

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

В. П. Авдейко
А. С. Вершинин
А. Л. Адамович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методический комплекс
для студентов технических специальностей
неэлектротехнического профиля

В двух частях

Часть 2

Основы электроники и электропривод

Новополоцк
ПГУ
2012

УДК 621.3+621.38(075.8)
ББК 31.2я73
А18

Рекомендовано к изданию
методической комиссией инженерно-технологического факультета
в качестве учебно-методического комплекса
(протокол № 2 от 2.09.2010)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

начальник участка по ремонту средств КИП и А
цеха № 12 ОАО «Нафтан» А. Г. КОВАЛЕВ;
канд. техн. наук, доцент,
зав. кафедрой К и Т РЭС УО «ПГУ» Ю. Г. ГРОЗБЕРГ

Авдейко, В. П.

А18 Электротехника, основы электроники и электропривод : учеб.-метод.
комплекс для студентов тех. специальностей неэлектротех. профиля. В 2 ч.
Ч. 2. Основы электроники и электропривод / В. П. Авдейко, А. С. Вершинин,
А. Л. Адамович. – Новополоцк : ПГУ, 2012. – 284 с.
ISBN 978-985-531-213-1.

Включает конспект лекций, вопросы для защиты лабораторных работ, методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Электротехника, электрические машины и аппараты», список литературы.

Предназначен для студентов технических специальностей неэлектротехнического профиля.

УДК 621.3+621.38(075.8)
ББК 31.2я73

ISBN 978-985-531-213-1 (Ч. 2)
ISBN 978-985-531-211-7

© Авдейко В. П., Вершинин А. С., Адамович А. Л., 2012
© УО «Полоцкий государственный университет», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

11. Основы электроники. Полупроводниковые приборы	5
11.1. Введение в электронику	5
11.2. Физические основы полупроводниковых приборов	5
Контрольные вопросы	9
11.3. Электрические переходы в полупроводниковых приборах	10
Контрольные вопросы	15
11.4. Полупроводниковые диоды	16
Контрольные вопросы	21
11.5. Биполярные транзисторы	21
Контрольные вопросы	30
11.6. Полевые (униполярные транзисторы)	30
Контрольные вопросы	42
11.7. Тиристоры	42
Контрольные вопросы	50
11.8. Обзор наиболее широко применяемых оптоэлектронных полупроводниковых приборов	50
Контрольные вопросы	57
12. Вторичные источники питания	58
12.1. Однополупериодный выпрямитель	58
12.2. Двухполупериодные выпрямители	59
12.3. Выпрямители с умножением напряжения	62
12.4. Трехфазные выпрямители	64
12.5. Сглаживающие фильтры	68
12.6. Стабилизаторы напряжения	70
12.7. Импульсные источники напряжения (электропитания)	73
12.8. Регулируемые выпрямители	75
12.9. Основные параметры и характеристики источников напряжения	78
Контрольные вопросы	79
13. Усилители электрических сигналов	81
13.1. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах	81
Контрольные вопросы	90
13.2. Усилители электрических сигналов на полевых транзисторах	90
Контрольные вопросы	95
13.3. Усилители постоянного тока	95
Контрольные вопросы	100
13.4. Операционные усилители	100
Контрольные вопросы	112
14. Импульсные и цифровые устройства	113
14.1. Арифметические основы цифровых устройств	113
Контрольные вопросы	116
14.2. Логические основы цифровых устройств	116
Контрольные вопросы	121
14.3. Техническая реализация логических элементов	122
Контрольные вопросы	126

14.4. Триггеры	126
Контрольные вопросы	131
14.5. Счетчики импульсов и регистры	131
Контрольные вопросы	138
14.6. Цифровые устройства комбинационного типа	138
Контрольные вопросы	146
14.7. Цифроаналоговые преобразователи	147
Контрольные вопросы	150
14.8. Аналого-цифровые преобразователи	151
Контрольные вопросы	158
14.9. Микропроцессоры и микроконтроллеры	158
Контрольные вопросы	163
15. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	164
15.1. Структура электропривода	164
15.2. Уравнение движения электропривода	165
15.3. Механические характеристики электродвигателей и рабочих механизмов	166
15.4. Реверсирование и торможение электродвигателей	168
15.5. Динамика электропривода	177
15.6. Определение момента инерции привода	179
15.7. Выбор типа двигателя	180
15.8. Нагревание и охлаждение двигателей	181
15.9. Выбор мощности двигателя	182
15.10. Системы регулируемого электропривода	184
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ	
ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ.....	206
Лабораторная работа № 1	
Исследование выпрямителей однофазного переменного напряжения	206
Лабораторная работа № 2	
Исследование трехфазных выпрямителей	215
Лабораторная работа № 3	
Исследование однофазного регулируемого выпрямителя на тиристорах	221
Лабораторная работа № 4	
Исследование электронных усилителей на транзисторах	228
Лабораторная работа № 5	
Исследование схем типовых устройств на операционных усилителях	237
Лабораторная работа № 6	
Исследование логических элементов и триггеров	244
Лабораторная работа № 7	
Исследование счетчиков импульсов	254
Методические указания к курсовой работе по дисциплине	
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ»	261
Условные графические и буквенные обозначения	
в электрических схемах	278
Рейтинговая система контроля	282
Литература	283

11. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

11.1. Введение в электронику

Электроника изучает принципы устройства, работы, применения различных электронных приборов и схемотехнику построения электронных устройств на основе электронных приборов.

История не знает примеров более бурного развития ни одной другой области науки и техники по сравнению с электроникой. Моменты появления первого биполярного транзистора (1953 г.) и первого микропроцессора (1971 г.) разделяют всего 18 лет. А вся история развития вычислительной техники от первой ЭВМ на электронных лампах (1945 г.) до современных мощных персональных компьютеров насчитывает всего 65 лет.

Электроника проникла во все отрасли современной науки, техники, промышленности и быта. Электронные приборы используются в автоматике и автоматизации производственных процессов, телемеханике, проводной связи, звуковом кино, атомной и ракетной технике, астрономии, метеорологии, геофизике, медицине, биологии, физике, химии, металлургии, машиностроении, приборостроении и других областях науки и техники.

Электронными приборами называются устройства, ток в которых обусловлен перемещением электронов в вакууме, а также электронов и ионов в твердом теле, жидкости, газе или плазме. Электронные приборы применяются как комплектующие элементы электронной аппаратуры, не подлежащие сборке, разборке или ремонту.

Электронные приборы бывают электровакуумные (электронные лампы), электронно-лучевые (электронно-лучевые трубки, кинескопы), полупроводниковые приборы, жидкокристаллические. Из всего многообразия электронных приборов наибольшее применение находят полупроводниковые приборы, т.к. полупроводниковые структуры хорошо поддаются микроминиатюризации и функционально перекрывают широкий спектр электронных комплектующих от простых полупроводниковых диодов и транзисторов до сложных микросхем микропроцессоров и микроконтроллеров.

11.2. Физические основы полупроводниковых приборов

К полупроводникам относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное электрическое сопротивление от 10^{-5} до 10^{10} Ом·см (в полупроводниковой технике принято измерять сопротивле-

ние 1 см^3 материала). Для изготовления полупроводниковых приборов наиболее часто используют кремний, арсенид галлия, германий, селен.

Одним из свойств полупроводников является уменьшение удельного электрического сопротивления с ростом температуры:

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp(\beta/T),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление полупроводника при $300 \text{ }^\circ\text{K}$;

β – постоянный положительный коэффициент;

T – температура, $^\circ\text{K}$.

Атом полупроводника (как и любой другой) состоит из ядра, вокруг которого по своим орбитам вращаются электроны. Размер орбиты определяется энергией электрона. Чем дальше от ядра находится вращающийся электрон, тем выше его энергетический уровень. При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой, более высокий, происходит поглощение энергии электроном, а при обратном переходе – ее выделение. Поглощение и выделение энергии может происходить только строго определенными порциями – квантами.

Электроны, находящиеся на внешних орбитах, слабее связаны с ядром атома и легче вступают во взаимодействие с другими атомами. Их называют валентными электронами. Пространственная кристаллическая решетка полупроводника состоит из атомов, связанных друг с другом валентными электронами. Такая связь, называемая *ковалентной*, или *парно-электронной*, изображена на рис. 11.1, а.

Как видно, вокруг каждой пары атомов движутся по орбитам два валентных электрона, показанные на рисунке жирными точками. В условном плоскостном изображении такой кристаллической решетки (рис. 11.1, б) ковалентные связи показаны в виде прямых линий, а электроны – по-прежнему в виде точек.

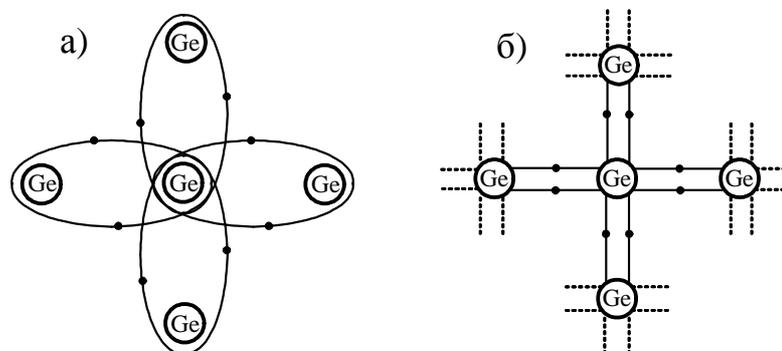


Рис. 11.1. Ковалентная связь между атомами германия

Электропроводность химически чистых полупроводников. При температуре 0 °К все валентные связи в полупроводнике заполнены, свободных носителей зарядов нет и электропроводность отсутствует. С повышением температуры энергия электронов возрастает и часть электронов приобретает энергию, достаточную для разрыва валентной связи, они покидают атом и становятся свободными носителями отрицательного заряда. Наличие свободных электронов обеспечивают полупроводнику *электронную проводимость*.

При этом атом, потерявший электрон, превращается в неподвижный положительный ион, называемый дыркой. Валентные электроны соседних атомов полупроводника могут переходить на свободные места ушедших электронов, создавая дырки в другом месте. При этом наблюдается движение положительно заряженных фиктивных зарядов – дырок. Этим полупроводнику сообщается *дырочная проводимость*.

Процесс отрыва и удаления одного или нескольких электронов от атома или молекулы называется *ионизацией*.

Величина энергии разрыва валентных связей для полупроводников сравнительно невелика и измеряется в электрон-вольтах. Так, для германия она составляет 0,72 эВ, для кремния – 1,12 эВ, для арсенида галлия – 1,4 эВ.

Химически чистый полупроводник называется *собственным* полупроводником. Электропроводность такого полупроводника, обусловленная парными носителями теплового происхождения, называется *собственной*.

Процесс образования пары электрон-дырка называют *генерацией пары*. При этом генерация пары может быть следствием не только воздействия тепловой энергии (тепловая генерация), но и кинетической энергии движущихся частиц (ударная генерация), энергии электрического поля, энергии светового облучения (световая генерация) и др.

Образовавшиеся в результате генерации носители зарядов – электроны и дырки – совершают хаотическое движение в объеме полупроводника до тех пор, пока электрон не будет «захвачен» дыркой. В результате разорванные валентные связи восстанавливаются, а носители заряда – электрон и дырка – исчезают с выделением энергии. Этот процесс называют *рекомбинацией*.

Промежуток времени с момента генерации носителя до момента рекомбинации называется *временем жизни носителя* τ , а расстояние, пройденное носителем заряда за время жизни, – *диффузионной длиной* L .

Если в полупроводнике создать электрическое поле, то хаотическое движение зарядов в виде электронов и дырок превратится в упорядочен-

ное, т.е. электроны и дырки будут двигаться во взаимно противоположных направлениях по направлению поля.

Движение носителей заряда в полупроводнике, вызванное наличием электрического поля и градиента потенциала, называют *дрейфом*, а созданный этими зарядами ток – *дрейфовым током*.

Движение носителей заряда под влиянием градиента концентрации, называют *диффузией*, а созданный этими зарядами ток – *током диффузии*.

Электропроводность примесных полупроводников. Электрические свойства полупроводников зависят от содержания в них атомов примесей и других дефектов кристаллической решетки. Примеси бывают *акцепторные* и *донорные*.

Акцепторные примеси. Так как германий (Ge) и кремний (Si) имеют по четыре валентных электрона на внешних орбитах, то в качестве акцепторных примесей используют вещества с тремя валентными электронами – это бор (B), индий (In) и алюминий (Al). Если, например, в Ge ввести трехвалентный атом In, то образуются ковалентные связи между атомом In и четырьмя соседними атомами Ge, при этом получится устойчивая восьми-электронная оболочка за счет дополнительного электрона, отобранного у одного из атомов Ge. Этот электрон, будучи «связанным», превращает атом In в неподвижный отрицательный ион (рис. 11.2). Энергия ионизации атома примеси мала и составляет примерно 0,01 – 0,05 эВ.

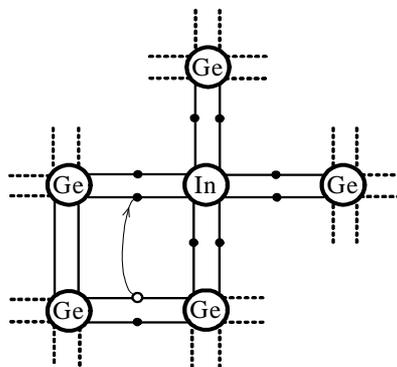


Рис. 11.2. Возникновение примесной дырочной электропроводности

На месте ушедшего электрона образуется дырка, которая добавляется к собственным дыркам полупроводника. При этом концентрация дырок превысит концентрацию свободных электронов в полупроводнике ($p > n$). Следовательно, в полупроводнике будет преобладать дырочная электропроводность. Концентрация дырок N_p будет значительно больше концентрации электронов N_n , т.е. $N_p > N_n$. Такой полупроводник называют *полу-*

проводником *p*-типа. Для такого полупроводника дырки являются основными носителями зарядов, а электроны – неосновными.

При приложении к этому полупроводнику напряжения будет преобладать дырочная составляющая тока, т.е. $J_n < J_p$.

Донорные примеси. В качестве донорных примесей используют вещества с пятью валентными электронами – это сурьма (Sb), мышьяк (As), фосфор (P). Если, например, в Ge ввести пентавалентный атом P, то образуются ковалентные связи между P и четырьмя соседними атомами Ge, при этом останется один лишний электрон, который слабо удерживается атомом P. Достаточно небольшой дополнительной энергии (0,01 – 0,05 эВ), чтобы этот электрон оторвался от атома P, стал свободным и присоединился к собственным электронам полупроводника. Атом фосфора (P) превращается в неподвижный положительный ион (рис. 11.3).

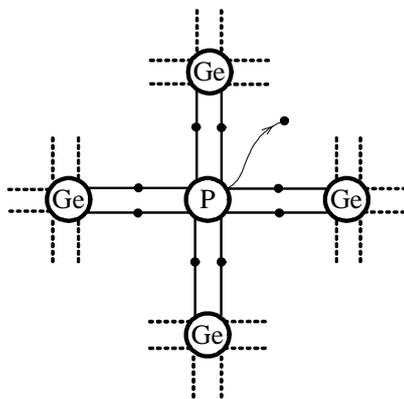


Рис. 11.3. Возникновение примесной электронной электропроводности

При этом концентрация электронов превысит концентрацию дырок в полупроводнике ($n > p$). Следовательно, в полупроводнике будет преобладать электронная электропроводность. Концентрация электронов N_n будет значительно больше концентрации дырок N_p , т.е. $N_n > N_p$. Такой полупроводник называют *полупроводником n-типа*. Для такого полупроводника электроны являются основными носителями зарядов, а дырки – неосновными.

При приложении к этому полупроводнику напряжения будет преобладать электронная составляющая тока, т.е. $J_n > J_p$.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы относятся к категории полупроводниковых?
2. Какими свойствами обладают собственные полупроводники?

3. Электропроводность собственных полупроводников.
4. Что такое легированные полупроводники? Их свойства.
5. Чем отличаются полупроводники *n*- и *p*-типов?
6. Поясните понятия электронной и дырочной проводимости.
7. По каким причинам происходит генерация носителей зарядов в собственных и в примесных (легированных) полупроводниках?

11.3. Электрические переходы в полупроводниковых приборах

Электрическим переходом называют переходный слой между двумя областями полупроводника с различными типами электропроводности или разными величинами удельной электрической проводимости, а также между металлом и полупроводником.

Электрический переход нельзя создать путем механического контакта двух кристаллов полупроводника, т.к. поверхности кристаллов обычно загрязнены оксидами и атомами других веществ. Существенную роль играет воздушный зазор, устранить который при механическом контакте практически невозможно. Для изготовления переходов применяют легирование части кристалла *n*-полупроводника акцепторными примесями путем их диффузии из жидкой или газообразной среды (диффузионный переход). Либо используется метод сплавления в полупроводник металла, содержащего акцепторные или донорные примеси (сплавной переход).

Электронно-дырочный n-p-переход. Область на границе раздела двух полупроводников с различными типами электропроводности называется *электронно-дырочным*, или *n-p*-, *переходом*. Работа большинства полупроводниковых приборов (диоды, транзисторы и др.) основана на использовании свойств одного или нескольких *n-p*-переходов.

Электронно-дырочный n-p-переход при отсутствии внешнего напряжения. Рассмотрим симметричный *n-p*-переход, образованный на границе раздела между *n*- и *p*-областями полупроводника, у которых концентрации основных и неосновных носителей зарядов соответственно равны. Будем считать, что при комнатной температуре (300 °К) практически все примесные атомы ионизированы, и в результате тепловой генерации собственного полупроводника в обеих областях имеется некоторое количество неосновных носителей.

По обе стороны от границы раздела *n*- и *p*-областей концентрации одноименных носителей зарядов различны: $n_{no} \gg n_{po}$ и $p_{po} \gg p_{no}$, где n_{no} - и p_{po} -концентрации основных носителей соответственно в *n*- и *p*-областях, а p_{no} - и n_{po} -концентрации неосновных носителей соответственно в *n*- и *p*-

областях. Из-за значительной разницы концентраций одноименных носителей зарядов через границу раздела возникает диффузионное движение частиц: дырки из p -области движутся в n -область, а электроны наоборот из n -области в p -область (рис. 11.4, а). Переходя границу раздела, электроны и дырки рекомбинируют с зарядами противоположных знаков, и приграничные слои обедняются основными носителями зарядов.

Диффузионное перемещение электронов и дырок показано на рис. 11.4, а стрелками. Кружки с плюсом и минусом изображают атомы донорной и акцепторной примеси, заряженные соответственно положительно и отрицательно.

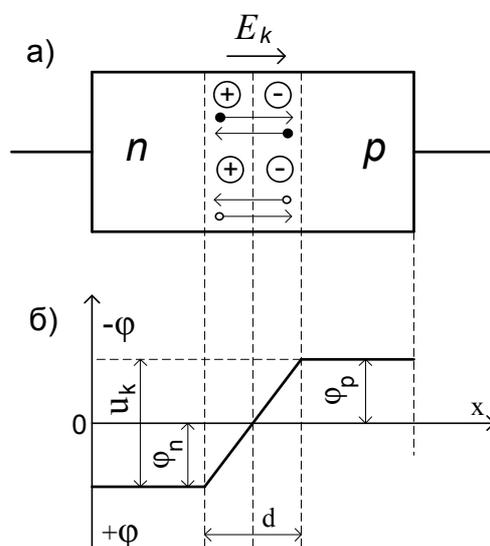


Рис. 11.4. Электронно-дырочный переход при отсутствии внешнего напряжения

В результате диффузии носителей приграничный слой в n -области получает объемный положительный заряд. Он образован главным образом положительно заряженными атомами донорной примеси и в меньшей степени – пришедшими в эту область дырками. Аналогично, приграничный слой в p -области получает отрицательный объемный заряд, образованный отрицательно заряженными атомами акцепторной примеси и, отчасти, пришедшими сюда электронами.

Между образовавшимися объемными зарядами возникают так называемая *контактная разность потенциалов* $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ и электрическое поле (вектор напряженности E_k). На рис. 11.4, б изображена потенциальная диаграмма n - p -перехода при отсутствии внешних напряжений. На этой диаграмме показано распределение потенциала вдоль оси x , перпендику-

лярной плоскости раздела двух полупроводников, за нулевой потенциал принят потенциал граничного слоя. Как видно из потенциальной диаграммы в n - p -переходе возникает *потенциальный барьер*, препятствующий *диффузионному* переходу носителей. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта.

Одновременно с диффузионным перемещением основных носителей через границу происходит и обратное перемещение неосновных носителей под действием электрического поля E_k . Это поле перемещает дырки из n -области в p -область, и электроны из p -области в n -область. На рис 11.4, *a* такое перемещение неосновных носителей (дрейф) также показано стрелками.

При постоянной температуре n - p -переход находится в состоянии динамического равновесия. Каждую секунду через границу в противоположных направлениях диффундирует определенное число электронов и дырок, а под действием поля E_k столько же их дрейфует в обратном направлении:

$$I_{диф} - I_{др} = 0.$$

Таким образом, в n - p -переходе по обе стороны границы раздела возникает слой, обедненный основными носителями зарядов, и называемый *запирающим*. Он обладает большим сопротивлением по сравнению с остальными объемами полупроводника. Толщина запирающего слоя очень мала по сравнению с размерами n - и p -областей и составляет десятые доли микрона.

Электронно-дырочный n - p -переход при прямом внешнем напряжении. Пусть источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к полупроводнику p -типа, рис. 11.5, *a*. Тогда внешнее электрическое поле E_{np} будет направлено навстречу внутреннему полю n - p -перехода E_k .

Результирующее электрическое поле в переходе уменьшится, толщина запирающего слоя тоже уменьшится, и процесс диффузии основных носителей зарядов через переход возобновится. Они легко смогут преодолеть пониженный *потенциальный барьер* (рис. 11.5, *б*), в результате чего через n - p -переход будет протекать довольно большой ток, создаваемый движением основных носителей зарядов. Для сравнения на рис. 11.5, *б* штриховой линией повторена потенциальная диаграмма при отсутствии внешнего напряжения. Ток дрейфа при этом практически не изменяется, т.к. он зависит главным образом от концентрации неосновных носителей.

Таким образом, результирующий ток через n - p -переход примет значение

$$I_{np} = I_{диф} - I_{др} > 0, \text{ т.к. } I_{диф} > I_{др}.$$

Этот ток, вызванный движением основных носителей зарядов, называется прямым током, и такое подключение n - p -перехода также называется прямым. Считают, что при прямом включении n - p -переход открыт.

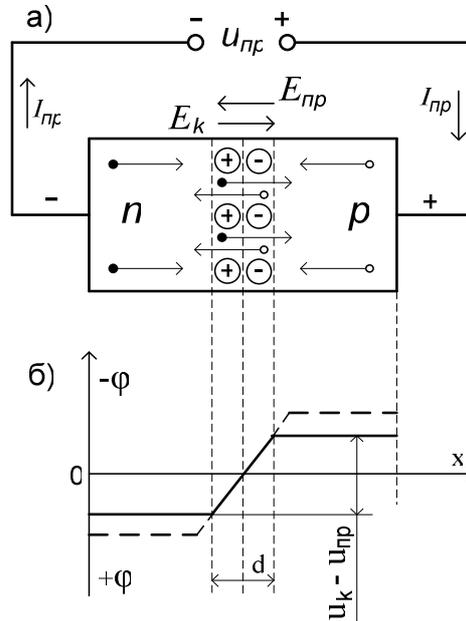


Рис. 11.5. Электронно-дырочный переход при прямом подключении к внешнему напряжению

Электронно-дырочный n - p -переход при обратном внешнем напряжении. Пусть источник внешнего напряжения подключен положительным полюсом к полупроводнику n -типа, рис. 11.6, а. Тогда внешнее электрическое поле $E_{обр}$ будет направлено одинаково с внутренним полем n - p -перехода E_k .

Результирующее электрическое поле в переходе увеличится, толщина запирающего слоя тоже увеличится, и диффузия основных носителей зарядов через переход не возобновляется. Они не смогут преодолеть возросший *потенциальный барьер* (рис. 11.6, б), в результате чего через n - p -переход будет протекать лишь небольшой дрейфовый ток, создаваемый движением неосновных носителей зарядов. Для сравнения на рис. 11.6, б штриховой линией повторена потенциальная диаграмма при отсутствии внешнего напряжения. Ток дрейфа при этом немного возрастет, но очень незначительно, т.к. концентрации неосновных носителей мала.

Таким образом, результирующий ток через n - p -переход примет значение

$$I_{обр} = I_{диф} - I_{др} < 0, \text{ т.к. } I_{диф} < I_{др}.$$

Этот ток, вызванный движением неосновных носителей зарядов, называется обратным током, и такое подключение n - p -перехода также называется обратным. Считают, что при обратном включении n - p -переход закрыт.

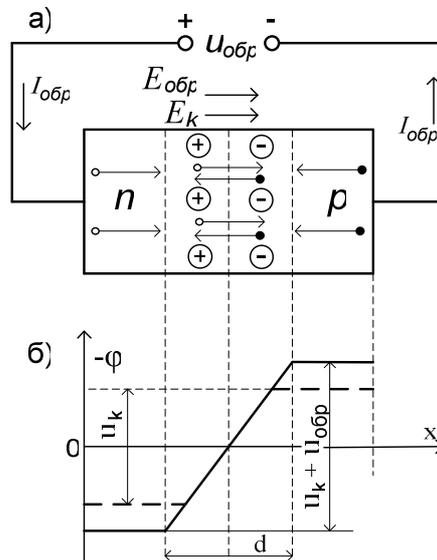


Рис. 11.6. Электронно-дырочный переход при обратном подключении к внешнему напряжению

Переход металл-полупроводник. Процессы в таких переходах зависят от так называемой *работы выхода* электронов, т.е. от той энергии, которую должен затратить электрон, чтобы выйти из металла или полупроводника. Чем меньше работа выхода, тем больше электронов может выйти из данного тела.

Пусть переход образован металлом и кристаллом полупроводника n -типа (рис. 11.7, а).

Если работа выхода электрона из металла A_m меньше, чем работа выхода из полупроводника A_n , то будет преобладать процесс выхода электронов из металла в полупроводник. При этом в слое полупроводника около границы раздела накапливаются электроны (основные носители), и этот слой становится обогащенным, т.е. в нем концентрация электронов выше, чем в остальной области n -полупроводника. Сопротивление этого приграничного слоя будет малым при любой полярности приложенного напряжения. Следовательно, такой переход не обладает выпрямляющими свойствами, и его называют *омическим переходом*.

Если работа выхода электрона из металла A_m больше, чем работа выхода из полупроводника A_n (n -типа), то будет преобладать процесс перехода электронов из полупроводника в металл, и такой переход будет обладать выпрямляющими свойствами.

Пусть переход образован металлом и кристаллом полупроводника p -типа (рис. 11.7, б). Если работа выхода электрона из металла A_M больше, чем работа выхода из полупроводника A_n , то будет преобладать процесс перехода электронов из полупроводника в металл. В этом случае также наблюдается обогащение приграничного слоя полупроводника основными носителями (дырками), т.е. в нем концентрация дырок выше, чем в остальной области p -полупроводника. Сопротивление этого приграничного слоя также будет малым при любой полярности приложенного напряжения. Такой переход тоже не обладает выпрямляющими свойствами, и его тоже называют *омическим переходом*.

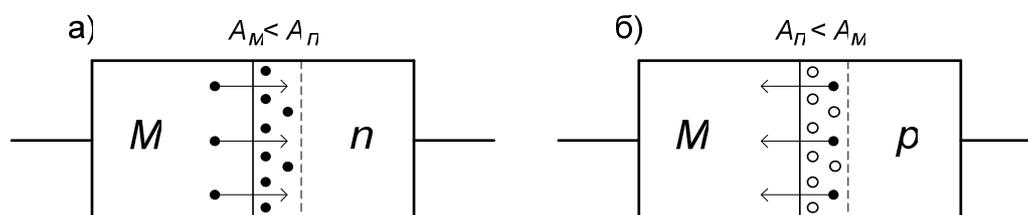


Рис. 11.7. Переходы металл-полупроводник

Если работа выхода электрона из металла A_M меньше, чем работа выхода из полупроводника A_n (p -типа), то будет преобладать процесс перехода электронов из металла в полупроводник, и такой переход также будет обладать выпрямляющими свойствами.

Оба типа омических переходов широко используются в полупроводниковых приборах при устройстве выводов от n - и p -областей. Для этого подбирают соответствующие металлы.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический переход? Виды переходов.
2. Образование электронно-дырочного p - n -перехода.
3. Физические процессы в электронно-дырочном p - n -переходе при отсутствии внешних напряжений.
4. Физические процессы в электронно-дырочном p - n -переходе при включении на обратное напряжение.
5. Физические процессы в электронно-дырочном p - n -переходе при включении на прямое напряжение.
6. Какими свойствами обладает электронно-дырочный p - n -переход и почему?

7. Образование перехода металл-полупроводник и его свойства.
8. Образование омического перехода и его свойства.

11.4. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковыми диодами называют электропреобразовательные приборы с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами для подключения. В диодах чаще всего применяются электронно-дырочный p - n -переход и переходы металл-полупроводник.

Условное графическое изображение и обозначение полупроводниковых диодов на схемах приведено на рис. 11.8.

На схемах полупроводниковые диоды обозначают буквами V или VD , после которых ставится цифра, указывающая номер диода в схеме. Диодная сборка обозначается буквами VS . Анод – это полупроводник p -типа. Катод – полупроводник n -типа.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода (ВАХ).

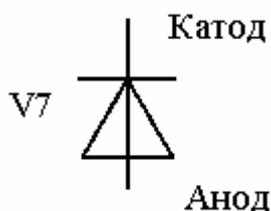


Рис. 11.8. Условное графическое изображение диода

Полупроводниковый диод является нелинейным элементом электрической цепи, т.к. имеет нелинейную вольт-амперную характеристику.

Вольт-амперная характеристика – это функциональная зависимость тока, протекающего через элемент, от величины и полярности приложенного напряжения.

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода приведена на рис. 11.9.

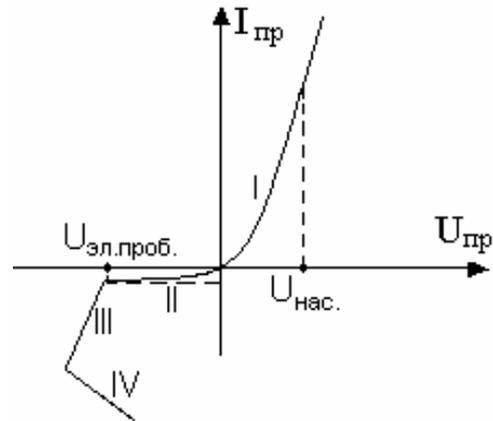
Участок I – прямая ветвь вольт-амперной характеристики (рабочий участок). *Участки II, III, IV* – обратная ветвь ВАХ (нерабочий участок).

Участок II. Если приложить к диоду обратное напряжение – диод закрыт, но, все равно, через него будет протекать малый обратный ток (ток дрейфа, тепловой ток), обусловленный движением неосновных носителей.

Участок III – участок электрического пробоя. Если приложить достаточно большое напряжение, неосновные носители разгонятся до значительной скорости и при соударении с узлами кристаллической решетки будет происходить ударная ионизация, которая в свою очередь приведет к лавинному пробоя (вследствие чего резко возрастает ток). Электрический пробой является обратимым, после снятия напряжения p - n -переход восстанавливается.

Рис. 11.9. ВАХ полупроводникового диода:

$U_{эл.проб.}$ – напряжение электрического пробоя; $U_{нас.}$ – напряжение насыщения; $I_{пр}$ и $U_{пр}$ – прямые ток и напряжение диода



Участок IV – участок теплового пробоя. Возрастает ток, следовательно, увеличивается мощность, рассеиваемая диодом, что приводит к перегреву $p-n$ -перехода и он сгорает. Тепловой пробой – необратим.

Вслед за электрическим пробоем, очень быстро следует тепловой, пробой, и поэтому диоды при электрическом пробое не работают.

Основные параметры полупроводниковых диодов:

– *Максимально допустимый прямой ток $I_{пр.мах}$* – это такой ток, который диод способен постоянно пропускать в прямом направлении. Величина максимально допустимого прямого тока равна 70 % от тока теплового пробоя. По прямому току диоды делятся на три группы:

- 1) малой мощности ($I_{пр.мах} < 0,3$ А);
- 2) средней мощности ($0,3 < I_{пр.мах} < 10$ А);
- 3) большой мощности ($I_{пр.мах} > 10$ А).

Диоды малой мощности не требуют дополнительного теплоотвода (тепло отводится с помощью корпуса диода). Для диодов средней и большой мощности, которые слабо отводят тепло своими корпусами, требуется дополнительный теплоотвод (радиатор – кубик металла, в котором с помощью литья или фрезерования делают шипы, в результате чего возрастает поверхность теплоотвода. Материал – медь, бронза, алюминий, силумин).

– *Постоянное прямое напряжение $U_{пр}$* – это падение напряжения между анодом и катодом при протекании максимально допустимого прямого постоянного тока. Постоянное прямое напряжение зависит от материала диодов. Так, для германиевых диодов $U_{пр.Ге} \approx (0,3 - 0,5)$ В, а для кремниевых – $U_{пр.Си} \approx (0,5 - 1)$ В.

Германиевые диоды маркируют сочетанием букв ГД (1Д), кремниевые – КД (2Д).

– *Максимально допустимое обратное напряжение*

$$U_{обр.мах} = 0,7 U_{эл.пробоя.}$$

При импульсном обратном напряжении электрический пробой идет по амплитудному значению импульса.

– *Максимальный обратный ток диода $I_{обр.мах}$* – это обратный ток диода при максимальном обратном напряжении (составляет единицы мА). Для кремниевых диодов максимальный обратный ток в два раза меньше, чем для германиевых.

– *Дифференциальное (динамическое) прямое и обратное сопротивление диода*

$$R_{Д.пр.} = \frac{\Delta U_{пр.}}{\Delta I_{пр.}}, \quad R_{Д.обр.} = \frac{\Delta U_{обр.}}{\Delta I_{обр.}}$$

– *Максимально допустимая мощность рассеивания $P_{доп.мах}$* – мощность, при которой переход разогревается до максимально допустимой температуры.

Конструктивно диоды бывают *плоскостные и точечные*. Основу любого диода составляет кристалл полупроводника *n*-типа, который называют базой. Его припаивают к металлической пластине, называемой кристаллодержателем.

Плоскостные диоды. Для плоскостного диода на базу накладывается материал акцепторной примеси и в вакуумной печи при температуре порядка 500 °С происходит диффузия акцепторных примесей в базу диода. При этом в части кристалла полупроводника образуется область *p*-типа, а на границе областей *n*- и *p*-типов образуется плоский *p-n*-переход относительно большой площади (рис. 11.10).

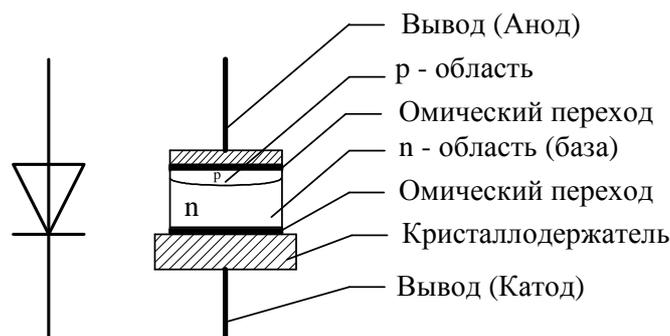


Рис. 11.10. Конструкция плоскостных диодов

Большая площадь *p-n*-перехода позволяет диоду пропускать большие прямые токи, но из-за большой паразитной емкости конструкции такие диоды могут работать только на низких частотах.

Точечные диоды. В базу точечного диода вплавляют иглу из тонкой вольфрамовой проволоки, легированную атомами акцепторной примеси,

пропуская через нее импульсы тока силой до 1 А. Точка контакта с базой разогревается и атомы акцепторных примесей переходят в базу. Вокруг точки контакта образуется p -область в виде полусферы (рис. 11.11).

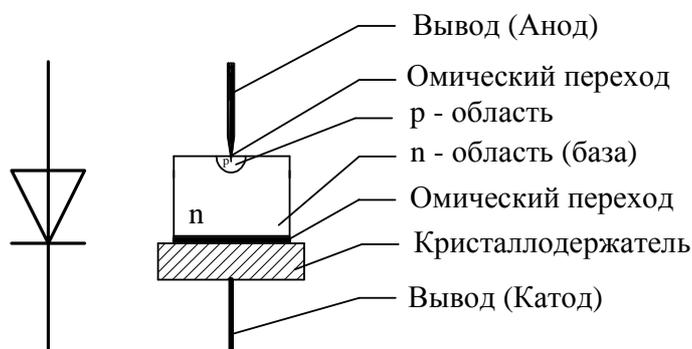


Рис. 11.11. Конструкция точечного диода

На границе раздела областей n - и p -типов образуется p - n -переход очень малой площади, поэтому такие диоды и называют точечными. Из-за малой площади перехода они могут пропускать только малые токи, но зато могут использоваться на высоких частотах, т.к. обладают малой паразитной емкостью.

Стабилитроны. Стабилитрон – это разновидность диода, предназначенного для стабилизации уровня постоянного напряжения. Поэтому их часто называют *опорными диодами*. Конструктивно стабилитрон представляет собой кремниевый плоскостной диод. Особенностью стабилитрона является то, что на обратной ветви его вольт-амперной характеристики имеется участок, на котором напряжение очень слабо зависит от величины протекающего через стабилитрон тока (рис. 11.12). Этот участок и является рабочим для стабилитрона.

Работа стабилитрона основана на явлении электрического пробоя p - n -перехода при обратном включении. Материалы, используемые для создания p - n -перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. Поэтому напряженность электрического поля в p - n -переходе значительно выше, чем у обычных диодов. В результате при небольших обратных напряжениях в p - n -переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой (лавинный или туннельный). В этом режиме, в пределах рабочего диапазона токов, нагрев диода не носит лавинообразного характера и электрический пробой не переходит в тепловой. Тепловой пробой развивается ниже точки B , когда рассеиваемая стабилитроном мощность превысит максимально допустимую.

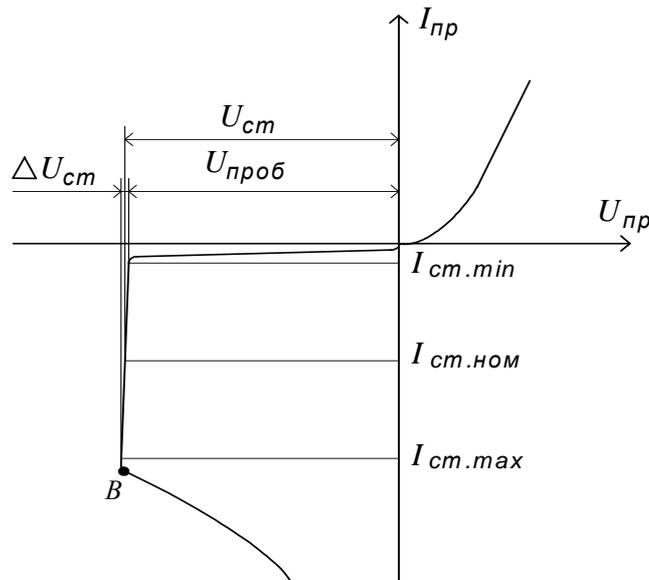


Рис. 11.12. Вольт-амперная характеристика стабилизатора

Основные параметры полупроводниковых стабилизаторов:

- Напряжение стабилизации $U_{см}$ – падение напряжения на стабилизаторе при протекании заданного тока стабилизации.
- Максимальный ток стабилизации $I_{см.мах}$.
- Минимальный ток стабилизации $I_{см.мин}$.
- Изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{см}$ при изменении тока стабилизатора в диапазоне от $I_{см.мин}$ до $I_{см.мах}$.
- Максимально допустимая мощность рассеивания $P_{доп.мах}$.
- Дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $R_{диф}$:

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{см}}{\Delta I_{см}} = \frac{\Delta U_{см}}{I_{см.мах} - I_{см.мин}}.$$

Дифференциальное сопротивление характеризует степень наклона рабочего участка вольт-амперной характеристики.

Условное графическое изображение и обозначение стабилизаторов приведено на рис. 1.13.

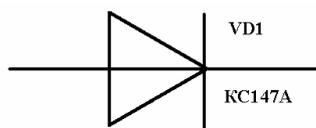


Рис. 11.3. Обозначение стабилизатора.
В маркировке стабилизатора вторая буква – С

Практическое применение стабилитроны находят в стабилизаторах напряжения, в ограничителях электрических сигналов по напряжению и др.

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводниковый диод? Его назначение и применение.
2. Изобразите ВАХ полупроводникового диода и перечислите его основные параметры.
3. Назовите виды конструкций полупроводниковых диодов и их влияние на параметры диодов.
4. На какие классы подразделяются диоды по мощности?
5. Что такое полупроводниковый стабилитрон? Его назначение и применение.
6. Чем отличается стабилитрон от обычного диода?
7. В чем особенность ВАХ стабилитрона?
8. Условные графические обозначения и маркировка полупроводниковых диодов.

11.5. Биполярные транзисторы

Транзистором называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, пригодный для усиления мощности и имеющий три или более выводов.

Биполярными называют транзисторы, имеющие два и более p - n -переходов, и в которых используются заряды обоих знаков (электроны и дырки).

Наиболее распространены транзисторы с двумя p - n -переходами, представляющие собой трехслойную полупроводниковую структуру типов p - n - p или n - p - n . Транзисторы с p - n - p -структурой называются транзисторами прямой проводимости, или транзисторами p - n - p -типа (рис. 11.14, а). Транзисторы с n - p - n -структурой называются транзисторами обратной проводимости, или транзисторами n - p - n -типа (рис. 11.14, б).

Средняя область транзистора называется *базой* (б), одна крайняя область – *эмиттером* (э), другая – *коллектором* (к). Таким образом, в транзисторе образованы два p - n -перехода: *эмиттерный* (между эмиттером и базой) и *коллекторный* (между базой и коллектором). Базу делают очень тонкой (единицы микрон) для того, чтобы носители зарядов за время жизни могли пересечь ее, и кроме того, концентрация основных носителей зарядов в базе значительно меньше, чем в эмиттере и коллекторе. Поэтому эмиттерный и коллекторный p - n -переходы являются несимметричными.

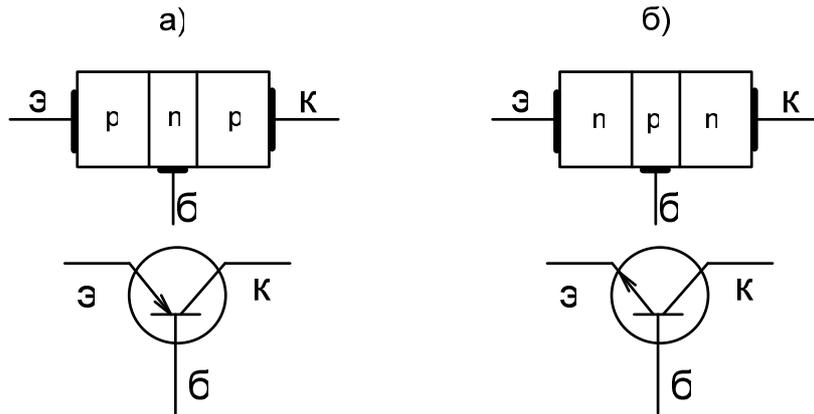


Рис. 11.14. Типы и условные графические обозначения биполярных транзисторов

Физические процессы в биполярном транзисторе. Физические процессы в транзисторе рассмотрим на примере биполярного транзистора *p-n-p*-типа. Усилительными свойствами биполярный транзистор обладает тогда, когда он включен в *активном режиме*, а для этого эмиттерный *p-n*-переход должен быть включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (рис. 11.15).

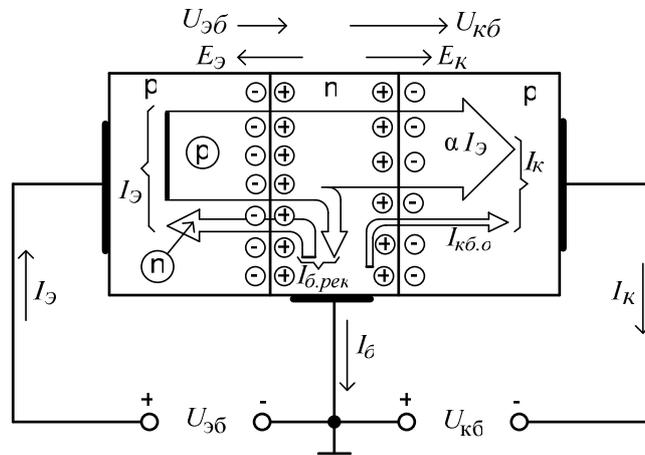


Рис. 11.15. Включение транзистора в активном режиме

В результате снижения потенциального барьера на эмиттерном переходе дырки из области эмиттера диффундируют через *p-n*-переход в область базы (инжекция дырок), а электроны – из области базы в эмиттер. Так как концентрация дырок в эмиттере значительно больше концентрации электронов в базе, то дырочный поток носителей зарядов преобладает над электронным.

Все электроны, инжектированные из базы в эмиттер, рекомбинируют с дырками, а дырки, инжектированные из эмиттера в базу, лишь частично рекомбинируют с электронами, т.к. электронов в базе много меньше и область базы тонкая. Поэтому большая часть инжектированных в базу дырок под действием градиента концентрации пересекает базу и достигает коллекторного перехода. Уход электронов из базы за счет инжекции в эмиттер и рекомбинации с дырками в базе восполняется приходом электронов от источника $U_{эб}$ и во внешней цепи возникает ток $I_{б.рек}$.

Большая часть дырок, инжектированных в базу, достигает коллекторного перехода, подхватывается ускоряющим полем этого перехода и перебрасывается (экстрагирует) в коллектор. Этот поток дырок создает ток $\alpha I_э$, который называют управляемым током коллектора $I_к$, а α – коэффициент передачи эмиттерного тока.

Кроме того, через коллекторный p - n -переход, смещенный в обратном направлении, протекает обратный неуправляемый ток $I_{кб.о}$, создаваемый неосновными носителями зарядов и направленный из базы в коллектор. Поэтому результирующий ток коллекторной цепи получим в виде (рис. 11.15)

$$I_к = \alpha I_э + I_{кб.о}.$$

В цепи базы протекают два встречных тока (рис. 11.15) $I_{б.рек}$ и $I_{кб.о}$, тогда результирующий ток базы:

$$I_б = I_{б.рек} - I_{кб.о}.$$

Полный ток в цепи эмиттера можно представить в виде (рис. 11.15)

$$I_э = \alpha I_э + I_{б.рек}.$$

Складывая между собой токи $I_к$ и $I_б$, получим:

$$I_к + I_б = \alpha I_э + I_{кб.о} + I_{б.рек} - I_{кб.о} = \alpha I_э + I_{б.рек} = I_э.$$

В результате получаем основное уравнение токов для биполярных транзисторов:

$$I_э = I_к + I_б.$$

Усилительные свойства транзистора определяются значением коэффициента α . Чем ближе α к единице, тем выше усилительные свойства. Реальные значения α чаще всего лежат в пределах (0,9 – 0,99).

Физические процессы в транзисторе n - p - n -типа аналогичны, но противоположны.

Схемы включения биполярных транзисторов. Схемы включения транзисторов получили свои названия в зависимости от того, какой из вы-

водов транзистора является общим для входной и выходной цепи. Поэтому существуют три схемы включения транзистора: схема с общей базой (ОБ), схема с общим эмиттером (ОЭ) и схема с общим коллектором (ОК).

Схема включения транзистора по схеме с общей базой (ОБ) приведена на рис. 11.16.

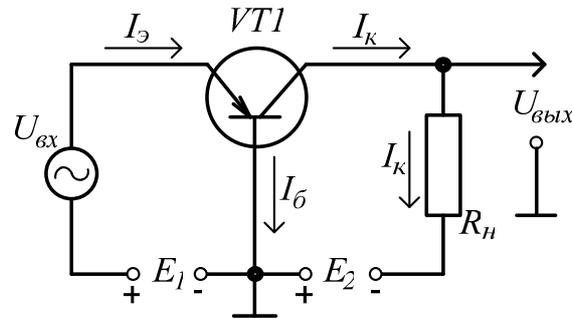


Рис. 11.16. Включение транзистора по схеме с общей базой (ОБ)

Для схемы включения транзистора с ОБ характерны следующие основные показатели:

- Коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}.$$

Для этой схемы входным током является $I_{\text{э}}$, а выходным током – $I_{\text{к}}$. Тогда:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} = \frac{\alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб.о}}}{I_{\text{э}}} = \alpha + \frac{I_{\text{кб.о}}}{I_{\text{э}}} \approx \alpha < 1.$$

Поэтому для схемы с ОБ $K_i = \alpha$ и он меньше единицы, т.к. $I_{\text{к}} < I_{\text{э}}$.

- Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}.$$

Обычно $K_u < 100$.

- Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

Обычно $K_p < 100$.

- Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{\text{эб}}/I_{\text{э}}.$$

Поскольку $I_{\text{э}}$ достаточно большой, то $R_{\text{вх}}$ мало и составляет десятки Ом.

- Между входным и выходным напряжениями наблюдается сдвиг по фазе примерно π , т.е. практически они в противофазе.

К недостаткам схемы включения транзистора с ОБ нужно отнести необходимость использования двух разнополярных источников напряжения для питания схемы.

Достоинством такой схемы включения транзистора являются хорошие частотные свойства и слабое влияние температуры.

Схема включения транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ) приведена на рис. 11.17.

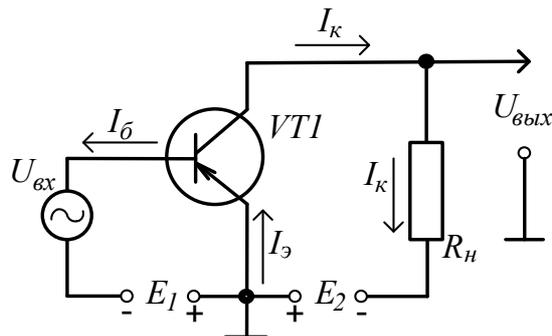


Рис. 11.17. Включение транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ)

Для схемы включения транзистора с ОЭ характерны следующие основные показатели:

- Коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}.$$

Для этой схемы входным током является $I_{\text{б}}$, выходным – $I_{\text{к}}$. Тогда

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}; I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб.о}} = \alpha I_{\text{к}} + \alpha I_{\text{б}} + I_{\text{кб.о}}.$$

Из последнего выражения выразим $I_{\text{к}}$:

$$I_{\text{к}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{\text{б}} + \frac{1}{1-\alpha} I_{\text{кб.о}}.$$

Тогда коэффициент усиления по току для схемы с ОЭ:

$$K_i = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{1 \cdot I_{\text{кб.о}}}{(1-\alpha) \cdot I_{\text{б}}} \approx \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta > 1.$$

Реальные значения β для транзисторов с ОЭ от 10 до 100 и более.

- Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}.$$

Обычно $K_u < 100$.

- Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

Обычно $K_p > 100$.

- Входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}} = U_{\text{бэ}}/I_{\text{б}}.$$

Поскольку $I_{\text{б}}$ достаточно мал, то $R_{\text{вх}}$ значительно больше, чем для схемы с ОБ, и составляет сотни Ом.

У транзисторов с ОЭ хуже частотные свойства и больше проявляется влияние температуры. Между входным и выходным напряжениями наблюдается сдвиг по фазе примерно π , т.е. практически они в противофазе.

Достоинством такой схемы включения транзистора являются значительно большие коэффициенты усиления по току и по мощности. Для питания схемы нужны также два источника напряжения, но однополярных, что на практике позволяет обойтись одним источником напряжения.

Схема включения транзистора по схеме с общим коллектором (ОК) приведена на рис. 11.18.

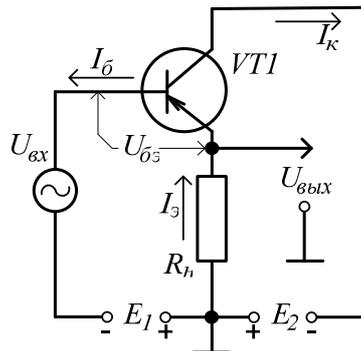


Рис. 11.18. Включение транзистора по схеме с общим коллектором (ОК)

Для схемы включения транзистора с ОК характерны следующие основные показатели:

- Коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}.$$

Для этой схемы входным током является $I_{\text{б}}$, выходным – $I_{\text{э}}$. Тогда:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}}; \quad I_{\text{к}} = \alpha I_{\text{э}} + I_{\text{кб.о}}.$$

Из этих выражений выразим $I_{\text{э}}$:

$$I_{\text{э}} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{\text{б}} + \frac{1}{1 - \alpha} I_{\text{кб.о}}.$$

Тогда коэффициент усиления по току для схемы с ОЭ:

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} = \frac{I_k}{I_{\bar{\sigma}}} = \frac{1}{1-\alpha} + \frac{1 \cdot I_{кб.о}}{(1-\alpha) \cdot I_{\bar{\sigma}}} \approx \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1 > 1.$$

– Коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{вых}/U_{вх}.$$

Обычно $K_u < 1$.

– Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{вых}/P_{вх}.$$

Обычно $K_p > 100$.

– Входное сопротивление

$$R_{вх} = U_{вх}/I_{вх} = U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}}/I_{\bar{\sigma}}.$$

Поскольку R_n включено в цепь эмиттера, то $R_{вх} = r_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}} + (\beta + 1) R_n$.

Достоинством такой схемы включения транзистора является большое входное и небольшое выходное сопротивление, поэтому такое включение применяют для согласования различных нагрузок и источников сигналов с усилительными каскадами.

Особенностью схемы включения транзистора с ОК является отсутствие сдвига по фазе между входным и выходным напряжениями.

При включении также можно обойтись одним источником питания.

Характеристики биполярных транзисторов. Характеристики транзисторов используются для практических расчетов транзисторных схем. Каждая схема включения транзистора имеет свои входные и выходные характеристики. Из всех схем включения транзисторов самое массовое применение находит схема с ОЭ. Поэтому характеристики рассмотрим только для схемы с ОЭ.

Поскольку напряжения и токи транзисторов типа $p-n-p$ и $n-p-n$ имеют разные знаки, но характеристики аналогичны по виду, то их удобнее представлять в положительных осях, учитывая, что для $p-n-p$ транзисторов знаки следует поменять на противоположные.

Входная характеристика для схемы с ОЭ представляет собой зависимость вида $I_{\bar{\sigma}} = f(U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ (рис. 11.19).

Так как входная характеристика относится к эмиттерному переходу, который работает при прямом напряжении, то вид входной характеристики аналогичен прямой ветви вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода.

При $U_{кэ} = 0$ коллектор и эмиттер замкнуты накоротко и напряжение $U_{\bar{\sigma}\bar{\sigma}}$ приложено к обоим параллельно включенным переходам. В результате входная характеристика представляет собой прямую ветвь вольт-амперной

характеристики двух параллельно включенных $p-n$ -переходов, и начинается из начала системы координат.

При $U_{кэ} > 0$ коллекторный переход включается на обратное напряжение и появляется обратный ток перехода $I_{кб.о}$. В результате входная характеристика немного сдвигается вниз и вправо.

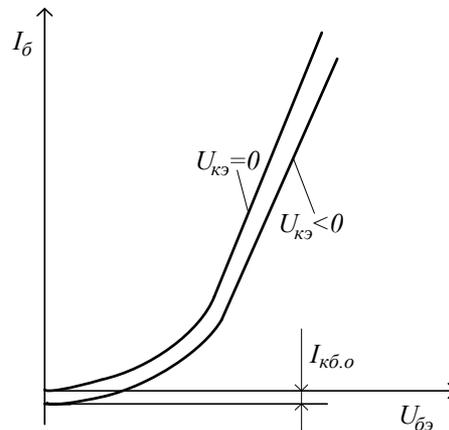


Рис. 11.19. Входная характеристика транзистора для схемы с ОЭ

Выходная характеристика для схемы с ОЭ представляет собой зависимость вида $I_к = f(U_{кэ})$, при $I_б = \text{const}$ (рис. 11.20).

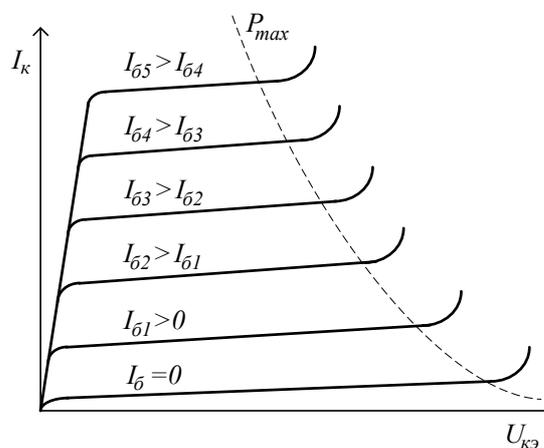


Рис. 11.20. Семейство выходных характеристик транзистора для схемы с ОЭ

Так как выходная характеристика относится к коллекторному переходу, который работает при обратном напряжении, то вид выходной характеристики аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики $p-n$ -перехода.

При $I_б = 0$ цепь базы разомкнута, эмиттерный переход включен в прямом направлении и не мешает прохождению тока через коллекторный

переход, включенный в обратном направлении. В результате выходная характеристика представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики p - n -перехода, и начинается из начала системы координат.

При $I_{\bar{o}} > 0$ выходная характеристика располагается выше, чем при $I_{\bar{o}} = 0$, и тем выше, чем больше $I_{\bar{o}}$. Увеличение тока базы вызывает инжекцию основных носителей зарядов, увеличивается ток эмиттера $I_{\bar{e}}$, и, как следствие, увеличивается ток коллектора $I_{\bar{k}}$. Благодаря линейной зависимости между токами транзистора пологие участки соседних выходных характеристик располагаются почти равномерно по вертикали при равномерном изменении тока базы $I_{\bar{o}}$.

С увеличением напряжения $U_{\bar{k}\bar{e}}$ от нуля до небольших значений (десятые доли вольта) ток коллектора $I_{\bar{k}}$ резко растет, но при дальнейшем увеличении $U_{\bar{k}\bar{e}}$ характеристика плавно переходит на пологий участок с медленным ростом $I_{\bar{k}}$. На крутом участке характеристики с ростом $U_{\bar{k}\bar{e}}$ резко уменьшается нейтральная толщина базы между запирающими слоями эмиттерного и коллекторного переходов, при этом резко сокращается процесс рекомбинации инжектированных в базу основных носителей зарядов, и, как следствие, резко растет ток $I_{\bar{k}}$. На пологом участке характеристики напряжение $U_{\bar{k}\bar{e}}$ уже достигло такого значения, при котором запирающие слои эмиттерного и коллекторного переходов смыкаются, и тогда все инжектированные в базу основные носители зарядов участвуют в создании тока коллектора $I_{\bar{k}}$. Так как количество инжектированных в базу основных носителей зарядов ограничено током базы ($I_{\bar{o}} = \text{const}$), то характеристика переходит на пологий участок с небольшим ростом $I_{\bar{k}}$ за счет неосновных носителей зарядов.

При дальнейшем увеличении $U_{\bar{k}\bar{e}}$ наступает пробой коллекторного перехода. Область пробоя ограничена пунктирной линией P_{max} . Из характеристик видно, что чем больше $I_{\bar{k}}$, тем при меньших значениях $U_{\bar{k}\bar{e}}$ наступает пробой. Это происходит потому, что максимальная мощность, рассеиваемая транзистором, $P_{\text{max}} = I_{\bar{k}} \cdot U_{\bar{k}\bar{e}} = \text{const}$, и превышать ее нельзя.

Основные параметры биполярных транзисторов. К основным параметрам биполярных транзисторов относятся:

- коэффициенты усиления по току: $\alpha(h_{21\bar{o}})$ (для схемы с ОБ) и $\beta(h_{21\bar{e}})$ (для схемы с ОЭ);
- обратный ток коллекторного перехода при заданном обратном напряжении $I_{\bar{k}\bar{o}}$ при $I_{\bar{e}} = 0$;
- максимально допустимый ток коллектора $I_{\bar{k},\text{max}}$;
- максимальная мощность, рассеиваемая коллекторным переходом, $P_{\bar{k},\text{max}}$;

- предельная частота передачи тока эмиттера f_α , на которой значение α уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с низкочастотным значением α ;
- емкость коллекторного перехода $C_{кб}$.

Контрольные вопросы

1. Что такое биполярный транзистор? Виды транзисторов, их назначение.
2. Какие физические процессы протекают в биполярном транзисторе?
3. Запишите основное уравнение токов для биполярного транзистора.
4. Нарисуйте основные схемы включения биполярных транзисторов и перечислите их основные свойства.
5. Что такое входная характеристика транзистора для схемы с ОЭ? Ее графическое представление.
6. Что такое выходные характеристики транзистора для схемы с ОЭ? Ее графическое представление.
7. Перечислите основные параметры биполярных транзисторов.
8. Условные графические обозначения и маркировка биполярных транзисторов.

11.6. Полевые (униполярные) транзисторы

Полупроводниковые приборы, работа которых основана на изменении сопротивления полупроводникового материала поперечным электрическим полем, называют *полевыми транзисторами*. В создании электрического тока у них участвуют носители заряда только одного типа (электроны или дырки).

Полевые транзисторы бывают двух видов: с управляющим p - n -переходом и со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзисторы, или транзисторы с изолированным затвором).

Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом. Структуры построения таких транзисторов с каналами n - и p -типа и их подключение приведены на рис. 11.21. Принцип действия такого полевого транзистора рассмотрим на примере транзистора с n -каналом (рис. 11.21, а).

Транзистор построен на основе кристалла полупроводника n -типа, с двух противоположных сторон которого изготовлены две p -области. Выводы p -областей соединены вместе и образуют управляющий электрод, называемый затвором (З). На границах раздела полупроводников n - и p -типа

образуются запирающие слои p - n -переходов, обладающие высоким сопротивлением.

Часть области n -типа, заключенная между запирающими слоями p - n -переходов, называется каналом с начальной шириной a при $U_{зи} = 0$. Если к выводам канала подключить внешний источник постоянного напряжения, то в канале создается продольное электрическое поле, под действием которого электроны (основные носители заряда) в канале перемещаются к положительному полюсу источника напряжения.

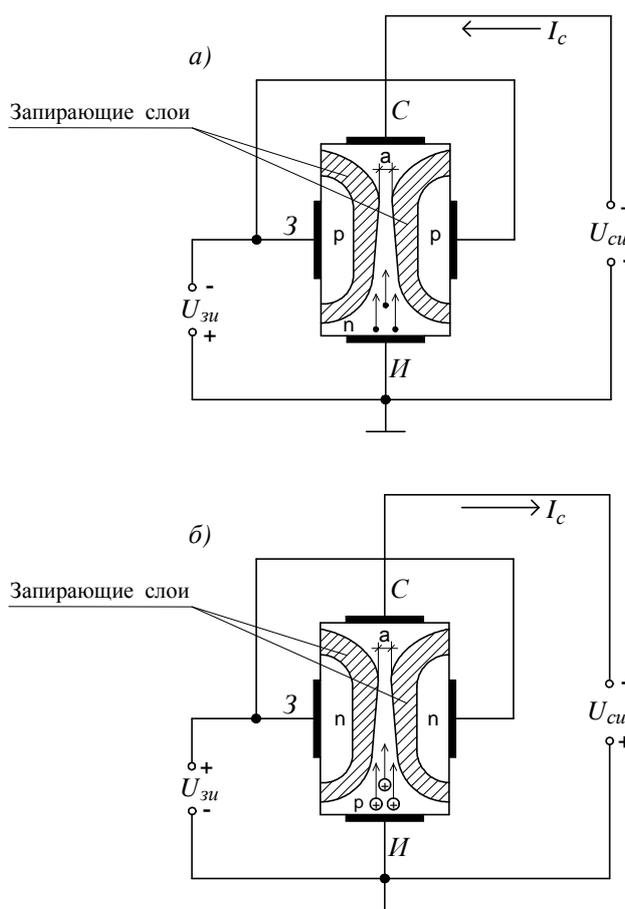


Рис. 11.21. Структура и подключение полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом с каналами n - и p -типа

Область канала, из которой начинают движение основные носители заряда, называется истоком (И); область канала, в которую движутся основные носители заряда, – стоком (С). Аналогично называются выводы транзистора. В результате движения основных носителей заряда (в данном случае электронов) и в канале и во внешней цепи возникает ток стока I_c .

На затвор (3) относительно истока (И) подается напряжение $U_{зи}$, смещающее p - n -переходы в обратном направлении. При увеличении на-

пряжения $U_{зи}$ обратное напряжение на p - n -переходах увеличивается, запирающие слои расширяются, и сечение канала уменьшается. При этом сопротивление канала увеличивается, а ток стока I_c уменьшается. Таким образом, изменяя напряжение $U_{зи}$ можно управлять током канала.

При дальнейшем увеличении напряжения $U_{зи}$ может произойти смыкание запирающих слоев p - n -переходов и канал перекрывается. Если $U_{си} = 0$, то напряжение $U_{зи}$, при котором наступает перекрытие канала, называется напряжением отсечки и обозначается $U_{зи\text{ отс}}$.

Для эффективного управления сечением канала запирающий слой p - n -перехода в основном должен располагаться в исходном полупроводнике. Это достигается выбором концентраций примесей таким образом, чтобы $N_a \gg N_d$.

Но сечение канала зависит не только от $U_{зи}$, но и от протекающего по каналу тока I_c . Если $U_{си} \neq 0$ и в канале проходит ток стока I_c , то на распределенном сопротивлении канала создается падение напряжения, из-за которого сечение канала вдоль канала изменяется (сужается по направлению к стоку). Это происходит потому, что напряжение между затвором и областью стока больше, чем напряжение между затвором и областью истока.

Входное сопротивление полевого транзистора с управляющим p - n -переходом очень велико, т.к. управляющий p - n -переход всегда включен в обратном направлении. Поэтому в цепи затвора проходит небольшой ток $I_з$ (около 10^{-8} А). Большое входное сопротивление полевых транзисторов является существенным преимуществом по сравнению с биполярными транзисторами.

Условные графические обозначения полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом приведены на рис. 11.22.

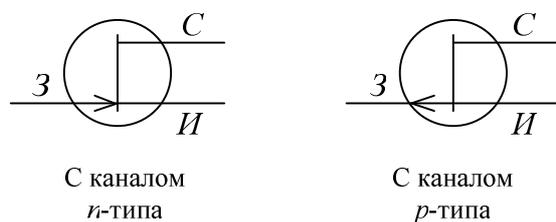


Рис. 11.22. Условные графические обозначения полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом

Схемы включения полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом. Схемы включения транзисторов получили свои названия в зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепи. Поэтому существуют три схемы включения транзи-

стора: схема с общим затвором (ОЗ), схема с общим истоком (ОИ) и схема с общим стоком (ОС).

Из всех схем включения наибольшее практическое применение находит схема с общим истоком (ОИ) (рис. 11.23).

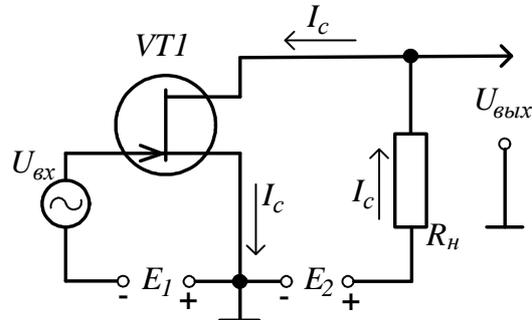


Рис. 11.23. Схема включения полевого транзистора с ОИ

По своим свойствам она похожа на схему включения биполярного транзистора с ОЭ, т.е. максимальные коэффициенты усиления по напряжению K_u и по мощности K_p , π – сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями, но значительно большее входное сопротивление.

Также практическое применение находит схема включения полевого транзистора с общим стоком (ОС) (рис. 11.24).

По своим свойствам она похожа на схему включения биполярного транзистора с ОК, т.е. коэффициент усиления по напряжению $K_u \approx 1$, а по мощности $K_p > 1$, нулевой сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями. То есть это стоковый повторитель.

Характеристики полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом. Характеристики транзисторов используются для практических расчетов транзисторных схем. Каждая схема включения транзистора имеет свои входные и выходные характеристики. Из всех схем включения транзисторов самое массовое применение находит схема с общим истоком ОИ. Поэтому характеристики рассмотрим только для схемы с ОИ.

Выходная (стоковая) характеристика полевого транзистора с управляющим p-n-переходом для схемы с ОИ представляет собой зависимость вида $I_c = f(U_{cu})$, при $U_{zu} = \text{const}$ (рис. 11.25).

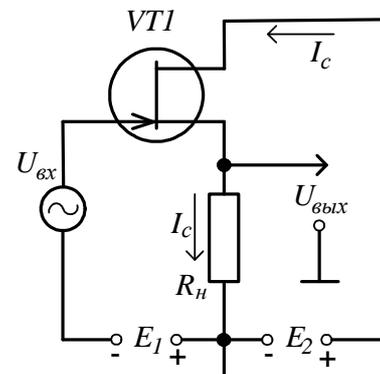


Рис. 11.24. Схема включения полевого транзистора с ОС

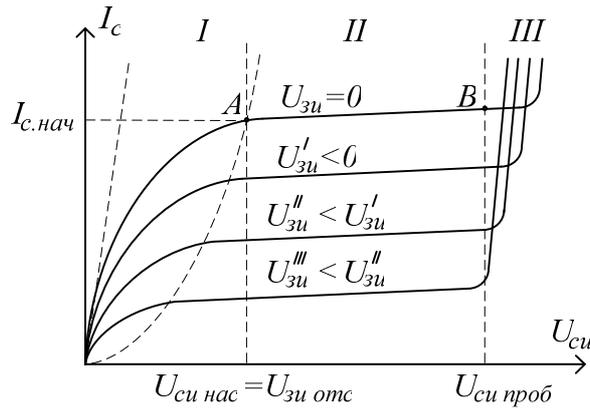


Рис. 11.25. Семейство выходных характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом для схемы с ОИ

Рассмотрим характеристику при $U_{zu} = 0$. Если бы сопротивление канала не зависело от тока I_c , то стоковая характеристика была бы прямой линией (пунктирная прямая из начала координат на рис. 11.25). Но ток стока I_c проходя по каналу создает на распределенном сопротивлении канала падение напряжения, из-за которого сечение канала с приближением к стоку уменьшается. В результате сопротивление канала увеличивается и рост I_c замедляется (участок I характеристики).

При некотором $|U_{ci\text{ нас}}| = |U_{zu\text{ омс}}|$ происходит перекрытие канала в области стока (точка A на рис. 11.25), и характеристика переходит на пологий участок насыщения (участок II характеристики). Ток стока, при котором происходит перекрытие канала, называют начальным $I_{c.nac}$. Полного перекрытия канала путем увеличения напряжения U_{ci} получить нельзя, т.к. само перекрытие является следствием прохождения тока I_c . В результате автоматически устанавливается некоторое малое сечение канала. С дальнейшим ростом напряжения U_{ci} увеличивается длина перекрытой части канала пропорционально $\sqrt{U_{ci}}$. Поэтому с ростом U_{ci} длина перекрытой части канала растет медленнее, и наблюдается медленный рост тока.

При некотором U_{ci} наблюдается резкое увеличение тока I_c , что говорит о пробое (участок III характеристики).

Если к затвору приложить напряжение U_{zu} , смещающее p - n -переход в обратном направлении, то перекрытие канала наступит раньше при меньшем значении U_{ci} , т.к. $|U_{I_{c1}\text{ нас}}| + |U_{zu}| = |U_{zu\text{ омс}}|$. В результате характеристики смещаются вниз.

Напряжение пробоя между стоком и затвором определяется суммарным напряжением:

$$U_{ci.проб} = (|U_{zu}| + |U_{ci}|)_{проб} = \text{const}.$$

Поэтому с ростом напряжения $U_{зи}$ пробой наступает при меньшем значении напряжения $U_{си}$ (участок III характеристики).

Характеристика передачи (сток-затворная характеристика) полевого транзистора с управляющим p - n -переходом для схемы с ОИ представляет собой зависимость вида $I_c = f(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$ в режиме перекрытия канала (рис. 11.26).

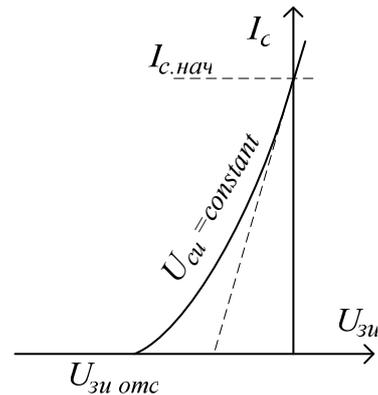


Рис. 11.26. Характеристика передачи (сток-затворная характеристика) полевого транзистора с управляющим p - n -переходом для схемы с ОИ

Эта характеристика может быть получена экспериментально или путем перестроения сток-затворных характеристик. При напряжении $U_{зи} = 0$ через канал проходит ток $I_{c.нач}$, но при подаче на затвор отрицательных напряжений $U_{зи} < 0$, смещающих p - n -переход в обратном направлении, сечение канала и ток стока I_c уменьшаются, и при напряжении $U_{зи} = U_{зи\text{отс}}$ канал полностью закрывается, а ток стока становится равным $I_c = 0$.

Полевые транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы). Такие транзисторы имеют структуру *металл-диэлектрик-полупроводник*, отсюда и название – МДП-транзисторы. Затвор такого транзистора изготавливается в виде металлической пластины, которая изолирована пленкой диэлектрика от кристалла полупроводника. Роль канала выполняет тонкий поверхностный слой полупроводника с измененным типом электропроводности. В транзисторах, изготовленных на основе кремния, в качестве диэлектрика используют двуокись кремния (SiO_2).

По способу образования канала МДП-транзисторы бывают двух видов:

- с индуцированным каналом;
- со встроенным каналом.

МДП-транзисторы с индуцированным каналом. Структура построения такого транзистора с каналом p -типа и его подключение приведены на рис. 11.27.

В полупроводнике n -типа, называемом подложкой, методом локальной диффузии образованы две p^+ -области, не имеющие между собой элек-

трического соединения. Одна из них – исток (И), другая – сток (С). Эти две области отделены друг от друга двумя встречно включенными p - n -переходами, образованными на границах p - и n -областей. Поэтому если между истоком и стоком включить напряжение U_{cu} , то в цепи пойдет очень малый ток, который является обратным током p - n -перехода.

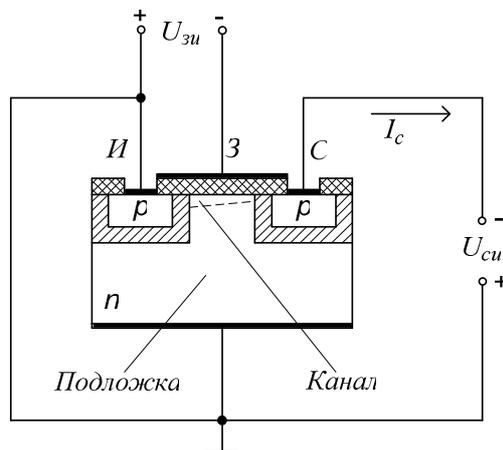


Рис. 11.27. Структура и подключение МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа

Если к металлическому затвору приложить отрицательное напряжение относительно истока, соединенного с подложкой, $U_{zu} < 0$, то под действием электрического поля под затвором начнется отталкивание электронов от поверхности полупроводника в глубь кристалла подложки и притягивание дырок. В результате этого процесса в приповерхностном слое уменьшается концентрация электронов и увеличивается концентрация дырок.

При некоторой значительной величине отрицательного напряжения U_{zu} концентрация дырок в приповерхностном слое может превысить концентрацию электронов. Происходит изменение типа электропроводности этого слоя. При этом слой с инверсной дырочной электропроводностью соединяет между собой p^+ -области истока и стока и отделен от полупроводника n -типа запирающим слоем нового p - n -перехода, образовавшегося на границе между приповерхностным слоем с инверсной дырочной электропроводностью, и n -областью подложки. Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называют *пороговым напряжением* $U_{zu.пор}$.

Если между стоком и истоком включить напряжение $U_{cu} < 0$, то по образовавшемуся каналу пойдет ток стока I_c , который создается движением дырок. При прохождении тока I_c по каналу на распределенном сопротивлении канала создается падение напряжения. В результате с приближением к стоку напряжение между затвором и каналом уменьшается, сечение

канала тоже уменьшается. Таким образом, у истока сечение канала больше, у стока – меньше.

При увеличении отрицательного напряжения $U_{зи}$ глубина проникновения инверсного слоя в полупроводник увеличивается, сечение канала тоже увеличивается, соответственно увеличиваются электропроводность канала и ток стока I_c .

При уменьшении отрицательного напряжения на затворе $U_{зи}$ до значений $|U_{зи}| < |U_{зи\ пор}|$ произойдет приток электронов к поверхности кристалла полупроводника, концентрация электронов превысит концентрацию дырок и инверсный дырочный слой исчезнет, а p^+ -области истока и стока окажутся разделенными областью полупроводника с электропроводностью n -типа. Тогда ток I_c уменьшится до значения обратного тока встречно включенных p - n -переходов.

Выходные (стоковые) характеристики МДП-транзистора с индуцированным p -каналом для схемы с ОИ приведены на рис. 11.28. Это характеристики вида $I_c = f(U_{си})$, при $U_{зи} = \text{const}$.

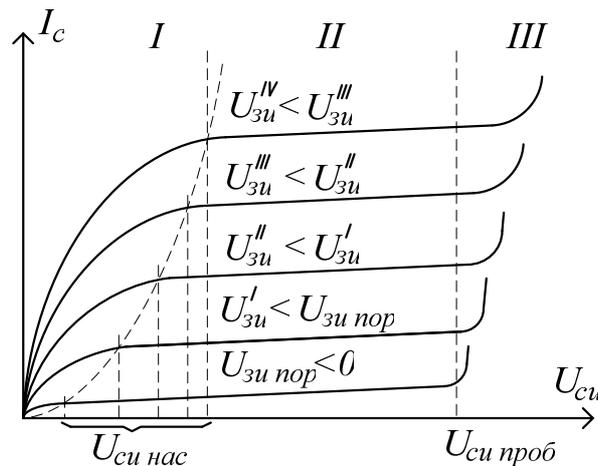


Рис. 11.28. Выходные (стоковые) характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом

Стоковые характеристики этого транзистора отличаются от стоковых характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом только расположением характеристик. Для МДП-транзистора с индуцированным p -каналом чем более отрицательным является напряжение $U_{зи}$, тем шире сечение канала и больше I_c и тем выше расположена характеристика. Самая нижняя характеристика соответствует напряжению $U_{зи} < U_{зи\ пор}$, а характеристика для напряжения $U_{зи} = 0$ вообще не существует. В остальном характеристики похожи, и процессы, их формирующие, аналогичны.

Характеристика передачи (сток-затворная характеристика) МДП-транзистора с индуцированным p -каналом для схемы с ОИ представляет собой зависимость вида $I_c = f(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$ в режиме перекрытия канала (рис. 11.29).

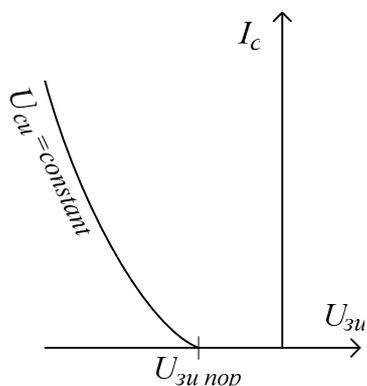


Рис. 11.29. Сток-затворная характеристика МДП-транзистора с индуцированным p -каналом для схемы с ОИ

Эти характеристики обычно приводятся для режима насыщения и могут быть получены экспериментально, либо путем перестроения стоковых характеристик. Из графика видно, что с ростом отрицательного напряжения $U_{зи}$ ток стока I_c увеличивается, это происходит потому, что инверсный слой с дырочной проводимостью глубже проникает в полупроводник, и канал расширяется.

МДП-транзисторы со встроенным каналом. Структура построения такого транзистора с каналом p -типа и его подключение приведены на рис. 11.30.

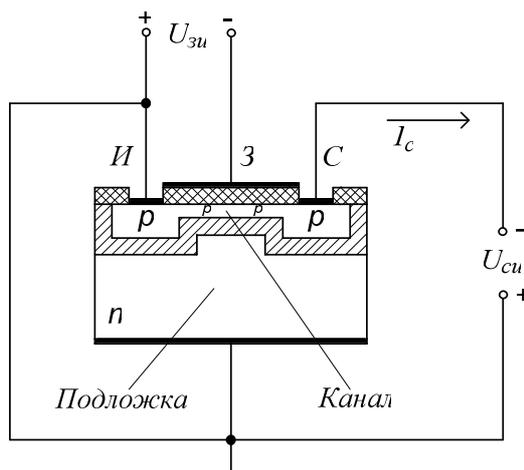


Рис. 1.30. Структура и подключение МДП-транзистора со встроенным каналом p -типа

По устройству этот транзистор аналогичен МДП-транзистору с индуцированным каналом, но отличается тем, что на этапе изготовления на

поверхности кристалла полупроводника под затвором создается тонкий приповерхностный слой с дырочной проводимостью (встроенный канал). Тогда даже при нулевом напряжении между затвором и истоком $U_{зи} = 0$ уже существует канал, соединяющий области истока и стока, и при подаче напряжения $U_{си} < 0$ в канале возникнет ток I_c . В остальном принцип действия аналогичен.

При подаче на затвор напряжения $U_{зи} < 0$ канал расширяется и ток стока I_c увеличивается, $U_{зи} > 0$ – канал сужается и ток стока I_c уменьшается. Наконец при некотором положительном напряжении $U_{зи}$ столько электронов подтянется к поверхности полупроводника, что произойдет инверсия типа электропроводности канала, т.к. концентрация электронов превысит концентрацию дырок. И тогда p^+ -области истока и стока окажутся разделенными областью полупроводника с электропроводностью n -типа, а ток I_c уменьшится до значения обратного тока встречно включенных p - n -переходов. Напряжение $U_{зи}$, при котором это происходит называется $U_{зи\text{отс}}$.

Выходные (стоковые) характеристики МДП-транзистора со встроенным p -каналом для схемы с ОИ приведены на рис. 11.31. Это характеристики вида $I_c = f(U_{си})$, при $U_{зи} = \text{const}$.

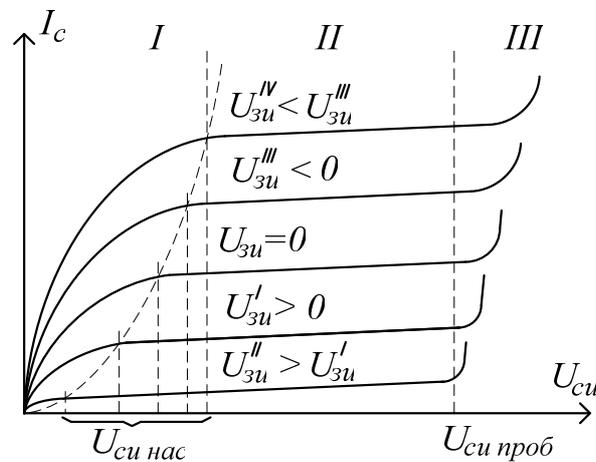


Рис. 11.31. Выходные (стоковые) характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом.

Стоковые характеристики этого транзистора отличаются от стоковых характеристик МДП-транзистора с индуцированным p -каналом только расположением характеристик. Так, характеристика для напряжения $U_{зи} = 0$ расположена в середине, т.к. встроенный канал уже существует изначально. При подаче на затвор отрицательных напряжений $U_{зи} < 0$ характеристики смещаются вверх, т.к. канал расширяется, его сопротивление уменьшается, а ток

стока I_c увеличивается. Если на затвор подавать положительные напряжения $U_{зи} > 0$, то наоборот, канал сужается, его сопротивление увеличивается, а ток стока I_c уменьшается. В остальном характеристики аналогичны.

Характеристика передачи (сток-затворная характеристика) МДП-транзистора со встроенным p -каналом для схемы с ОИ представляет собой зависимость вида $I_c = f(U_{зи})$, при $U_{си} = \text{const}$ в режиме перекрытия канала (рис. 11.32).

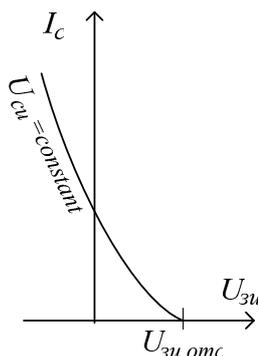


Рис. 11.32. Сток-затворная характеристика МДП-транзистора со встроенным p -каналом для схемы с ОИ

Эта характеристика отличается от аналогичной характеристики для МДП-транзистора с индуцированным p -каналом только тем, что передвинута вправо и пересекает вертикальную ось тока I_c , а напряжение $U_{зи}$ может принимать как отрицательные, так и положительные значения. Кроме того, исключается понятие порогового напряжения $U_{зи пор}$, но появляется понятие напряжения отсечки $U_{зи отс}$, это напряжение на затворе, при котором канал перекрывается и происходит инверсия типа проводимости встроенного канала.

Условные графические обозначения МДП-транзисторов. Условные графические обозначения МДП-транзисторов на принципиальных электрических схемах с разными типами каналов приведены на рис. 11.33.

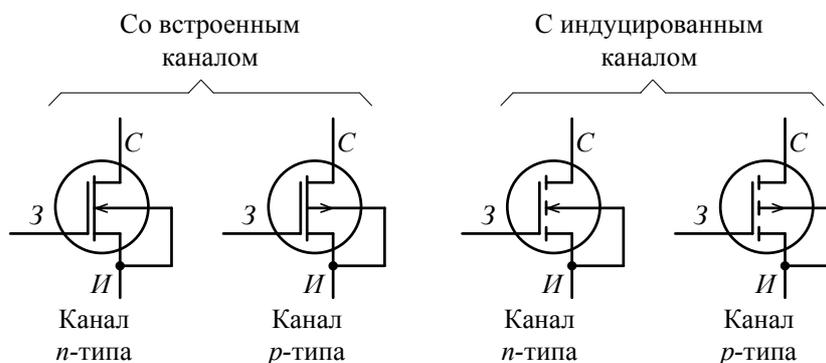


Рис. 11.33. Условные графические обозначения МДП-транзисторов

Основные параметры полевых транзисторов. К основным параметрам полевых транзисторов всех типов относятся:

– Напряжение отсечки $U_{зи\ отс}$ или пороговое напряжение $U_{зи\ пор}$ (в зависимости от типа транзистора).

– Крутизна сток-затворной характеристики S . Она показывает величину изменения тока стока I_c при изменении напряжения на затворе $U_{зи}$ на 1 в:

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

– Внутреннее (выходное) сопротивление полевого транзистора

$$R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

– Входное сопротивление полевого транзистора

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{зи}}{\Delta I_з}$$

Для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом $R_{вх} = 10^7 - 10^9$ Ом.

Для МДП-транзистора $R_{вх} = 10^{11} - 10^{14}$ Ом.

– Максимальное напряжение сток-исток $U_{си\ max}$.

– Максимальное напряжение затвор-исток $U_{зи\ max}$.

– Максимальное напряжение затвор-сток $U_{зс\ max}$.

– Максимальный ток стока $I_{c\ max}$.

– Максимальная допустимая мощность рассеивания транзистором $P_{с\ max}$.

Маркировка биполярных и полевых транзисторов. Маркировка обозначения транзисторов состоит из шести или семи элементов:

– первый элемент – буква, указывающая исходный материал: Г или 1 – германий, К или 2 – кремний, А или 3 – арсенид галлия;

– второй элемент – буква Т для биполярных, буква П – для полевых транзисторов;

– третий элемент – три или четыре цифры, показывают группу транзистора по электрическим параметрам (частотный диапазон, мощность, номер разработки и др.);

– буква на последнем месте указывает разновидность типа транзистора из данной группы.

Контрольные вопросы

1. Что такое полевой транзистор, виды транзисторов и для чего они предназначены?
2. Какие физические процессы протекают в полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом?
3. Какими основными характеристиками обладают полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом? Их графики.
4. Какие физические процессы протекают в полевом транзисторе с изолированным затвором и индуцированным каналом?
5. Какими основными характеристиками обладают полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом? Их графики.
6. Какие физические процессы протекают в полевом транзисторе с изолированным затвором и встроенным каналом?
7. Какими основными характеристиками обладают полевые транзисторы с изолированным затвором и встроенным каналом? Их графики.
8. Что такое МДП-транзисторы?
9. Назовите основные параметры полевых транзисторов.
10. Основные отличия биполярных и полевых транзисторов.
11. Условные графические обозначения и маркировка полевых транзисторов.

11.7. Тиристоры

Тиристором называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с тремя или более $p-n$ -переходами, в вольт-амперной характеристике которого имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, и который используется для переключения.

Тиристор, имеющий два вывода, называют диодным тиристором, или *динистором*, с тремя – триодным тиристором, или *тринистором*. Два параллельно и встречно включенных тиристора называют *симистором*, т.к. такая комбинация имеет симметричную вольт-амперную характеристику. Существуют неуправляемые (*диаки*) и управляемые (*триаки*) симисторы.

Тиристоры применяются в основном в качестве силовых коммутаторов в электропреобразовательных устройствах.

Устройство и принцип действия динисторов. Структура построения и подключение динистора к нагрузке приведены на рис. 11.34.

Динистор представляет собой четырехслойную полупроводниковую структуру с тремя p - n -переходами.

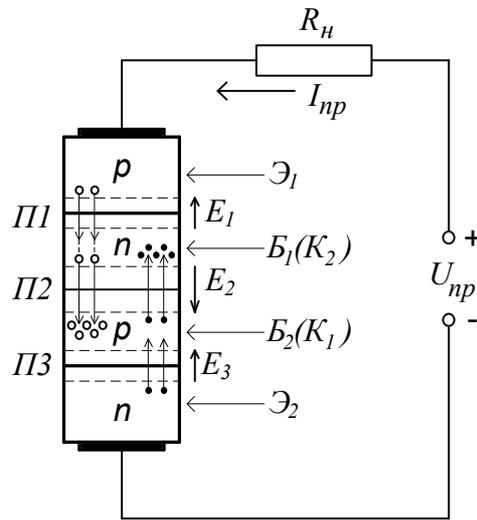


Рис. 11.34. Структура и подключение динистора

При подаче внешнего напряжения, смещающего p - n -переходы П1 и П3 в обратном направлении (обратное включение динистора), через динистор будет проходить небольшой обратный ток этих переходов, включенных последовательно, что соответствует участку I вольт-амперной характеристики динистора (рис. 11.35).

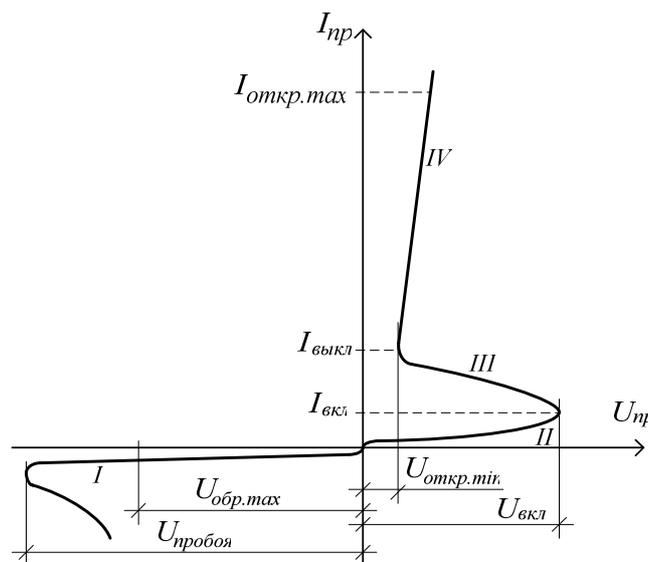


Рис. 11.35. Вольт-амперная характеристика динистора

При изменении полярности источника внешнего напряжения (прямое включение диодистора, см. рис. 11.34) переходы П1 и П3 смещаются в прямом направлении, а переход П2 смещается в обратном направлении. Через диодистор проходит ток, ограниченный обратным током перехода П2, который для переходов П1 и П3 является прямым, и через них начинается инжекция основных носителей зарядов в средние n - и p -области. Крайние p - n -переходы П1 и П3 называют эмиттерными, а средний – коллекторным. В соответствии с этим крайние n - и p -области получили названия эмиттеров, а средние n - и p -области называют базой n -типа и базой p -типа (см. рис. 11.34).

При таком включении почти все внешнее напряжение приложено к закрытому коллекторному переходу П2. При увеличении внешнего напряжения U_{np} происходит увеличение напряжения и на эмиттерных переходах П1 и П3, что вызывает увеличение инжекции через них. При этом дырки, инжектированные из p -эмиттера в n -базу под действием градиента концентрации движутся к коллекторному переходу П2 и далее электрическим полем этого перехода Е2 перебрасываются в p -базу. Дальнейшему прохождению дырок препятствует электрическое поле Е3 перехода П3. Поэтому в p -базе происходит накопление положительного избыточного заряда. Аналогично происходит накопление отрицательного избыточного заряда в n -базе.

В результате накопления избыточных зарядов в n - и p -базах снижается потенциальный барьер коллекторного перехода П2 и ток через диодистор несколько увеличивается (участок II характеристики, см. рис. 11.35).

При напряжении на диодисторе $U_{np} = U_{вкл}$ потенциальный барьер перехода П2 почти полностью исчезает, коллекторный переход П2 оказывается в режиме насыщения, сопротивление диодистора уменьшается, а ток I_{np} увеличивается. Падение напряжения на диодисторе резко уменьшается и становится равным сумме падений напряжений на трех переходах П1, П2 и П3, включенных в прямом направлении (единицы вольт). Чтобы не произошло разрушение структуры диодистора, его обязательно включают последовательно с нагрузкой R_n . Величина тока через включенный диодистор равна

$$I_{np} = \frac{U_{np}}{R_n}.$$

В открытом состоянии (участок IV характеристики, см. рис. 11.35) диодистор находится до тех пор, пока проходящий ток I_{np} поддерживает в базах избыточные заряды, обеспечивающие режим насыщения коллекторного перехода П2. В момент включения участок III характеристики, обла-

дающий отрицательным дифференциальным сопротивлением, динистор проходит скачком.

Если ток I_{np} , проходящий через динистор уменьшить до значения $I_{выкл}$, а для этого следует уменьшить напряжение U_{np} до значения $U_{выкл}$ (около 1 В), то процесс рекомбинации зарядов в n - и p -базах станет преобладать над процессом накопления, коллекторный p - n -переход $\Pi 2$ выходит из режима насыщения и окажется включенным в обратном направлении, сопротивление его увеличивается, а ток уменьшается, и динистор переходит в закрытое состояние.

Динистор может быть представлен в виде эквивалентной схемы из двух транзисторов с разным типом проводимости (рис. 11.36).

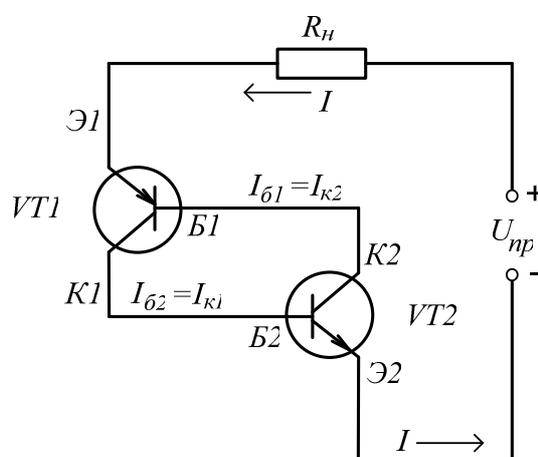


Рис. 11.36. Эквивалентная схема динистора на транзисторах

Для любого биполярного транзистора справедливо выражение

$$I_{к} = \alpha I_{э} + I_{кб.о}.$$

Тогда для транзистора $VT1$ можно записать:

$$I_{к1} = \alpha_1 I + I_{кб.о1}.$$

Аналогично для транзистора $VT2$:

$$I_{к2} = \alpha_2 I + I_{кб.о2}.$$

Согласно первому закону Киргофа,

$$I = I_{к1} + I_{к2} = \alpha_1 I + I_{кб.о1} + \alpha_2 I + I_{кб.о2}.$$

Решая это уравнение относительно I , получим:

$$I = \frac{I_{кб.о1} + I_{кб.о2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}.$$

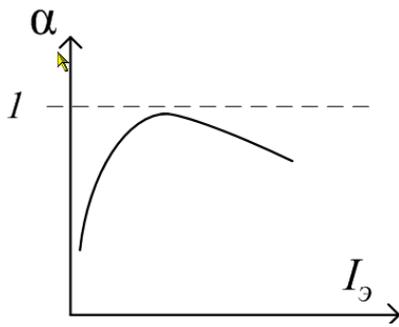


Рис. 11.37. Зависимость $\alpha = f(I_э)$

Значения коэффициентов α_1 и α_2 в кремниевых структурах существенно зависят от тока эмиттера (рис. 11.37).

При токах эмиттера в несколько микроампер значение α не превышает несколько десятых, т.е. значительно меньше единицы. С увеличением $I_э$ значение α приближается к единице. Пока $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$, токи динистора малы и динистор закрыт (участок II характеристики, см. рис. 11.35).

При увеличении напряжения на динисторе до значения $U_{пр} = U_{вкл}$ сумма $(\alpha_1 + \alpha_2)$ стремится к единице, регенеративный процесс резко возрастает, ток согласно полученному выражению увеличивается и происходит насыщение коллекторного перехода П2 инжектированными носителями заряда. Динистор переходит в неустойчивый режим (участок III характеристики, см. рис. 11.35), где он обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением и далее скачком переходит в открытое состояние (устойчивый режим, участок IV характеристики, см. рис. 11.35).

Величина напряжения $U_{вкл}$ тем больше, чем меньше начальные значения коэффициентов α_1 и α_2 .

Условное графическое обозначение динистора приведено на рис. 11.38, при этом электрод связанный с p -эмиттером называется анодом, с n -эмиттером – катодом.

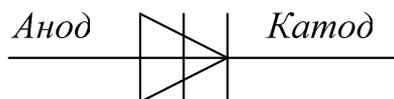


Рис. 11.38. Условное графическое обозначение динистора

Устройство и принцип действия тринисторов. Тринистор отличается от динистора наличием третьего вывода от базовой области. Это позволяет изменением напряжения на этом управляющем выводе, управлять величиной напряжения включения. Поэтому тринисторы называют управляемыми переключателями.

Управляющий электрод (УЭ) может быть подключен к любой из баз тринистора. Внешне это выражается лишь в выборе нужной полярности напряжения на УЭ относительно ближайшего эмиттера (рис. 11.39).

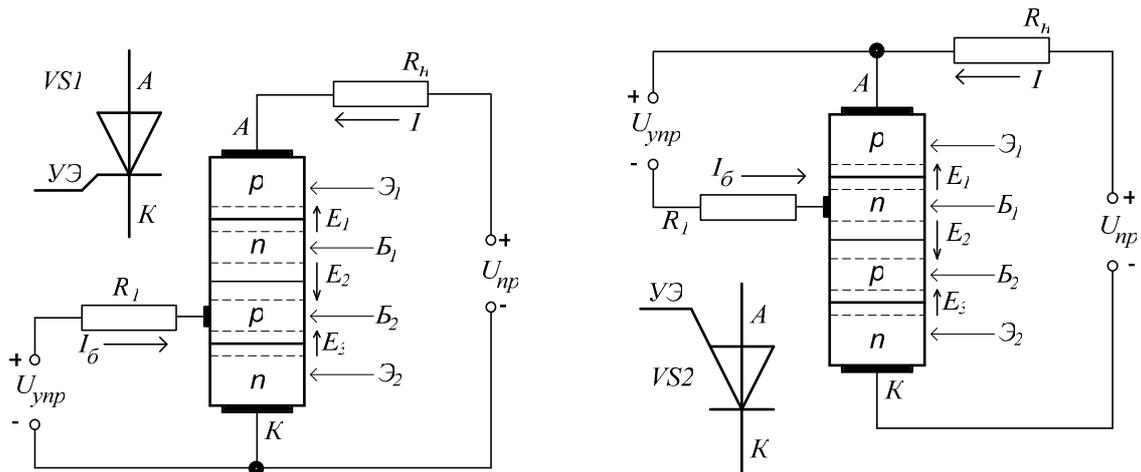


Рис. 11.39. Типы существующих триисторов, их подключение и условные графические обозначения

Увеличение тока I_{σ} в цепи управляющего электрода сопровождается ростом тока соответствующего эмиттерного перехода и соответственно ростом коэффициента передачи тока α_i этого же эмиттера. Увеличение коэффициента α_i приводит к тому, что равенство $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ выполняется при меньшем значении напряжения U_{np} . И таким образом напряжение $U_{вкл}$ триистора уменьшается (рис. 11.40).

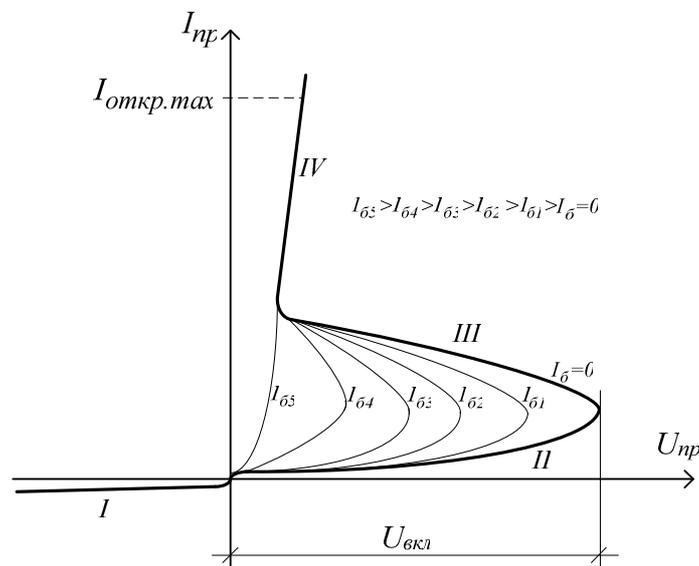


Рис. 11.40. Вольт-амперная характеристика триистора

Ток и напряжение в цепи управления триистора имеют небольшую величину, а ток в анодной цепи может достигать сотен ампер при анодных

напряжениях от десятков до сотен вольт. Поэтому коэффициент усиления тринистора по мощности может достигать больших значений ($10^4 - 10^5$).

Тринисторы находят более широкое применение по сравнению с диодисторами (управляемые выпрямители, управляемый электропривод и др.).

Устройство и принцип действия симисторов. Симистор – симметричный тиристор – представляет собой пятислойную полупроводниковую структуру $n-p-n-p-n$ -типа, которая образует четыре $p-n$ -перехода (рис. 11.41).

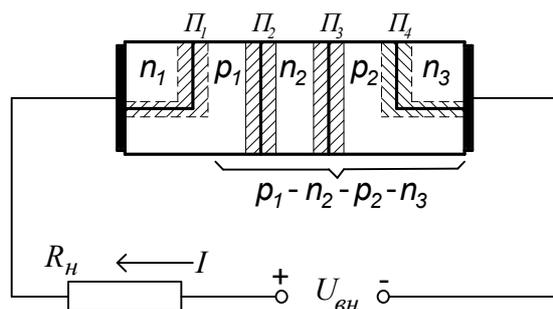


Рис. 11.41. Структура и подключение симистора к источнику внешнего напряжения

Крайние эмиттерные переходы симистора Π_1 и Π_4 шунтированы объемным сопротивлением своих p -баз. Так, если переход Π_1 смещен в обратном направлении и его сопротивление велико, то он шунтируется объемным сопротивлением базы p_1 . Если же переход Π_1 смещен в прямом направлении, то его сопротивление мало и ток будет проходить через переход, минуя шунтирующее сопротивление базы p_1 .

Аналогично для перехода Π_4 , который шунтируется объемным сопротивлением базы p_2 .

Если внешнее напряжение смещает переход Π_1 в обратном направлении, то его ток мал и работает структура $p_1 - n_2 - p_2 - n_3$, в которой проходят процессы, такие же как в диодисторе (рис. 11.41). При этом формируется прямая ветвь вольт-амперной характеристики симистора (рис. 11.42).

Если к симистору приложить внешнее напряжение, смещающее переход Π_4 в обратном направлении, то он шунтируется объемным сопротивлением базы p_2 , и будет работать структура $n_1 - p_1 - n_2 - p_2$ (рис. 11.43). При этом формируется обратная ветвь вольт-амперной характеристики симистора (рис. 11.42).

Таким образом симистор (симметричный диодистор) можно представить в виде двух диодисторов, включенных встречно и шунтирующих друг друга. Вольт-амперная характеристика также симметрична (рис. 11.42).

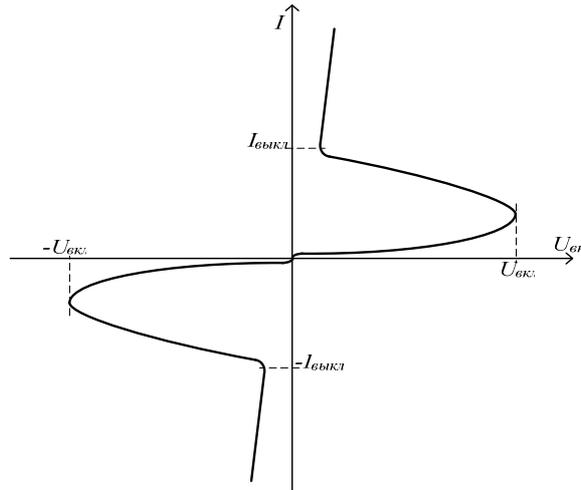


Рис. 11.42. Вольт-амперная характеристика симистора

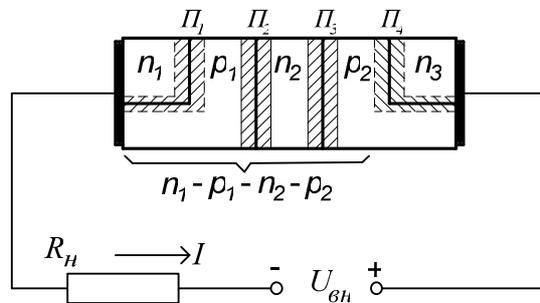


Рис. 11.43. Структура и подключение симистора к источнику внешнего напряжения противоположной полярности

Дополнительными выводами от баз такой симметричный динистор можно преобразовать в симметричный тринистор (управляемый симистор).

Условные графические обозначения симисторов приведены на рис 11.44.

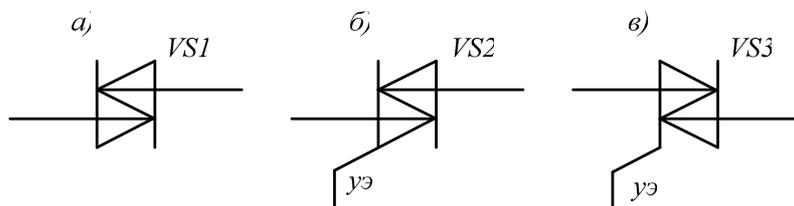


Рис. 11.44. Условные графические обозначения симисторов:
 а – неуправляемый симистор; б – симистор с управлением по аноду;
 в – симистор с управлением по катоду

Основные параметры симисторов аналогичны параметрам тиристорам.

Контрольные вопросы

1. Что такое тиристор? Какие виды тиристоров существуют?
2. Какие физические процессы протекают в динисторе?
3. Приведите транзисторную схему замещения динистора и поясните ее работу.
4. Изобразите ВАХ динистора и укажите его основные параметры.
5. Какие физические процессы протекают в тринисторе?
6. Изобразите ВАХ тринистора и укажите его основные параметры.
7. Какие физические процессы протекают в симисторе?
8. Изобразите ВАХ симистора и укажите его основные параметры.
9. Условные графические обозначения и маркировка различных типов тиристоров.

11.8. Обзор наиболее широко применяемых, оптоэлектронных и индикаторных полупроводниковых приборов

К категории таких приборов относятся: фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, светодиоды (излучающие диоды), оптроны, различные индикаторы

Фотодиоды. Фотодиоды представляют собой полупроводниковые диоды, в которых используется внутренний фотоэффект. Под воздействием света на электронно-дырочный $p-n$ -переход и прилегающие к нему области происходит генерация пар носителей заряда, проводимость диода при обратном включении возрастает и обратный ток увеличивается. Такой режим работы называется *фотодиодным* (рис. 11.45, а). Вольт-амперные характеристики $I = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$ для фотодиодного режима приведены на рис 11.45, б.

Если световой поток $\Phi = 0$, то вольт-амперная характеристика фотодиода совпадает с характеристикой обычного диода (рис. 11.45, б), и через фотодиод протекает начальный обратный ток I_0 , который называют *темновым*. Под действием светового потока проводимость диода увеличивается, обратный ток возрастает и характеристики смещаются вниз. Чем больше световой поток Φ , тем больше обратный ток диода, тем ниже располагается характеристика (рис. 11.45, б).

Кроме фотодиодного режима фотодиод может работать в режиме вентильного фотоэлемента, в котором он используется как источник тока с ЭДС E_ϕ . Величину фото-ЭДС можно найти в точках пересечения характеристик с горизонтальной осью напряжений (рис. 11.45, б).

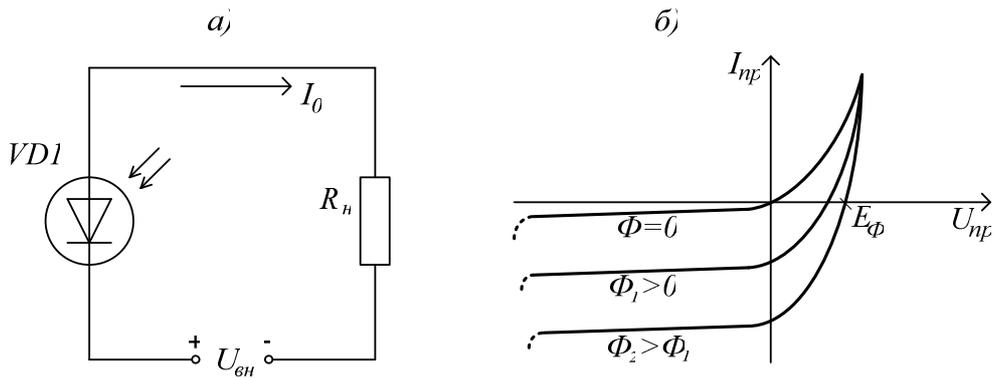


Рис. 11.45. Схема включения и вольт-амперные характеристики фотодиода для работы в фотодиодном режиме

Фотодиодный режим работы фотодиода используется для преобразования интенсивности светового излучения в электрический сигнал, а режим вентильного фотоэлемента – в солнечных батареях и др.

Фототранзисторы. Биполярный фототранзистор представляет собой обычный транзистор, но в корпусе имеет прозрачное «окно», через которое световой поток может воздействовать на область базы. Схема включения биполярного фототранзистора *p-n-p*-типа со «свободной», т.е. никуда не включенной, базой, приведена на рис. 11.46.

Как обычно эмиттерный переход включен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. Световой поток Φ вызывает в базе генерацию пар носителей заряда – электронов и дырок. Дырки в базе диффундируют к коллекторному переходу и электрическим полем коллекторного перехода перебрасываются в коллектор. Электроны накапливаются в базе и увеличивают прямое напряжение эмиттерного перехода, что усиливает инжекцию дырок из эмиттера в базу. За счет этого дополнительно увеличивается ток коллектора.

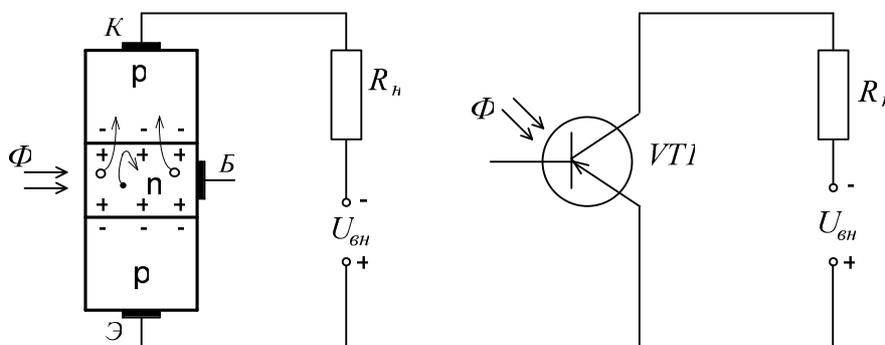


Рис. 11.46. Структура, схема включения и обозначение фототранзистора со «свободной» базой

Выходные характеристики фототранзистора $I_k = f(U_{кэ})$ при $\Phi = \text{const}$ приведены на рис. 11.47.

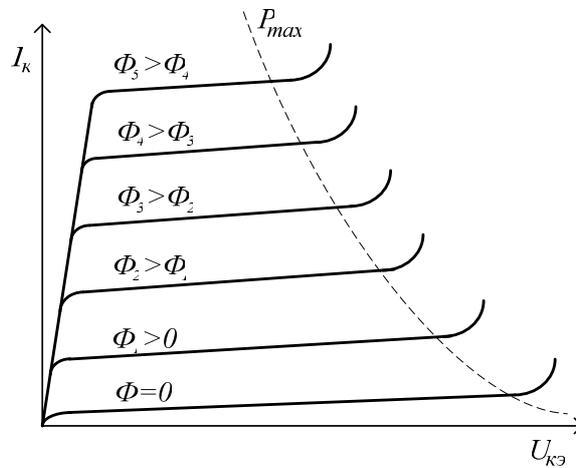


Рис. 11.47. Выходные характеристики фототранзистора со «свободной» базой

Характеристики показывают, что величина коллекторного тока пропорциональна световому потоку Φ , а при повышенном напряжении $U_{кэ}$ наступает пробой коллекторного перехода.

Чувствительность фототранзисторов в десятки раз выше, чем у фотодиодов. Но фототранзистор со «свободной» базой имеет низкую температурную стабильность, поэтому базовый вывод включают в схему, задавая напряжение смещения на базу.

Фототиристоры. Фототиристор имеет структуру тиристора, переключающие свойства которого зависят от светового потока Φ . Структура и вольт-амперные характеристики фототиристора приведены на рис. 11.48.

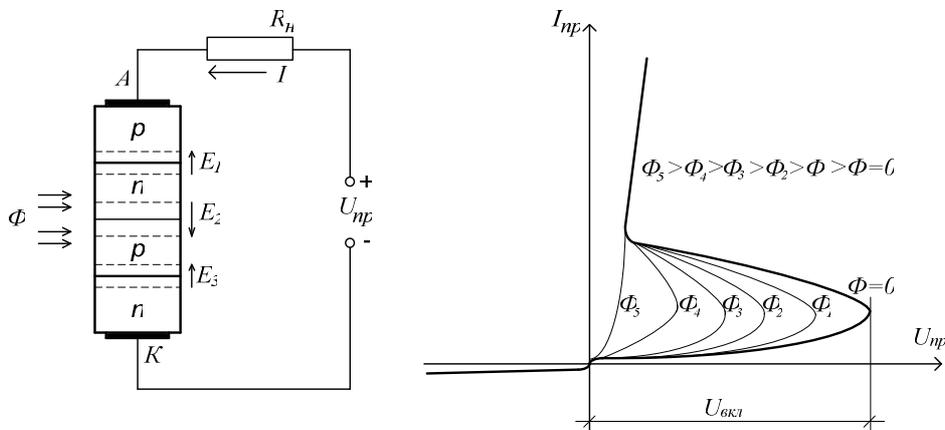


Рис. 11.48. Структура и вольт-амперные характеристики фототиристора

При облучении n - и p -баз в них наблюдается генерация пар носителей заряда – электронов и дырок, которые разделяются полем E_2 перехода, что ускоряет накопление объемных зарядов в n - и p -базах, и включение тиристора происходит при меньшем значении внешнего напряжения (рис. 11.48).

Фототиристоры успешно применяются в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей.

Светоизлучающие диоды (светодиоды). Светодиод – это полупроводниковый диод, который, при прямом включении и при прохождении через него прямого тока, излучает световой поток в видимой или инфракрасной части спектра.

Принцип работы светодиодов основан на том, что при прямом включении p - n -перехода происходит инжекция основных носителей заряда, электронов из n -области в p -область и дырок в обратном направлении. Но электронов значительно больше, чем дырок. Инжектированные электроны интенсивно рекомбинируют с дырками p -области. Рекомбинирующие электроны переходят на более низкие энергетические уровни и выделяют энергию в виде фотонов. В результате этого возникает свечение.

Для построения светодиодов не используют легированные германий и кремний, т.к. их энергия ионизации мала. Светодиоды изготавливают из полупроводников, энергия ионизации которых больше, чем 1,7 эВ, это фосфид галлия (GaP), карбид кремния (SiC) и др.

Светодиоды применяют в качестве малоинерционных источников излучения и даже в качестве энергосберегающих осветительных приборов.

Условное графическое обозначение и подключение светодиода приведено на рис. 11.49.

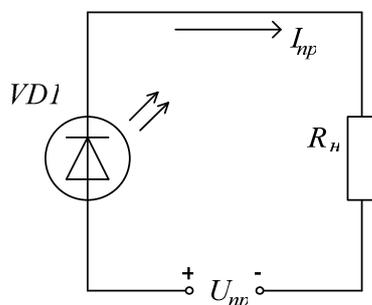


Рис. 11.49. Условное графическое обозначение и подключение светодиода

Основными параметрами светодиода являются: сила свечения, яркость свечения, цвет свечения, максимально допустимый постоянный прямой ток, постоянное прямое напряжение, максимально допустимое постоянное обратное напряжение.

Система маркировки светодиодов аналогична обычным диодам, только вместо буквы Д ставится буква Л. Например, АЛ307А.

Оптроны (оптопары). Оптрон – это полупроводниковый прибор, в котором конструктивно объединены источник и приемник излучения, имеющие между собой оптическую связь. Оптроны широко используются в микроэлектронной и электротехнической аппаратуре для обеспечения электрической развязки при передаче информационных сигналов, бесконтактной коммутации силовых высоковольтных цепей, в системах автоматики и др.

Если оптрон имеет только один излучатель и один приемник излучения, то его называют *оптопарой*, или *элементарным оптроном*. Электрические сигналы на входе и выходе оптрона связаны между собой только световым потоком. При этом цепь излучателя является управляющей, а цепь фотоприемника – управляемой. Чаще всего в качестве излучателей в оптопарах используются светодиоды, а в качестве фотоприемников – фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. В соответствии с этим различают резисторные оптопары, диодные оптопары, транзисторные оптопары и тиристорные оптопары (рис. 11.50).

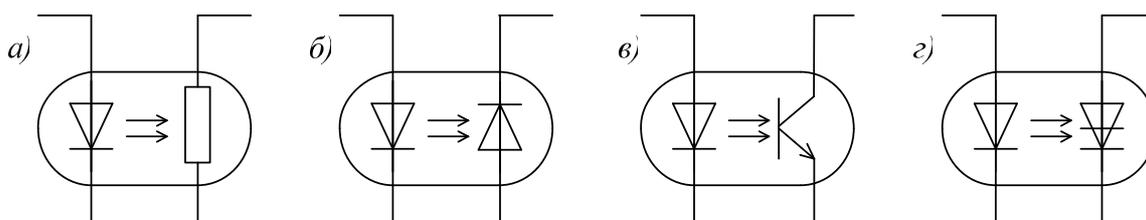


Рис. 11.50. Условные графические обозначения видов выпускаемых оптопар:
a – резисторная оптопара; *б* – диодная оптопара; *в* – транзисторная оптопара;
г – тиристорная оптопара

По своим техническим характеристикам указанные оптопары конечно же различны. Транзисторные и тиристорные оптопары более чувствительны и имеют больший коэффициент передачи сигнала по сравнению с резисторными и диодными оптопарами.

Оптопары (оптроны) выпускаются как в виде отдельных полупроводниковых приборов, так и в виде интегральных микросхем.

Позиционное обозначение оптронов на схемах выполняется сочетанием букв **VV** с позиционным номером.

Пример маркировки оптрона:

АОД103А

Расшифровка: А – арсенид галлия (материал полупроводника), О – оптрон, Д – диодный оптрон (тип оптрона по виду фотоприемника), 103А – группа и модификация по электрическим параметрам.

Индикаторы. Индикаторы – это электрически управляемые приборы для систем визуального отображения информации. К основным типам индикаторов относятся полупроводниковые индикаторы (ППИ) и жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ).

Простейшими ППИ являются светодиоды. Кроме них, на основе светодиодов выпускаются цифровые и буквенно-цифровые одноразрядные и многоразрядные индикаторы, а также матричные индикаторы.

Самое широкое распространение получили семисегментные светодиодные буквенно-цифровые индикаторы, в состав которых входят восемь светодиодов, семь из них имеют форму сегментов, восьмой – форму точки (рис. 11.51).

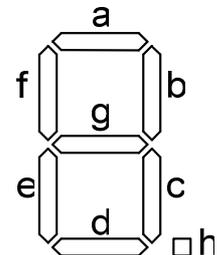


Рис. 11.51. Расположение и обозначение сегментов в семисегментном индикаторе

Каждый из сегментов обозначают буквой латинского алфавита. Засвечивая сегменты в разных комбинациях можно выводить на индикацию цифровую информацию.

Светодиодные семисегментные индикаторы выпускаются двух видов – с объединенным анодом (рис. 11.52) или с объединенным катодом (рис. 11.53).

Основу построения матричных светодиодных индикаторов составляет светодиодная матрица из единичных светодиодов, расположенных плотными рядами на определенной площади. Комбинируя включение светодиодов в различных точках матричного поля, можно высветить любой символ. Разумеется, для матричных индикаторов требуется более сложное управление.

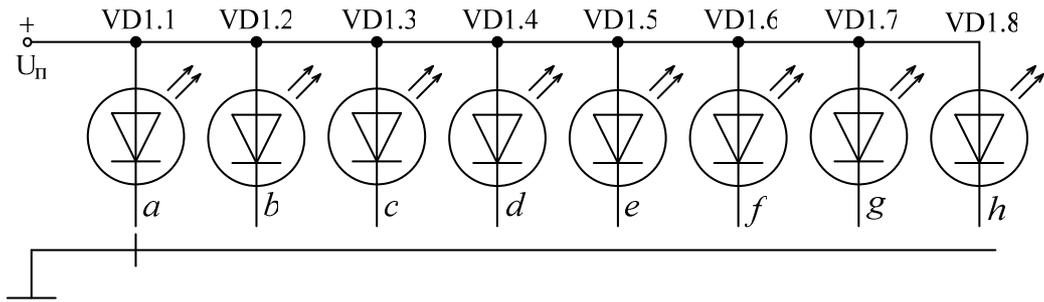


Рис. 11.52. Схема посегментного включения индикатора с общим анодом

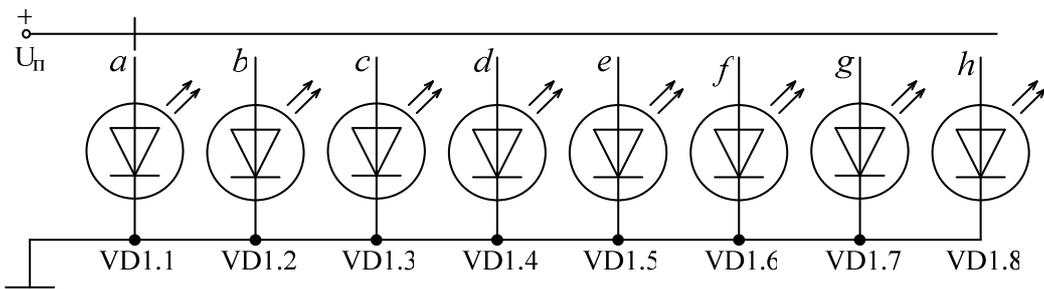


Рис. 11.53. Схема посегментного включения индикатора с общим катодом

Кроме светодиодных, широкое применение находят *жидкокристаллические* (ЖК) индикаторы. *Жидкокристаллическим* называется термодинамически устойчивое состояние вещества, которое состоит из длинных молекулярных цепочек, расположенных слоями, и молекулы могут поворачиваться и даже перемещаться, как в жидкости. Характерной особенностью жидких кристаллов является то, что молекулы вещества имеют сравнительно большую длину и относительно малую ширину и, попадая в электрическое поле, способны ориентироваться определенным образом, изменяя при этом светопропускающую способность слоя.

Типовая элементарная ячейка ЖК прибора для отображения информации состоит из двух прозрачных стеклянных пластин, между которыми помещены ЖК. С внутренней стороны пластин расположены электроды. Их количество и расположение берутся такими, чтобы можно было реализовать требуемое изображение.

Широко распространены ЖК-индикаторы сегментного типа, матричные и другие. ЖК-индикаторы просты по конструкции, дешевы, имеют низкое энергопотребление и обеспечивают хорошую контрастность изображения.

Контрольные вопросы

1. Что такое светодиод? Его назначение и основные параметры.
2. Какими физическими процессами вызвано свечение светодиода?
3. Что такое фотодиод? Его назначение и возможные режимы работы.
4. Физические процессы, протекающие в фотодиоде, и его характеристики.
5. Что такое фототранзистор? Его назначение и применение.
6. Физические процессы, протекающие в фототранзисторе, и его характеристики.
7. Что такое фототиристор? Его назначение и применение.
8. Физические процессы, протекающие в фототиристоре, и его характеристики.
9. Понятие оптрона, его назначение, виды оптронов.
10. Условные графические обозначения различных видов фотоэлектронных приборов.
11. Назовите виды и назначение светодиодных индикаторов.
12. Каким образом формируются символы на семисегментном светодиодном индикаторе?
13. Понятие ЖК-индикаторов, их виды и применение.

12. ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

К категории вторичных источников питания относят электропреобразовательные устройства для получения стабилизированных и нестабилизированных источников постоянного напряжения. Это различные управляемые и неуправляемые, однофазные и трехфазные схемы выпрямления переменного тока, сглаживающие фильтры, пассивные и активные стабилизаторы напряжения, инверторы и др.

12.1. Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодная схема выпрямления относится к категории однофазных выпрямителей и используется для построения сравнительно маломощных источников питания с невысокими требованиями к пульсациям выпрямленного напряжения.

Поскольку выпрямитель питается чаще всего от промышленной сети (220 В, 50 Гц), то в схему выпрямителя включают трансформатор для получения требуемой величины выпрямленного напряжения (рис. 12.1).

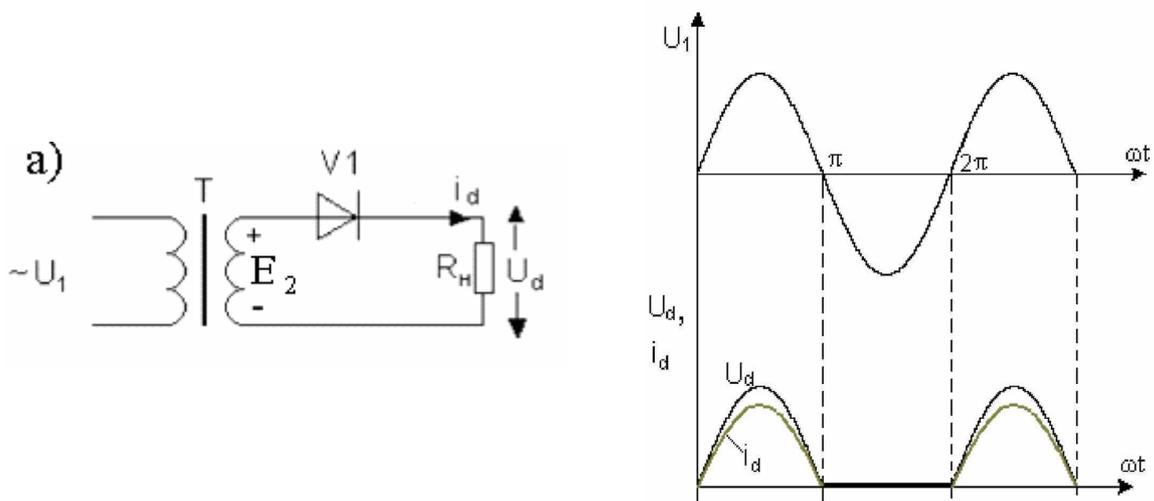


Рис. 12.1. Схема и временные диаграммы работы однополупериодного выпрямителя

Во вторичной обмотке трансформатора T получаем переменную ЭДС E_2 , которая изменяется по синусоидальному закону. Пусть в первый полупериод (интервал $0 < \omega t < \pi$) полярность E_2 будет соответствовать указанной на рис. 12.1, а. В этот полупериод электрический ток i_d пройдет от (+) вывода вторичной обмотки через диод $V1$, через R_n к (-) вторичной обмотки. Так как $R_{np.д} \ll R_n$, то выпрямленное напряжение U_d будет прибли-

тельно равно E_2 . Во второй полупериод действия E_2 (интервал $\pi < \omega t < 2\pi$) полярность на выводах вторичной обмотки трансформатора поменяется на противоположную, но в этот полупериод диод V1 не пропустит ток через R_n (рис. 12.1, б).

Для оценки величины выпрямленного напряжения следует проинтегрировать функцию $U_d(t)$ в пределах от 0 до π и разделить на 2π . В графическом представлении площадь под кривой $U_d(t)$ заменяют площадью равновеликого прямоугольника с основанием 2π . Высота этого прямоугольника и будет соответствовать среднему выпрямленному напряжению.

$$U_{d.cp} = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi}^{\pi} U_d(\omega t) d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi}^{\pi} E_{2m} \sin(\omega t) d\omega t = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi}^{\pi} \sqrt{2}E_2 \sin(\omega t) d\omega t = -\frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi} \cos(\omega t) \Big|_0^{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0,45E_2.$$

Одним из показателей качества выпрямленного напряжения является коэффициент пульсаций K_n . Коэффициент пульсаций – это отношение амплитуды первой гармоники напряжения U_{1m} выпрямленной функции в разложении Фурье к среднему выпрямленному напряжению $U_{d.cp}$, т.е. $K_n = U_{1m}/U_{d.cp}$. Для рассматриваемой схемы $K_n = 1,57$.

Недостатки однополупериодной схемы выпрямления:

- низкое среднее значение выпрямленного напряжения $U_{d.cp} = 0,45E_2$;
- трансформатор загружен всего на 50 %;
- максимальный выпрямленный ток не превышает максимального прямого тока одного диода;
- обратное напряжение, приложенное к диоду равно амплитудному значению $U_{обр} = E_{2m} = 1,41E_2$;
- большой коэффициент пульсаций $K_n = 1,57$.

Достоинства однополупериодной схемы выпрямления:

- единственным достоинством схемы является ее простота и низкая стоимость.

12.2. Двухполупериодные выпрямители

Двухполупериодные схемы выпрямления также относятся к категории однофазных выпрямителей и используются для построения источников питания малой и средней мощности с более высокими требованиями к пульсациям выпрямленного напряжения.

В состав выпрямителя включают трансформатор для получения требуемой величины выпрямленного напряжения. Существуют две схемы двухполупериодного выпрямления.

Двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой. Особенностью этой схемы выпрямления переменного напряжения является то, что вторичная обмотка трансформатора выполнена в виде двух одинаковых секций, соединенных между собой последовательно с образованием среднего вывода, называемого нулевой точкой (рис. 12.2).

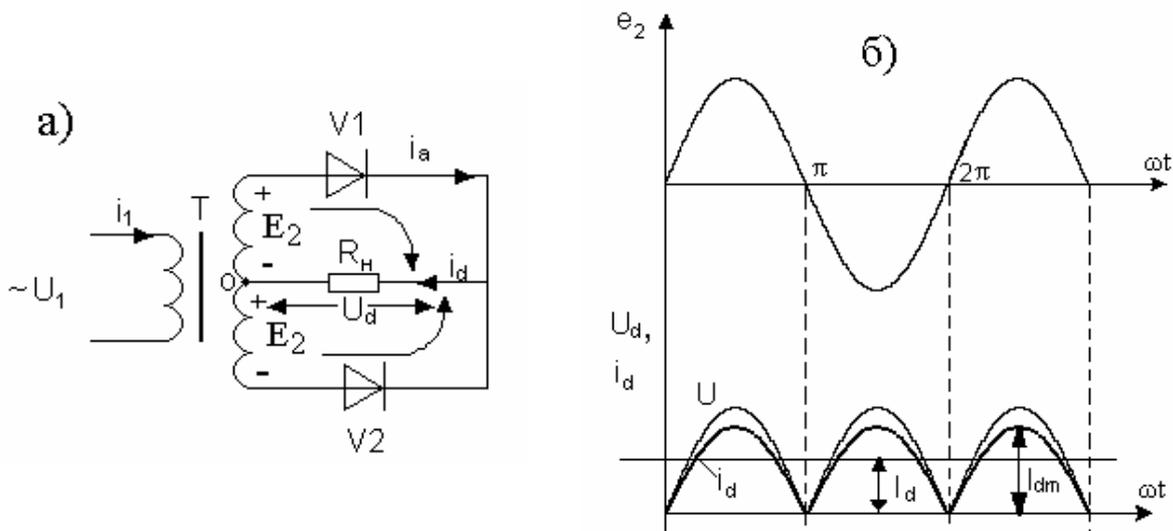


Рис. 12.2. Схема и временные диаграммы работы двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой

Рассмотрим два полупериода действия переменной ЭДС E_2 в двух секциях вторичной обмотки трансформатора. Пусть в первый полупериод (интервал $0 < \omega t < \pi$) полярность E_2 будет соответствовать указанной на рис. 12.2, а. В этот полупериод электрический ток i_a пройдет от (+) вывода верхней секции вторичной обмотки трансформатора через диод V_1 , через R_n к (-) верхней секции. В этот полупериод в нижней секции обмотки полярность E_2 такова, что диод V_2 не может пропустить ток. Также как и в предыдущей схеме на R_n сформируется первая полуволна выпрямленного напряжения (рис. 12.2, б). Во второй полупериод действия E_2 (интервал $\pi < \omega t < 2\pi$) полярность на выводах вторичной обмотки трансформатора поменяется на противоположную, и в этот полупериод через R_n пройдет электрический ток от нижней секции вторичной обмотки через диод V_2 . Теперь в верхней секции обмотки полярность E_2 такова, что диод V_1 не может пропустить ток. На R_n сформируется вторая полуволна выпрямленного напряжения (рис. 12.2, б). Таким образом, секции вторичной обмотки

трансформатора работают поочередно, и в каждом полупериоде ток через R_n проходит в одном направлении. Временные диаграммы выпрямленного тока i_d и напряжения U_d приведены на рис. 12.2, б.

Оценим величину среднего выпрямленного напряжения:

$$U_{d.c.p} = \frac{1}{\pi_0} \int_{\pi_0}^{\pi} U_d(\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi_0} \int_{\pi_0}^{\pi} E_{2m} \sin(\omega t) d\omega t =$$

$$= \frac{1}{\pi_0} \int_{\pi_0}^{\pi} \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t) d\omega t = -\frac{\sqrt{2} E_2}{\pi} \cos(\omega t) \Big|_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E_2 = 0,9 E_2.$$

Коэффициент пульсаций для этой схемы $K_n = 0,67$.

Недостатки двухполупериодной схемы выпрямления:

- трансформатор опять загружен всего на 50 %;
- обратное напряжение, приложенное к диоду, равно двум амплитудам E_{2m} , т.е. $U_{обр} = 2E_{2m} = 2,82E_2$;
- из-за неидентичности ЭДС E_2 трансформируемых в верхней и нижней секциях вторичной обмотки трансформатора возникает дополнительная пульсация выпрямленного напряжения;
- сложность изготовления вторичной обмотки трансформатора из двух секций.

Достоинства двухполупериодной схемы выпрямления:

- среднее выпрямленное напряжение в два раза больше $U_{d.c.p} = 0,9E_2$;
- максимальный выпрямленный ток в два раза больше максимального прямого тока одного диода;
- ниже коэффициент пульсаций $K_n = 0,67$.

Двухполупериодная мостовая схема выпрямления. Принципиальная электрическая схема этого выпрямителя и временные диаграммы работы приведены на рис. 12.3, а и 12.3, б соответственно.

Рассмотрим два полупериода действия переменной ЭДС E_2 . При положительной полуволне ЭДС E_2 (интервал $0 < \omega t < \pi$) и указанной на рис. 12.3, а полярности без скобок, выпрямленный ток будет протекать через диод V1, нагрузку R_n и диод V4. Диоды V2 и V3 находятся под обратным напряжением и тока не проводят (плюс приложен к катоду, минус – к аноду). При отрицательной полуволне ЭДС E_2 (интервал $\pi < \omega t < 2\pi$) и указанной на рис. 12.3, а полярности в скобках выпрямленный ток будет протекать через диод V3, нагрузку R_n и диод V2. Диоды V1 и V4 находятся под обратным напряжением и тока не проводят. И в оба полупериода ток сохраняет свое направление через R_n .

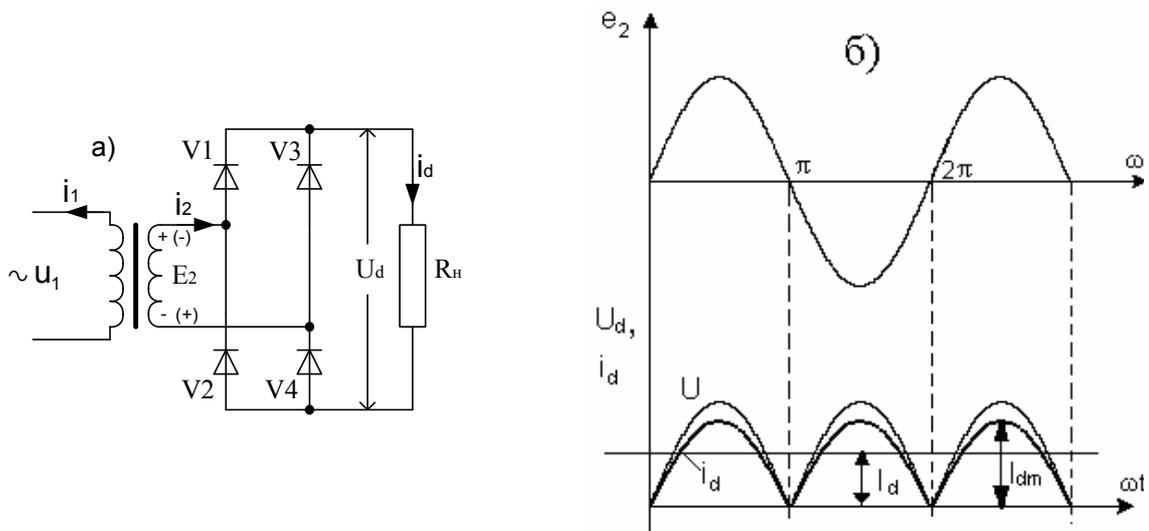


Рис. 12.3. Схема и временные диаграммы мостового выпрямителя

Основные технические характеристики мостовой схемы выпрямления в сравнении с предыдущей аналогичны. То есть среднее выпрямленное напряжение $U_{d,cp} = 0,9E_2$, коэффициент пульсаций $K_n = 0,67$, но мостовая схема обладает рядом достоинств.

Достоинства мостовой схемы выпрямления:

- полная загрузка трансформатора, вторичная обмотка загружена оба полупериода;
- обратное напряжение, приложенное к диоду, в два раза ниже, чем у схемы с нулевой точкой;
- исключены дополнительные пульсации, характерные для схемы с нулевой точкой;
- мостовая схема может работать и без трансформатора, а схема с нулевой точкой не может.

Недостатки двухполупериодной схемы выпрямления:

- единственным недостатком мостовой схемы выпрямления является необходимость использования четырех диодов, но т.к. диоды – элементы недорогие, то этот недостаток является формальным.

В настоящее время мостовая схема выпрямления является самой массовой при построении вторичных источников питания.

12.3. Выпрямители с умножением напряжения

Схемы выпрямления с умножением напряжения применяются при построении высоковольтных источников питания для нагрузок, потребляющих малые токи (обычно до 10 мА).

Схема выпрямления с удвоением напряжения. Выпрямленное напряжение на выходе такого выпрямителя примерно в два раза выше напряжения вторичной обмотки трансформатора (рис. 12.4).

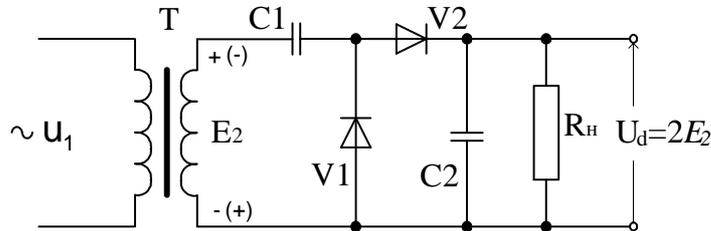


Рис. 12.4. Схема выпрямления с удвоением напряжения

Схема работает следующим образом. При положительной полуволне ЭДС E_2 (интервал $0 < \omega t < \pi$) и указанной на рис. 12.4 полярности (в скобках), через диод V_1 заряжается конденсатор C_1 до амплитудного значения U_{2m} . В следующий полупериод (интервал $\pi < \omega t < 2\pi$) E_2 меняет полярность на противоположную (без скобок), диод V_1 запирается, а напряжение на конденсаторе C_1 складывается с E_2 (они включены последовательно), и через диод V_2 заряжает конденсатор C_2 практически до значения $2E_2$.

Схема выпрямления с умножением напряжения на четыре. Выпрямленное напряжение на выходе такого выпрямителя примерно в четыре раза выше напряжения вторичной обмотки трансформатора (рис. 12.5).

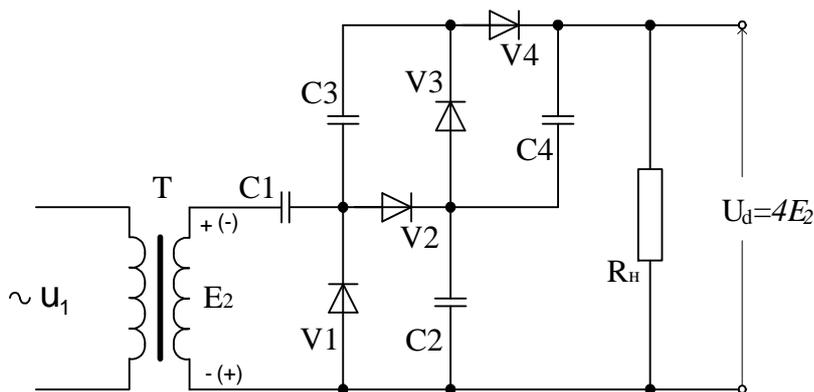


Рис. 12.4. Схема выпрямления с умножением напряжения на четыре

Схема состоит из двух удвоителей, рассмотренных ранее. Заряд конденсаторов C_1 и C_2 происходит так же, как в схеме рис. 12.4, за один период переменной ЭДС E_2 . За второй период E_2 аналогично заряжаются конденсаторы C_3 и C_4 через диоды V_3 и V_4 до напряжения $2E_2$. Таким об-

разом, полный заряд всех конденсаторов происходит за два периода действия E_2 , при этом конденсатор C_1 заряжается до напряжения E_2 , а остальные – до $2E_2$.

2.4. Трехфазные выпрямители

Трехфазные схемы выпрямления применяют для построения более мощных выпрямителей напряжения. Существуют две типовые трехфазные схемы выпрямления: трехфазный выпрямитель с нулевой точкой и трехфазный мостовой выпрямитель Ларионова. Обычно в схему трехфазного выпрямителя входит трехфазный трансформатор, обеспечивающий получение необходимого значения выпрямленного напряжения.

Трехфазный выпрямитель с нулевой точкой. Схема построения такого выпрямителя приведена на рис. 12.5. Первичные обмотки трехфазного трансформатора Tr могут включаться по схеме звезды или треугольника, а вторичные обмотки включаются по схеме звезды для образования нулевой точки.

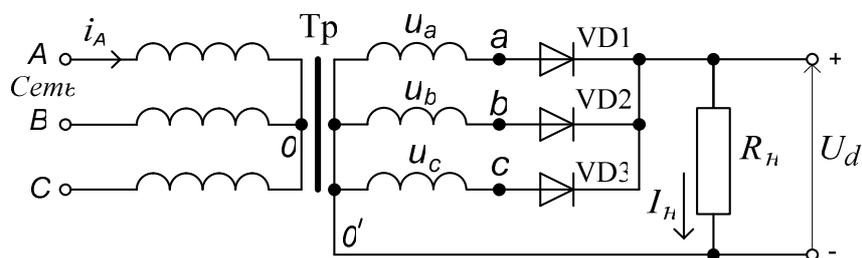


Рис. 12.5. Схема трехфазного выпрямителя с нулевой точкой

На рис. 12.6 приведены временные диаграммы исходных напряжений вторичных обмоток трехфазного трансформатора $u_a(t)$, $u_b(t)$ и $u_c(t)$, а также выпрямленных напряжений $u_d(t)$ и токов $i_n(t)$ при резистивной нагрузке.

Принцип работы рассматриваемой схемы выпрямления основан на том, что в любой произвольный момент времени ток проводит только один диод, потенциал анода которого наиболее положителен. Так, в интервале углов от ωt_1 до ωt_2 ток проводит диод VD1, в интервале углов от ωt_2 до ωt_3 ток проводит диод VD2, а в интервале углов от ωt_3 до ωt_4 – диод VD3. В результате функция выпрямленного напряжения $u_d(t)$ представляет собой огибающую по верхним частям синусоид трехфазной системы напряжений $u_a(t)$, $u_b(t)$ и $u_c(t)$, (рис. 12.6).

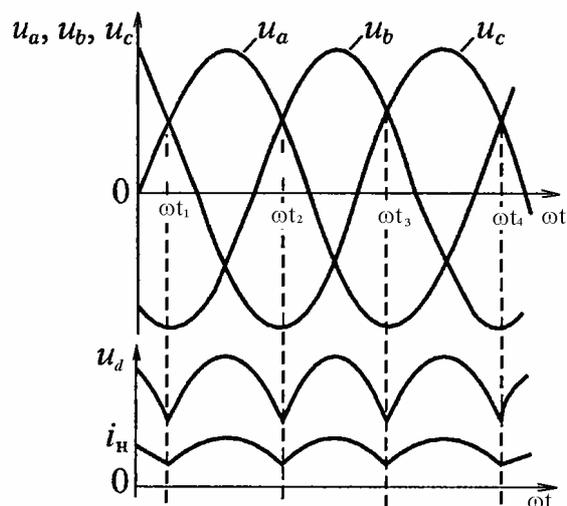


Рис. 12.6. Временные диаграммы напряжений и токов в трехфазном выпрямителе с нулевой точкой

Для оценки величины среднего выпрямленного напряжения следует проинтегрировать функцию $u_a(t)$ на интервале от $\omega t_1 = \pi/6$ до $\omega t_2 = 5\pi/6$ и разделить результат на угол $\omega t_2 - \omega t_1 = 2\pi/3$.

$$\begin{aligned}
 U_{d.c.p} &= \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} u_{a_d}(\omega t) d\omega t = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d\omega t = \\
 &= -\frac{3\sqrt{2}U_2}{2\pi} \cos(\omega t) \Big|_{\pi/6}^{5\pi/6} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} U_2 = 1,165U_2.
 \end{aligned}$$

Коэффициент пульсаций для этой схемы $K_n = 0,25$, в то время как для двухполупериодного однофазного выпрямителя $K_n = 0,67$, при этом частота пульсаций в три раза выше частоты сетевого напряжения.

Достоинства трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой по сравнению с однофазными выпрямителями:

- больше величина выпрямленного напряжения: $U_{d.c.p.} = 1,165U_2$, где U_2 – действующее значение напряжения во вторичных обмотках;
- меньше коэффициент пульсаций: $K_n = 0,25$;
- выпрямленное напряжение никогда не снижается до нуля;
- максимальный выпрямленный ток в три раза больше тока одного диода.

Недостатки трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой:

- трансформатор работает с подмагничиванием и загружен всего на $1/3$;
- к диодам прикладывается повышенное обратное напряжение $1,5U_{2m}$.

Трехфазный мостовой выпрямитель Ларионова. Схема построения такого выпрямителя приведена на рис. 12.7. Первичные и вторичные обмотки трехфазного трансформатора Tr могут включаться по схеме звезды или треугольника.

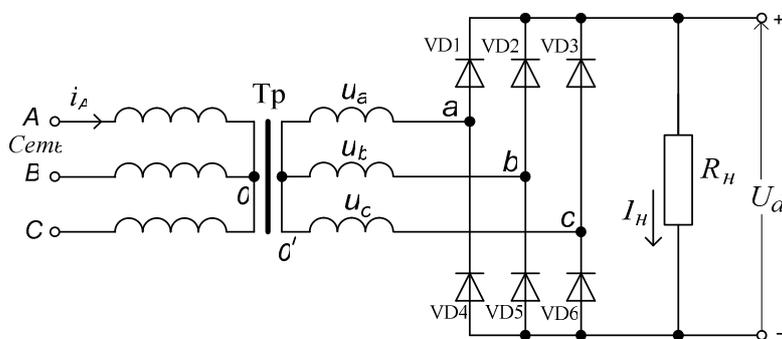


Рис. 12.7. Схема трехфазного мостового выпрямителя Ларионова

На рис. 12.8 приведены временные диаграммы исходных напряжений вторичных обмоток трехфазного трансформатора $u_a(t)$, $u_b(t)$ и $u_c(t)$, а также выпрямленных напряжений $u_d(t)$ и токов $i_n(t)$ при резистивной нагрузке.

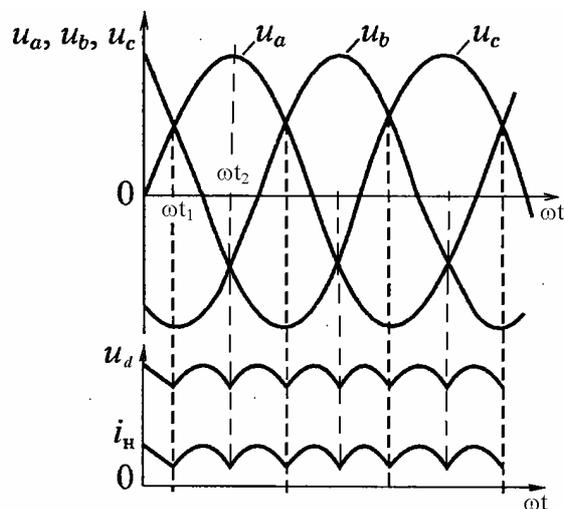


Рис. 12.8. Временные диаграммы напряжений и токов в трехфазном мостовом выпрямителе Ларионова

Принцип действия такого выпрямителя основан на том, что в любой произвольный момент времени ток проводят два диода, один из них – потенциал анода которого наиболее положителен, второй – потенциал катода которого наиболее отрицателен. Так, в интервале углов от ωt_1 до ωt_2 самым

положительным напряжением является $u_a(t)$ и ток проводит диод VD1, а самым отрицательным напряжением является $u_b(t)$, значит, ток проводит диод VD5. В интервале углов от ωt_2 до ωt_3 самым положительным напряжением остается $u_a(t)$ и диод VD1 продолжает проводить ток, самым отрицательным напряжением стало $u_c(t)$, и теперь ток пропускает VD6, и т.д.

В результате на плюсовом и минусовом выводах выпрямителя формируются напряжения в виде огибающих соответственно по верхним и нижним частям синусоид трехфазной системы напряжений $u_a(t)$, $u_b(t)$ и $u_c(t)$ относительно точки 0' (рис. 12.8).

Функция выпрямленного напряжения $u_d(t)$ определяется как разность между верхней и нижней огибающими (рис. 12.8).

Для оценки величины среднего выпрямленного напряжения следует проинтегрировать разность функций $[u_a(t) - u_b(t)]$, на интервале от $\omega t_1 = \pi/6$ до $\omega t_2 = \pi/2$ и разделить результат на угол $\omega t_2 - \omega t_1 = 2\pi/6$.

$$U_{d.c.p} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} [u_a(\omega t) - u_b(\omega t)] d\omega t = \frac{6\sqrt{2}U_2}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} [\sin(\omega t) - \sin(\omega t - 2\pi/3)] d\omega t =$$

$$= \frac{6\sqrt{2}U_2}{2\pi} \left[-\cos(\omega t) + \cos(\omega t - 2\pi/3) \right] \Big|_{\pi/6}^{\pi/2} = \frac{6\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} U_2 = 2,33U_2.$$

Коэффициент пульсаций для этой схемы $K_n = 0,057$, в то время как для схемы с нулевой точкой $K_n = 0,25$, при этом частота пульсаций в шесть раз выше частоты сетевого напряжения.

Достоинства трехфазного мостового выпрямителя:

- больше величина выпрямленного напряжения: $U_{d.c.p.} = 2,33U_2$, где U_2 – действующее значение напряжения во вторичных обмотках;
- меньше коэффициент пульсаций: $K_n = 0,057$;
- выпрямленное напряжение никогда не снижается до нуля;
- максимальный выпрямленный ток в три раза больше тока одного диода;
- отсутствует подмагничивание трансформатора и он загружен на 2/3;
- вдвое меньше обратное напряжение, приложенное к диоду;
- выпрямленное напряжение никогда не снижается до нуля.

Недостатки трехфазной схемы выпрямления с нулевой точкой:

- единственным недостатком является необходимость использования шести диодов, но поскольку диоды достаточно дешевы, то этот недостаток является формальным.

12.5. Сглаживающие фильтры

Сглаживающие фильтры предназначены для подавления пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя. Поэтому сглаживающие фильтры устанавливают сразу после выпрямителя непосредственно перед нагрузкой или стабилизатором напряжения (рис. 12.9).



Рис. 12.9. Подключение сглаживающего фильтра

Количественно степень подавления пульсаций сглаживающим фильтром оценивается коэффициентом сглаживания Q_ϕ , который равен отношению коэффициента пульсаций на входе фильтра $K_{н.вх}$ к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $K_{н.вых}$. Чем больше коэффициент сглаживания фильтра Q_ϕ , тем лучше:

$$Q_\phi = \frac{K_{н.вх.\phi}}{K_{н.вых.\phi}}$$

Наиболее часто в качестве сглаживающих фильтров применяют емкостной фильтр или Г-образные LC- или RC-фильтры, а также их комбинации (рис. 12.10).

Емкостные сглаживающие фильтры (рис. 2.10, а). Их используют, когда нагрузка потребляет небольшие токи. Выпрямленными импульсами напряжения конденсатор заряжается, и в промежутках между импульсами разряжается через R_n (рис. 12.11).

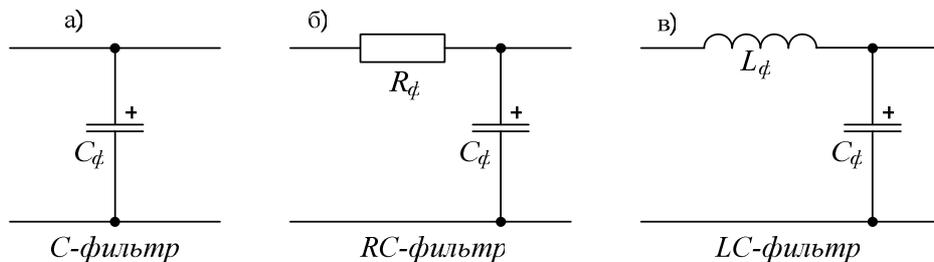


Рис. 12.10. Схемы сглаживающих фильтров

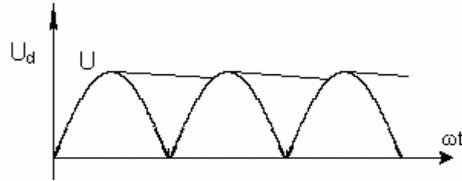


Рис. 12.11. Влияние C_ϕ на U_d

Грубо коэффициент сглаживания такого фильтра можно оценить в следующем виде:

$$Q_\phi = \omega_n C_\phi R_n,$$

где ω_n – частота пульсаций;
 C_ϕ – емкость конденсатора;
 R_n – сопротивление нагрузки.

Из приведенного выражения следует, что чем больше емкость конденсатора C_ϕ и сопротивление R_n , тем больше коэффициент сглаживания. Поэтому в фильтрах применяют электролитические конденсаторы большой емкости.

Сглаживающие RC-фильтры (рис.12.10, б). Их также используют, когда нагрузка потребляет небольшие токи (не более 20 мА). Конденсатор заряжается через R_ϕ , и т.к. через R_ϕ проходит весь ток I_n , то за счет падения напряжения $I_n R_n$ напряжение на R_n снижается. Приблизительно коэффициент сглаживания такого фильтра можно оценить в виде:

$$Q_\phi = \omega_n C_\phi (R_n + R_\phi).$$

Сглаживающие LC-фильтры (рис.12.10, в). Их используют, когда нагрузка потребляет более значительные токи (более 20 мА). Конденсатор заряжается через L_ϕ , и т.к. L_ϕ имеет малое активное сопротивление, то даже при прохождении тока I_n через L_ϕ падение напряжения на индуктивности невелико, напряжение на R_n снижается незначительно, и потому КПД LC-фильтра выше. Приблизительно коэффициент сглаживания такого фильтра можно оценить в виде:

$$Q_\phi = \omega_n^2 C_\phi L_\phi.$$

Наиболее эффективны так называемые П-образные фильтры, которые представляют собой цепочку из последовательно включенных емкостного фильтра и одного из рассмотренных RC- или LC-фильтра в зависимости от силы тока нагрузки. Общий коэффициент сглаживания такого фильтра оценивается как произведение коэффициентов сглаживания составляющих фильтров.

12.6. Стабилизаторы напряжения

Стабилизаторы напряжения поддерживают напряжение на нагрузке постоянным $U_{\text{вых}} = \text{const}$ при изменяющемся входном напряжении стабилизатора $U_{\text{вх}}$ и токе нагрузки $I_{\text{н}}$ в своих ограниченных диапазонах. Стабилизатор напряжения включается между сглаживающим фильтром и нагрузкой (рис. 12.12).

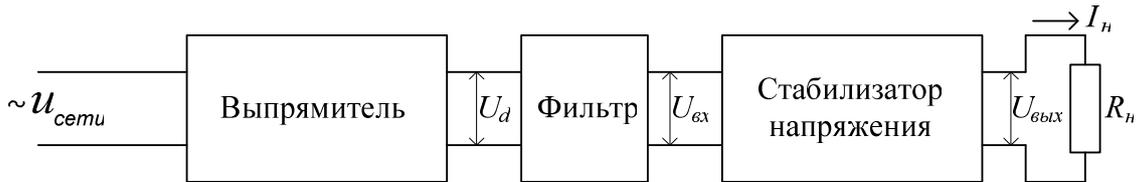


Рис. 12.12. Подключение стабилизатора напряжения

По типу стабилизаторы напряжения делятся на параметрические (пассивные) и компенсационные (активные). По принципу действия компенсационные стабилизаторы бывают с непрерывным и импульсным регулированием.

Параметрический стабилизатор напряжения. Схема такого стабилизатора напряжения приведена на рис. 12.13.

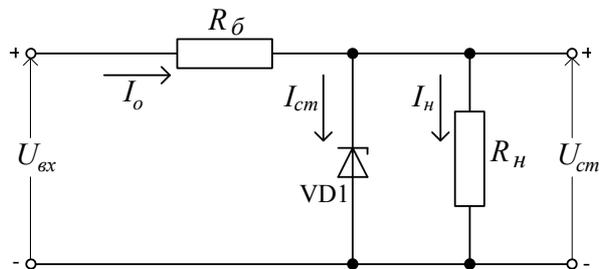


Рис. 12.13. Схема параметрического стабилизатора напряжения

Принцип действия параметрического стабилизатора напряжения основан на особенности вольт-амперной характеристики стабилитрона, на обратной ветви которой имеется участок со слабой зависимостью напряжения при значительных изменениях силы тока (см. рис. 11.12). Так, при увеличении напряжения $U_{\text{вх}}$ увеличится ток стабилитрона $I_{\text{ст}}$, увеличится ток $I_{\text{о}}$, увеличится падение напряжения на резисторе $R_{\text{б}}$, а выходное напряжение $U_{\text{ст}}$ увеличится незначительно. При уменьшении $U_{\text{вх}}$ – аналогично, но наоборот.

Для работы схемы должно выполняться условие: $U_{\text{вх}} > 1,2U_{\text{см}}$. Для приведенной схемы:

$$I_0 = I_{\text{см}} + I_{\text{н}}, \quad I_{\text{см}} = \frac{I_{\text{см.мин}} + I_{\text{см.макс}}}{2}, \quad I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{см}}}{R_{\text{н}}}.$$

Тогда $R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{см}}}{I_{\text{см}} + I_{\text{н}}}.$

Коэффициент стабилизации своей величиной показывает, как эффективно стабилизатор напряжения поддерживает выходное напряжение на заданном уровне. Количественно он равен отношению относительного изменения напряжения на входе стабилизатора к относительному изменению напряжения на выходе стабилизатора.

$$K_{\text{см}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{см}} / U_{\text{см}}}.$$

В результате несложного анализа приведенной схемы параметрического стабилизатора напряжения окончательно можно получить:

$$K_{\text{см}} = \frac{R_{\text{б}} U_{\text{см}}}{r_{\text{д}} U_{\text{вх}}}.$$

Практически коэффициент стабилизации таких стабилизаторов напряжения, построенных на современных стабилитронах, лежит в диапазоне $K_{\text{см}} = 20 - 40$.

Достоинства параметрических стабилизаторов напряжения:

– единственным достоинством является его простота.

Недостатки параметрических стабилизаторов напряжения:

– малые токи нагрузки таких стабилизаторов напряжения;

– небольшие значения коэффициентов стабилизации $K_{\text{см}} = 20 - 40$;

– низкий КПД, т.к. значительная часть мощности рассеивается на $R_{\text{б}}$ и стабилитроне.

Компенсационные стабилизаторы напряжения. Такие стабилизаторы строятся по принципу замкнутой системы регулирования напряжения. Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения приведена на рис. 12.14.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ стабилизатора через делитель напряжения ДН поступает на один из входов усилителя $U_{\text{с}}$, на второй вход которого приходит напряжение $U_{\text{он}}$ с выхода источника опорного напряжения

ИОН. Усилитель усиливает разность указанных сигналов и управляет регулирующим элементом РЭ, изменяя его сопротивление. В результате выходное напряжение стабилизатора приближается к заданному. Для нормальной работы такого стабилизатора необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

$$U_{вх} > U_{вых} > U_{он} \approx U_{д}$$

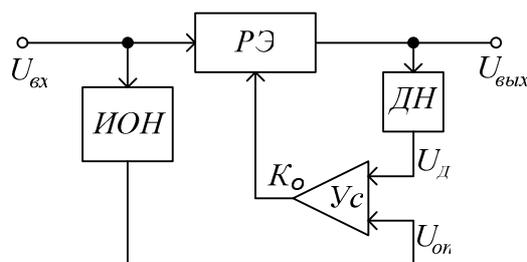


Рис. 12.14. Структурная схема компенсационного стабилизатора

Используя схему (рис. 12.14), можно записать уравнение компенсационного стабилизатора в виде:

$$K_0(U_{он} - K_{д}U_{вых}) = U_{вых},$$

где $U_{он}$ – опорное напряжение с выхода ИОН;
 $U_{вых}$ – выходное напряжение стабилизатора;
 $K_{д}$ – коэффициент передачи делителя напряжения ДН;
 K_0 – коэффициент усиления усилителя Ус с регулирующим элементом РЭ.

Решая полученное выражение относительно $U_{вых}$, получим:

$$U_{вых} = \frac{U_{он}K_0}{1 + K_0K_{д}}.$$

Так как $K_0K_{д} \gg 1$, то $U_{вых} = \frac{U_{он}}{K_{д}}$. Из этого следует, что выходное

напряжение такого стабилизатора не зависит от изменения $U_{вх}$ и пропорционально опорному напряжению $U_{он}$.

Упрощенная схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием приведена на рис 12.15.

Делитель напряжения ДН выполнен на резисторах R_1 и R_2 . Коэффициент передачи такого делителя

$$K_{д} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} < 1.$$

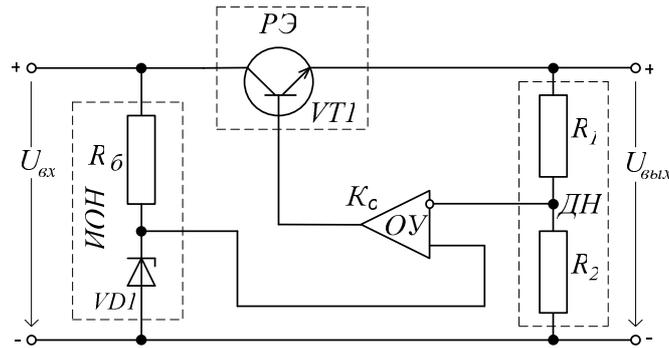


Рис. 12.15. Упрощенная схема компенсационного стабилизатора

Источник опорного напряжения $U_{он}$ представляет собой параметрический стабилизатор напряжения, построенный на элементах $R_б$ и VD1. Усилитель построен на операционном усилителе ОУ, а регулирующий элемент РЭ – на транзисторе VT1 по схеме эмиттерного повторителя.

Достоинства компенсационных стабилизаторов напряжения.

- выходной ток значительно больше, чем у параметрических стабилизаторов напряжения (ограничен параметрами регулирующего транзистора);
- стабилитрон VD1 работает в режиме холостого хода, т.к. ОУ имеет большое входное сопротивление;
- стабилизатор обладает малым выходным (внутренним) сопротивлением (сотые доли Ом).

Недостатки компенсационных стабилизаторов напряжения.

- невысокий кпд. Значительная часть мощности рассеивается регулирующим элементом РЭ ($P_{рэ} = I_n(U_{вх} - U_{вых})$). Поэтому регулирующий элемент РЭ часто устанавливают на радиатор для отвода тепла.

12.7. Импульсные источники напряжения (электропитания)

Импульсные, или ключевые, источники напряжения в настоящее время получили широкое распространение, не меньшее, чем ранее рассмотренные выпрямители и стабилизаторы напряжения. Улучшение массогабаритных параметров импульсных источников напряжения связано с тем, что из схемы исключается силовой трансформатор, работающий на частоте 50 Гц. Вместо него в схему вводится высокочастотный трансформатор, габариты и масса которого намного меньше.

Упрощенная структурная схема импульсного источника напряжения приведена на рис. 12.16.

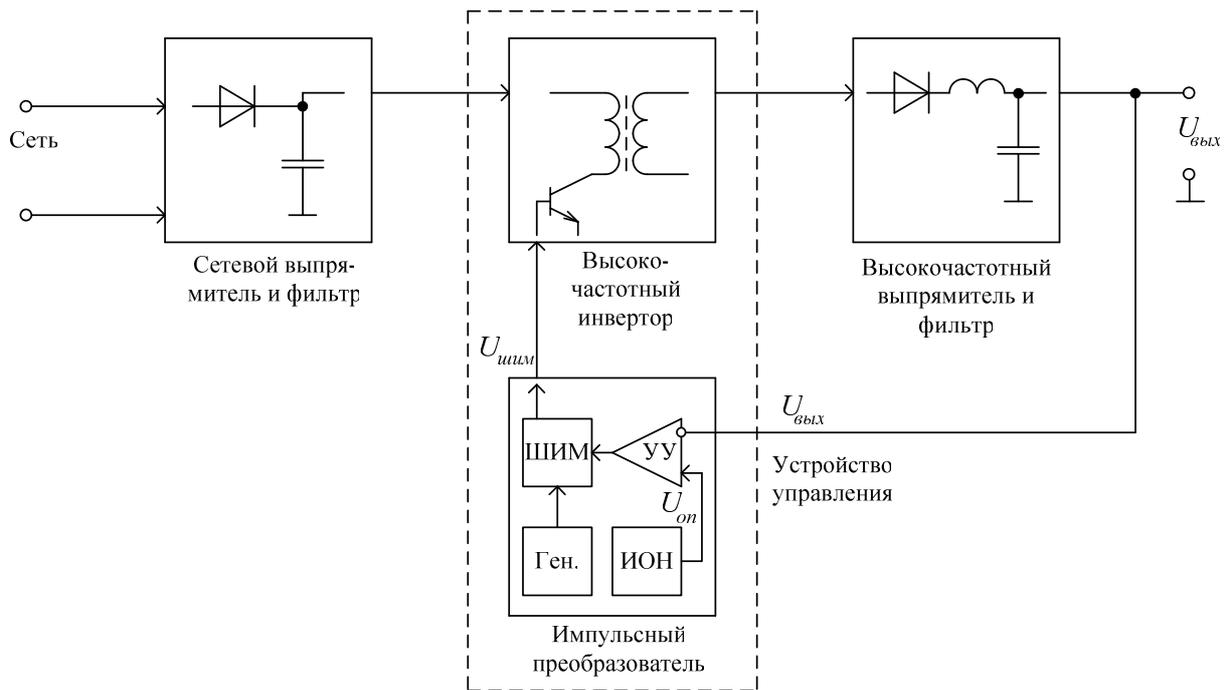


Рис. 12.16. Упрощенная структурная схема импульсного источника напряжения

Импульсный источник напряжения состоит из четырех основных блоков:

- сетевого выпрямителя с емкостным фильтром;
- высокочастотного инвертора выпрямленного напряжения сети;
- устройства управления высокочастотным инвертором (обычно это специализированная микросхема управления);
- выходного высокочастотного выпрямителя с емкостным фильтром.

Высокочастотный инвертор и устройство управления совместно образуют импульсный преобразователь.

Импульсный источник напряжения работает следующим образом. Синусоидальное напряжение сети (220 В, 50 Гц) выпрямляется сетевым выпрямителем и заряжает конденсатор фильтра, имеющий достаточно большую емкость. Большая емкость этого конденсатора обеспечивает низкие пульсации выпрямленного напряжения и увеличивает время удержания выходного напряжения в случае отключения. При напряжении сети 220 В напряжение на емкости составляет примерно 300 В.

Это напряжение поступает на вход импульсного преобразователя, который преобразует его в высокочастотные импульсы прямоугольной формы. Частота импульсного напряжения обычно лежит в пределах от 20 до 200 кГц.

С выхода импульсного преобразователя напряжение поступает на высокочастотный выпрямитель с емкостным сглаживающим фильтром.

В большинстве случаев высокочастотный инвертор работает на фиксированной частоте, а регулирование выходного напряжения обеспечивается с помощью широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов. Широтно-импульсное регулирование выполняет схема управления, на вход которой поступает выходное напряжение источника (см. рис. 12.16).

Достоинства импульсных источников напряжения:

- высокий коэффициент полезного действия;
- малые габариты и вес;
- высокая удельная мощность;
- все перечисленные достоинства импульсных источников напряжения получены благодаря применению ключевого режима работы силовых элементов – транзисторов. Так, при полностью открытом транзисторе напряжение на нем близко к нулю, а при полностью закрытом – в нем нет тока. В результате мощность, рассеиваемая транзистором, незначительна.

Недостатки импульсных источников напряжения:

- сложность схемы импульсных источников напряжения;
- наличие высокочастотных шумов и помех;
- увеличенные пульсации выходного напряжения;
- значительное время выхода на рабочий режим.

12.8. Регулируемые выпрямители

Регулирование выходного напряжения выпрямителя может выполняться различными способами. В настоящее время наиболее широко используется способ регулирования выходного напряжения выпрямителя при помощи управляемых вентилях – тиристоров.

Структура однополупериодного регулируемого выпрямителя приведена на рис. 12.17, а.

Принципиальным отличием этой схемы от схемы нерегулируемого выпрямителя (см. рис. 12.1) является включение в нее управляемого вентиля VS1 (тринистора) и устройства управления УУ. Временные диаграммы работы такого выпрямителя приведены на рис. 12.17, б.

Задающее воздействие $f_{зад}$ на вход УУ определяет величину выходного напряжения выпрямителя. Устройство управления формирует управляющие импульсы в моменты α , $2\pi + \alpha$, $4\pi + \alpha$ и т.д. и отпирает в эти моменты времени тиристор VS1. После включения тиристора управляющий электрод теряет управляющие свойства, поэтому выключение тиристора произойдет, когда напряжение на его аноде станет равным нулю. В результате выходное напряжение U_d уменьшается за счет отсекаания части положительной полуволны синусоиды (рис. 12.17. б). Очевидно, что момент

включения тиристора можно регулировать в пределах положительной полуволны напряжения u_2 , т.е. $0 \leq \alpha \leq \pi$. При этом если тиристор включается при $\alpha = 0^\circ$, то напряжение U_d на выходе выпрямителя будет максимальным, если $\alpha = 180^\circ$, то $U_d = 0$. Такой способ управления тиристором называется фазоимпульсным.

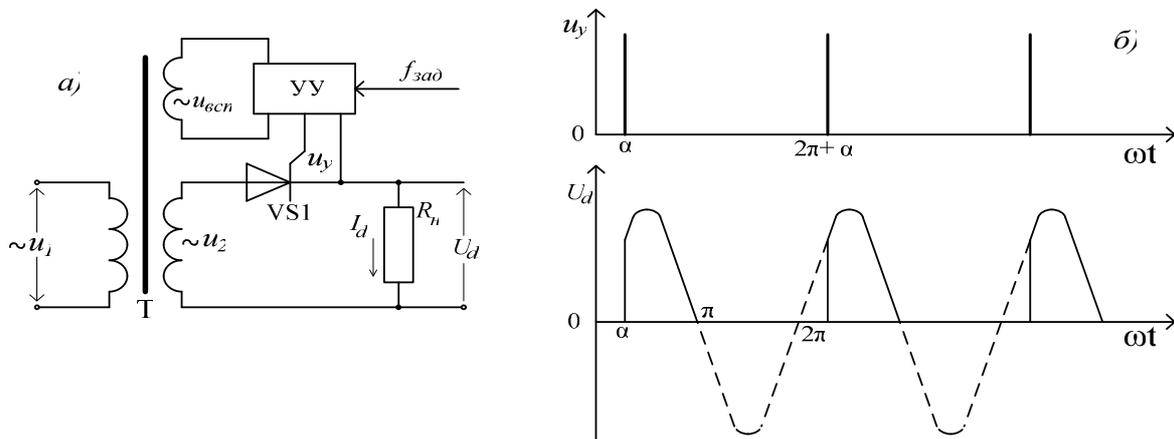


Рис. 12.17. Структура и временные диаграммы однополупериодного регулируемого выпрямителя

В приведенной схеме регулируемого выпрямителя пульсации выпрямленного напряжения достаточно большие, и для их снижения необходимо включать сглаживающий фильтр (на схеме не показан). При этом для сглаживания пульсаций емкостной фильтр применять нельзя, т.к. заряд конденсатора через резко открывшийся тиристор сопровождается большим броском тока, который может вывести тиристор из строя. Поэтому в тиристорных регулируемых выпрямителях применяют Г-образные LC-фильтры, чтобы перед конденсатором была включена индуктивность L .

Схема двухполупериодного регулируемого выпрямителя с нулевой точкой на двух тиристорах VS1 и VS2 с индуктивно-емкостным фильтром приведена на рис. 12.18.

Кроме двух тиристорov VS1 и VS2 в схему включен блокировочный диод VD1, который обеспечивает выключение этих тиристорov при снижении напряжения на их анодах до нуля.

При отсутствии блокировочного диода VD1 возникновение ЭДС самоиндукции L_{ϕ} не дает тиристорам VS1 и VS2 закрыться вовремя, и часть отрицательной полуволны синусоиды проходит на вход фильтра, что снижает напряжение и сужает диапазон регулирования выходного напряжения (рис. 12.19).

При работе с блокировочным диодом VD1 тиристоры VS1 и VS2 выключаются, когда напряжение на аноде становится равным нулю, т.к. ток от

ЭДС самоиндукции L_{ϕ} замыкается через $VD1$ и R_n , и напряжение на катодах тиристоров не меняет полярности (рис. 12.19). Угол включения тиристоров в схеме с блокировочным диодом $VD1$ можно регулировать от 0 до π .

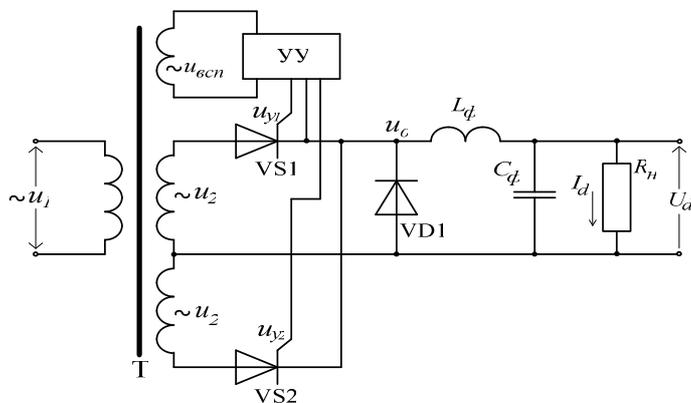


Рис. 12.18. Схема двухполупериодного регулируемого выпрямителя с нулевой точкой

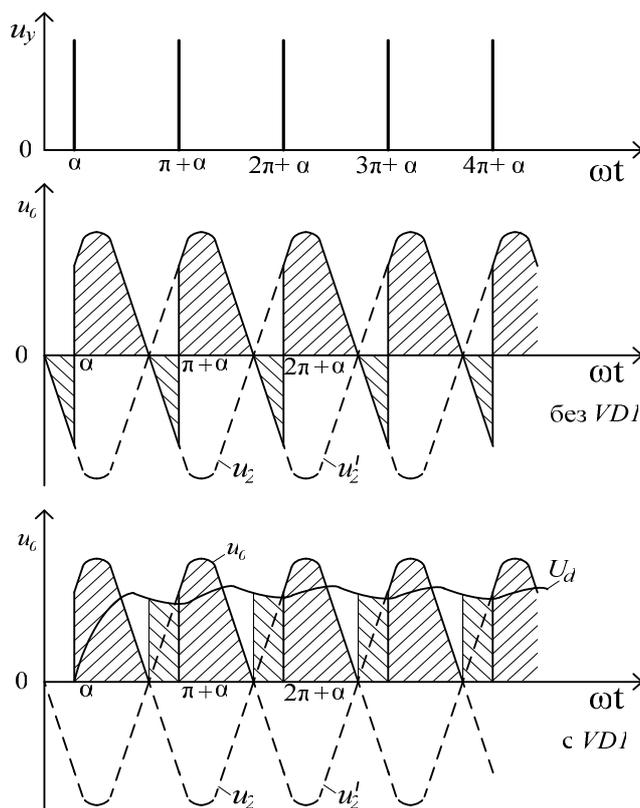


Рис. 12.19. Диаграммы работы двухполупериодного регулируемого выпрямителя с нулевой точкой

Мостовые схемы двухполупериодных регулируемых выпрямителей приведены на рис. 12.20.

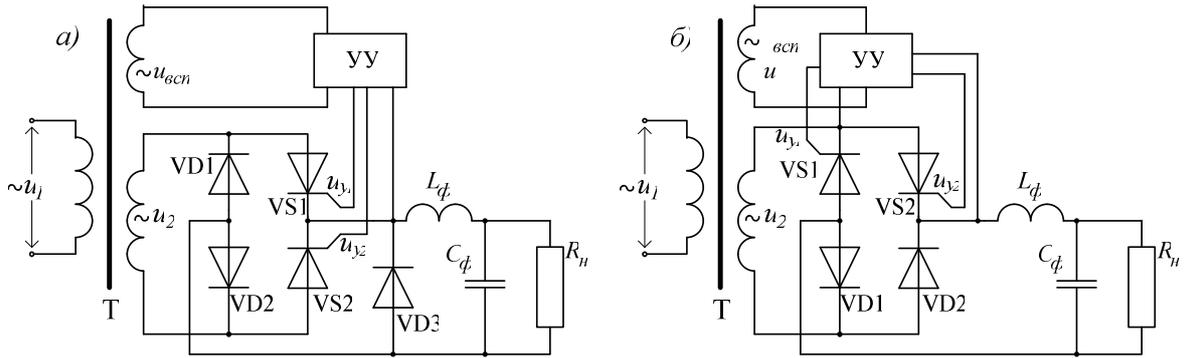


Рис. 12.20. Мостовые схемы двухполупериодных регулируемых выпрямителей

В схеме (рис. 12.20, а) тиристоры VS1 и VS2 включаются через угол, равный π . При включении тиристора VS1 одновременно включается диод VD2, при включении VS2 – диод VD1. Блокировочный диод VD3 выполняет те же функции, что и в схеме с нулевой точкой.

В схеме (рис. 12.20, б) при включении тиристора VS1 одновременно включается диод VD2, при включении VS2 – диод VD1. Блокировочный диод в этой схеме не нужен, т.к. его функции выполняют диоды VD1 и VD2. В остальном процессы протекают так же, как в двухполупериодном регулируемом выпрямителе с нулевой точкой.

12.9. Основные параметры и характеристики источников напряжения

Основными паспортными параметрами любого источника напряжения (выпрямителя, аккумулятора, сухого элемента, стабилизатора или импульсного источника напряжения) являются:

- номинальное напряжение или диапазон напряжений для регулируемых источников;
- максимальный ток, который источник способен отдать в нагрузку;
- максимальная мощность, которую способен развить источник напряжения;
- коэффициент пульсаций выходного напряжения.

Основной характеристикой любого источника напряжения является *внешняя характеристика*, которая представляет собой зависимость выходного напряжения на зажимах источника напряжения от силы тока, отдаваемой источником в нагрузку.

Любой реальный источник напряжения с подключенной нагрузкой может быть представлен эквивалентной схемой, приведенной на рис. 12.21.

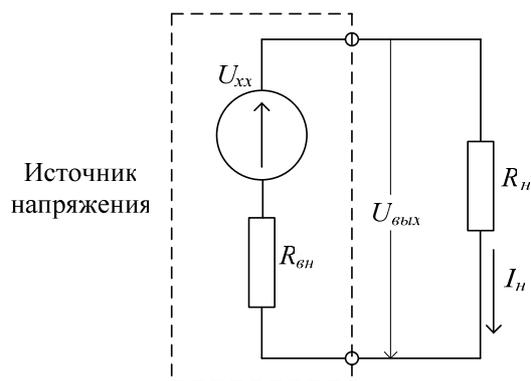


Рис. 12.21. Эквивалентная схема источника напряжения

Применив второй закон Кирхгофа к схеме (рис. 2.21), получим выражение для внешней характеристики:

$$U_{\text{вых}} = U_{xx} - R_n I_n.$$

На рис 12.22 приведена типовая графическая зависимость внешней характеристики для реального источника напряжения.

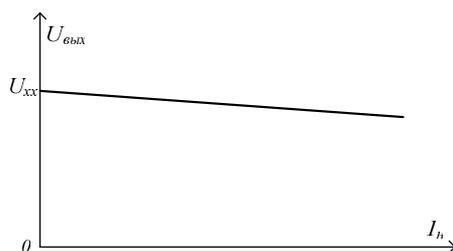


Рис. 12.22. Типовой график внешней характеристики источника напряжения

Внешняя характеристика любого реального источника напряжения выглядит аналогично и может отличаться только наклоном характеристики и величиной U_{xx} .

Контрольные вопросы

1. Назначение и применение выпрямителей.
2. Назначение источников постоянного напряжения и их основные параметры.
3. Понятие внешней характеристики и ее график для реального источника напряжения.
4. Понятие коэффициента пульсаций выходного напряжения источника постоянного напряжения.

5. Перечислите основные типовые схемы однофазных выпрямителей.
6. Поясните принцип действия однополупериодного однофазного выпрямителя.
7. Поясните принцип действия двухполупериодного однофазного выпрямителя с нулевой точкой.
8. Поясните принцип действия двухполупериодного однофазного мостового выпрямителя.
9. Дайте сравнительную оценку однофазных выпрямителей.
10. Перечислите основные типовые схемы трехфазных выпрямителей.
11. Поясните принцип действия трехфазного выпрямителя с нулевой точкой.
12. Поясните принцип действия трехфазного мостового выпрямителя Ларионова.
13. Дайте сравнительную оценку трехфазных выпрямителей.
14. Поясните принцип действия выпрямителя с удвоением напряжения.
15. Назначение и применение сглаживающих фильтров.
16. Изобразите типовые схемы сглаживающих фильтров и поясните их работу.
17. Понятие коэффициента сглаживания фильтра.
18. Дайте сравнительную оценку сглаживающих фильтров.
19. Поясните принцип действия параметрического стабилизатора напряжения и укажите его основные параметры.
20. Поясните принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения и укажите его основные параметры.
21. Перечислите основные преимущества импульсных источников напряжения по сравнению с выпрямителями, работающими на частоте 50 Гц.
22. Поясните принципы построения импульсных источников постоянного напряжения.
23. Поясните принцип действия однополупериодного регулируемого выпрямителя на тиристоре.
24. Поясните принцип действия двухполупериодного регулируемого выпрямителя с нулевой точкой.
25. Поясните принцип действия двухполупериодного регулируемого мостового выпрямителя.
26. Почему в регулируемых тиристорных выпрямителях нельзя применить емкостной фильтр?
27. Поясните роль блокировочного диода в схемах регулируемых тиристорных выпрямителей.

13. УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Усилением называют процесс управления значительными потоками энергии с помощью маломощного сигнала, а устройство, осуществляющее такое управление, называют *усилителем*.

Если управляющая и управляемая энергии являются электрическими, такой усилитель называют *усилителем электрических сигналов*.

Существует большое многообразие усилителей электрических сигналов, но наиболее широкое применение находят усилители, построенные на биполярных и полевых транзисторах, в т.ч. и в виде интегральных микросхем.

По характеру изменения усиливаемого сигнала во времени усилители делят на *усилители постоянного тока* и *усилители переменного тока*. Последние подразделяются на *усилители низкой частоты* и *высокой частоты*.

Различают усилители напряжения, тока и мощности. Но такое разделение условно, т.к. в любом случае в конечном счете усиливается мощность.

13.1. Усилители электрических сигналов на биполярных транзисторах

Поскольку существуют три схемы включения биполярных транзисторов (с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК)), то, соответственно, существуют три варианта построения усилительного каскада: по схеме с ОБ, с ОЭ и с ОК.

Усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ. Такие усилители находят наиболее широкое применение. Схема усилительного каскада по схеме с ОЭ приведена на рис. 13.1.

Назначение элементов схемы:

- R_1 и R_2 – входной делитель напряжения, задает постоянное напряжение смещения на базу транзистора VT1;
- R_k – сопротивление коллекторной нагрузки, непосредственно участвует в формировании выходного напряжения;
- VT1 – биполярный транзистор, выполняющий непосредственно усиление;
- совокупность R_3 и C_3 – образуют цепочку автоматического смещения.

При прохождении тока I_3 через R_3 , на нем образуется падение напряжения, которое сглаживается конденсатором C_3 . В результате получа-

ется положительное постоянное напряжение, смещающее эмиттер транзистора VT1 относительно общего провода. Результирующее напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ}$ изменяется, причем автоматически при изменении среднего тока $I_э$;

– кроме того, сопротивление $R_э$ выполняет функцию температурной стабилизации режима работы усилительного каскада.

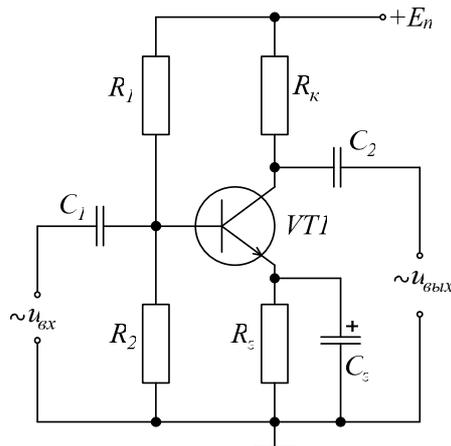


Рис. 13.1. Однокаскадный усилитель переменного тока на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ

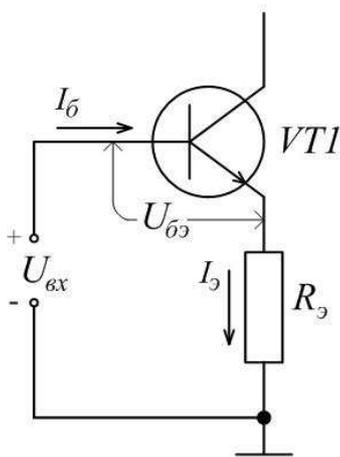


Рис. 13.2. Входная цепь транзистора VT1

Известно, что с повышением температуры проводимость полупроводников увеличивается и входное сопротивление транзистора уменьшается, поэтому необходимо ослабить влияние температуры на входное сопротивление усилительного каскада. Рассмотрим входную цепь транзистора VT1, приведенную на рис. 13.2.

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура входной цепи транзистора VT1 (рис. 13.2):

$$U_{вх} = U_{бэ} + I_э R_э.$$

Тогда входное сопротивление приведенной входной цепи транзистора VT1 найдем как

$$R_{вх} = \frac{U_{бэ}}{I_б} + \frac{I_э}{I_б} \cdot R_э = r_{бэ} + (\beta + 1) \cdot R_э.$$

Термонестабильным сопротивлением является сопротивление $r_{бэ}$ полупроводникового p - n -перехода. Но $r_{бэ} \ll (\beta + 1)R_э$, поэтому на полное сопротивление $R_{вх}$ температура влияет весьма незначительно. Таким образом, включение $R_э$ в цепь эмиттера обеспечивает температурную стабилизацию режима работы усилительного каскада;

– C_1 и C_2 – проходные конденсаторы, или конденсаторы связи. Они предназначены для разделения постоянной и переменной составляющих сигнала и пропускают только переменную составляющую сигнала.

Делитель напряжения R_1 и R_2 задает на базу VT1 (см. рис. 13.1) постоянное напряжение смещения $U_{см.б}$, в результате чего во входной и выходной цепях усилительного каскада устанавливаются определенные постоянные токи соответственно $I_{б0}$ и $I_{к0}$, а на выводах транзистора – постоянные напряжения $U_{см.к}$ и $U_{см.э}$. При этом

$$U_{см.к} = E_n - I_{к0} \cdot R_k,$$

$$U_{см.э} = (I_{б0} + I_{к0})R_э.$$

Этот режим работы называют *статическим* (режим по постоянному току, или режим покоя). При подаче на вход усилителя (см. рис. 13.1) переменного напряжения $u_{вх}$ конденсатор C_1 пропускает это напряжение на базу VT1, где оно суммируется с постоянным напряжением $U_{см.б}$. В результате ток базы $I_б$ транзистора начинает изменяться в соответствии с $u_{вх}$ около своего среднего значения $I_{б0}$. Соответственно будет изменяться и ток коллектора $I_к$ транзистора около своего среднего значения $I_{к0}$, т.к. $I_к \approx \beta I_б$. Переменная составляющая тока коллектора создает падение напряжения на $R_к$, в результате чего напряжение коллектора $U_к$ изменяется в соответствии с $u_{вх}$ около своего среднего значения $U_{см.к}$, формируя этим выходной сигнал. Значение выходного сигнала обычно значительно больше входного сигнала. Когда рассматривают приращения токов или напряжений, вызванные входным сигналом, то говорят, что это *режим работы по переменному току*, или *режим малого сигнала*.

Для определения параметров и характеристик усилительного каскада (определение токов и напряжений в элементах схемы, определение коэффициента усиления) широко используют графоаналитический метод расчета. Он удобен тем, что позволяет проводить расчеты с помощью экспериментально определенных характеристик транзистора.

Необходимые характеристики и построения согласно этому методу расчета усилительного каскада для схемы с ОЭ приведены на рис 13.3.

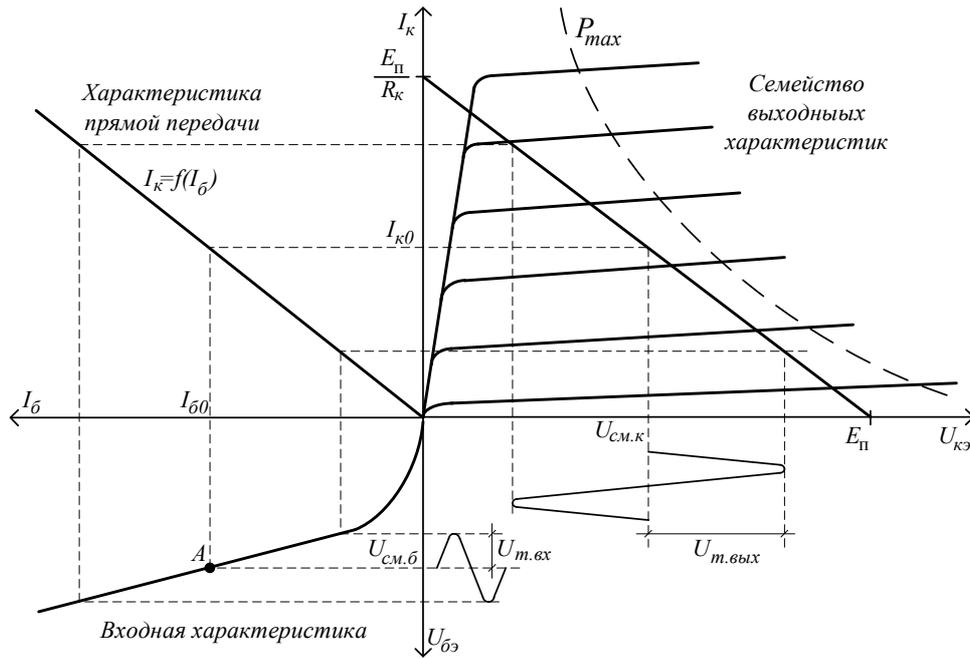


Рис. 13.3. Графоаналитический метод расчета усилительного каскада на биполярном транзисторе для схемы с ОЭ

В первом квадранте системы координат располагают семейство выходных характеристик транзистора, в третьем – входную характеристику транзистора, а во втором квадранте – характеристику прямой передачи $I_k = f(I_b)$.

Затем на семействе выходных характеристик транзистора строят выходную нагрузочную характеристику согласно уравнению

$$U_{кэ} = E_n - I_k \cdot R_k.$$

Уравнение выходной нагрузочной характеристики получено на основании второго закона Кирхгофа для выходного контура усилительного каскада (см. рис. 13.1). Выходная нагрузочная характеристика представляет собой прямую линию и строится по двум точкам:

- $I_k = 0$ (транзистор полностью закрыт), тогда $U_{кэ} = E_n$;
- $U_{кэ} = 0$ (транзистор полностью открыт), тогда $I_k = E_n/R_k$ (рис. 13.3).

Выходная нагрузочная характеристика должна обязательно располагаться ниже зоны максимальной мощности рассеивания транзистора.

Далее с учетом режима работы каскада и максимальной амплитуды усиливаемого сигнала выбирают положение рабочей точки каскада на входной характеристике транзистора (точка *A* на рис. 13.3). Проекция точки *A* на ось напряжения $U_{бэ}$ определяет величину постоянного напряжения смещения $U_{см.б}$, которое подается на базу транзистора. Проекция точки *A* через характеристику прямой передачи и через выходную нагрузочную характери-

стику на ось напряжения $U_{кэ}$ определяет величину постоянного напряжения смещения $U_{см.к}$, которое является постоянной составляющей выходного сигнала. Проекция точки A на ось тока I_b определяет величину тока покоя базы $I_{б0}$, а проекция точки A через характеристику прямой передачи на ось тока I_k определяет величину тока покоя коллектора $I_{к0}$ (см. рис. 13.3).

После этого на постоянное напряжение смещения базы накладывают переменный входной сигнал амплитудой $U_{т.вх}$ (в масштабе), и верхушки амплитуд положительной и отрицательной полуволны проектируют через входную характеристику, через характеристику прямой передачи и через выходную нагрузочную характеристику на ось напряжения $U_{кэ}$. В результате определяют амплитуду переменной составляющей выходного сигнала $U_{т.вых}$ (см. рис. 13.3).

Коэффициент усиления каскада по напряжению определяется как отношение вида

$$K_u = \frac{U_{т.вых}}{U_{т.вх}}.$$

Поскольку все построения выполняются в масштабе, то величины амплитуд $U_{т.вых}$ и $U_{т.вх}$ определяются графически.

Таким образом, в результате выполненных построений определены токи покоя базы $I_{б0}$ и коллектора $I_{к0}$, напряжения смещения базы $U_{см.б}$ и коллектора $U_{см.к}$, построена выходная нагрузочная характеристика и определен коэффициент усиления каскада по напряжению K_u .

Режимы работы усилительного каскада по схеме с ОЭ. Режим работы каскада определяется положением рабочей точки усилителя на входной характеристике (рис. 13.4).

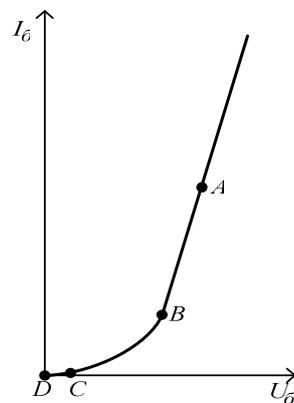


Рис. 13.4. Положение рабочей точки каскада в зависимости от режима работы

Режим A — это режим, в котором происходит линейное усиление разнополярного сигнала. Положение рабочей точки выбирают так, чтобы

переменный входной сигнал с амплитудой $U_{m.вх}$ в оба полупериода проектировался только на линейный участок входной характеристики.

Режим В – это режим, в котором происходит линейное усиление однополярного сигнала. Положение рабочей точки выбирают в начале линейного участка входной характеристики. Применяют в двухтактных усилителях.

Режим С – это режим, в котором происходит нелинейное усиление однополярного сигнала. Применяют в двухтактных усилителях.

Режим D – это ключевой режим, в котором транзистор может находиться только в двух состояниях: либо полностью открыт, либо полностью закрыт.

Основные свойства усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ:

- Коэффициенты усиления по напряжению, по току и по мощности значительно больше единицы.
- Сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями близок к 180° .
- Коэффициент усиления по напряжению K_u пропорционален величине R_k .

Частотные характеристики усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ:

Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада – это зависимость модуля коэффициента усиления по напряжению от частоты входного сигнала. На рис. 13.5 приведена амплитудно-частотная характеристика усилителя переменного тока, и она имеет явные завалы (снижения коэффициента усиления) в области низких и высоких частот

