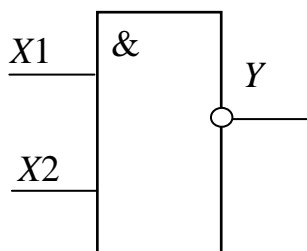


Рис. 5.2.6

Есть ещё три логические функции двух переменных, имеющие специальные названия: импликация, эквивалентность, неравнозначность (исключающее ИЛИ, сложение по модулю 2). Последние две логические функции являются взаимно обратными, также как, например, логическая функция И, а также логическая функция штрих Шеффера.

5.3. Элемент памяти – RS-триггер

Триггер – это логическое устройство, способное хранить один бит информации. К триггерам относятся устройства, имеющие два устойчивых состояния. Простейший триггер – **RS-триггер**, образован из двух логических элементов И-НЕ (или ИЛИ-НЕ). Он позволяет запоминать один бит информации, поскольку информация в компьютере представляется в двоичном виде. Его принципиальная схема приведена на рисунке 5.3.1.

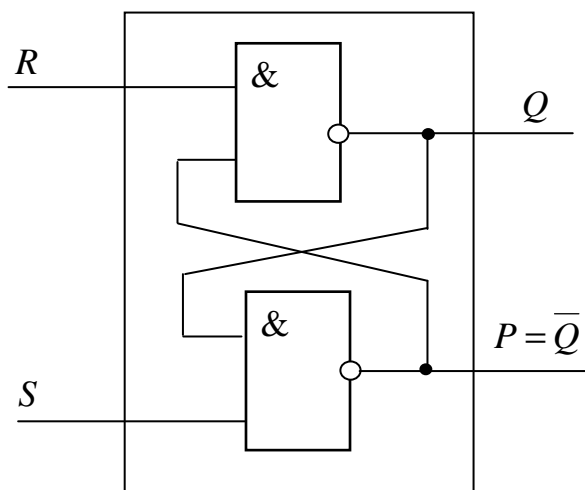


Рис. 5.3.1

Действие RS-триггера поясняется в приведенной ниже таблице истинности 5.3.1. (*S*-вход установки (*Set*), *R*-вход сброса (*Reset*)).

Таблица 5.3.1

Вход R	Вход S	Вход Q	Вход Q
0	0	Не опред.	Не опред.
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Без измен.	Без измен.

В обычном (исходном) состоянии на входы R - S -триггера поданы

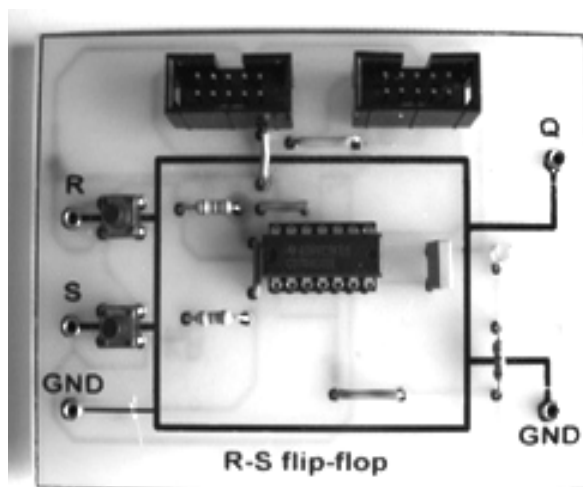


Рис. 5.3.2

единичные сигналы «1». Для записи информации на вход R подан «0». Для сброса информации и подготовки к приёму новой информации на вход S подается «0», и триггер вернётся в исходное состояние. Поскольку один триггер запоминает один бит информации, то для запоминания одного байта (восемь бит) нужно восемь триггеров, для запоминания одного килобайта (1024 байт) надо 8192 триггеров. Современные микросхемы опер-

ативных запоминающих устройств способны запоминать десятки мегабайт информации.

Реализация R - S -триггера на микросхемах приведена на рисунке 5.3.2.

5.4. Элементы математической логики

Существуют такие наборы логических функций, с помощью которых можно выразить любые другие логические функции. Они называются функционально полными или базисами. Наиболее известный базис – это набор логических функций И, ИЛИ, НЕ. Логическая функция штрих Шеффера является базисной, также как и логическая функция стрелка Пирса. Поэтому, с помощью логических элементов ИЛИ-НЕ или И-НЕ можно собрать любую логическую схему. На таких типовых элементах собран микропроцессор компьютера и другие логические устройства.

Логические схемы состоят из логических элементов, осуществляющих логические операции. Логика – наука, изучающая методы уста-

новления истинности или ложности одних высказываний на основе истинности или ложности других высказываний (утверждений).

Логика изучает методы доказательств и опровержений. Логика составляет основу всякого управления, в том числе технологическими процессами. Математическая логика – современная форма логики, опирающаяся на формальные математические методы. Основные объекты логики – высказывания, то есть предложения, которые могут быть либо истинными, либо ложными.

Существуют два подхода установления истинности высказываний: эмпирический (опытный) и логический.

При эмпирическом подходе истинность высказываний устанавливается на основе наблюдений, экспериментов, документов и других фактов.

При логическом подходе истинность высказываний доказывается на основе истинности других высказываний, то есть чисто формально, на основе рассуждений без обращения к фактам.

В языках программирования *QBasic* и *Turbo Pascal* логические функции И, ИЛИ, НЕ реализуются в виде логических операций *OR* (ИЛИ), *AND* (И), *NOT* (НЕ).

Множество всех логических функций, на котором определены три логические операции И, ИЛИ, НЕ называется булевой алгеброй (по имени основоположника математической логики английского математика Джорджа Буля).

Отсюда следует, что для построения логического устройства любой сложности достаточно иметь однотипные логические элементы, например, И-НЕ или ИЛИ-НЕ.

Логические элементы могут работать в режимах положительной и отрицательной логики. Для электронных логических элементов в режиме положительной логики логической единице соответствует высокий уровень напряжения, а логическому нулю – низкий уровень напряжения. В режиме отрицательной логики логической единице соответствует низкий уровень напряжения, а логическому нулю – высокий.

5.5. Примеры решения задач

Задача

В схеме, приведенной на рисунке 5.5.1, определить логические величины на выходах Y_1, Y_2, Y_3 , если значения входных величин заданы равными $X_1 = 0$; $X_2 = 1$; $X_3 = 0$; $X_4 = 0$; $X_5 = 1$.

Решение

Схема, изображенная на рисунке 5.5.1, включает три логических элемента операции ИЛИ ($DD1$, $DD3$ и $DD8$); один логический элемент операции И ($DD5$); один элемент логической операции НЕ ($DD4$); один логический элемент операции ИЛИ-НЕ ($DD7$), два логических элемента операции И-НЕ ($DD2$ и $DD6$).

Введем обозначение F_k для логической величины на выходе k -ого логического элемента ($k = \overline{1, 5}$ – принятый номер для обозначения логического элемента).

Таблицы истинности позволяют определить по заданным входным величинам $X_1 \div X_5$ выходные логические величины $F_1 \div F_5$ и Y_1 ; Y_2 ; Y_3 . Результаты решения приведены ниже в таблице результатов решений 5.5.1.

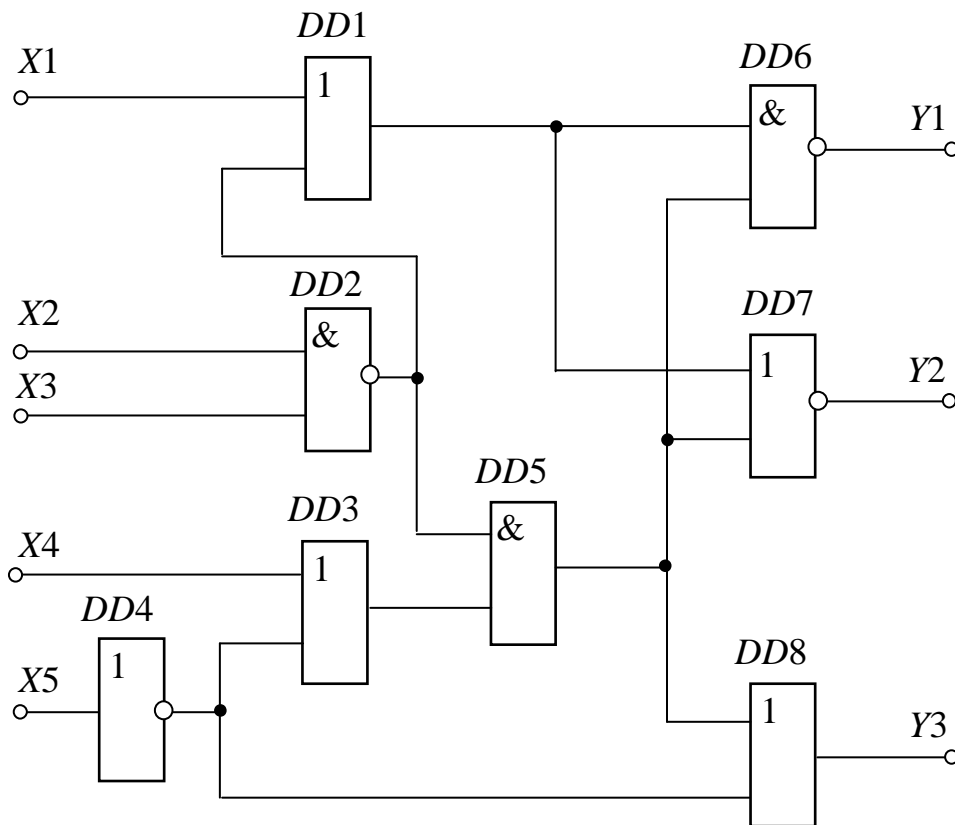


Рис. 5.5.1

Таблица 5.5.1

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЙ				
Номер элемента	Логическая операция	Входные величины		Выходные величины
DD1	ИЛИ	$X_1=0$	$F_2=1$	$F_1=1$
DD2	И-НЕ	$X_2=1$	$X_3=0$	$F_2=1$
DD3	ИЛИ	$X_4=0$	$F_4=0$	$F_3=0$
DD4	НЕ	$X_5=1$		$F_4=0$
DD5	И	$F_2=1$	$F_3=0$	$F_5=0$
DD6	И-НЕ	$F_1=1$	$F_5=0$	$Y_1=1$
DD7	ИЛИ-НЕ	$F_1=1$	$F_5=0$	$Y_2=0$
DD8	ИЛИ	$F_4=0$	$F_5=0$	$Y_3=0$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герасимов В. Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986. – 336 с.
2. Электротехника и электроника: Учебник в 3-х книгах. / Под ред. В. Г. Герасимова. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 432 с.
3. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника: учеб. пособие, 3-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 576 с.
4. Лукутин А.В., Шандарова Е.Б. Электротехника и электроника: Учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2010. – 198 с.
5. Электротехнический справочник: в 3-х т. Т. 2. Электротехнические устройства / Под общ. ред. Проф. МЭИ В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.
6. Основы промышленной электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1987. – 336 с.
7. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилизаторы, тиристоры: Справочник / Под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК-а, 1994. – 527 с.

Учебное издание

ЛУКУТИН Алексей Владимирович,
ШАНДАРОВА Елена Борисовна

ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор *кандидат технических наук,*
доцент А. В. Лукутин
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО



ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru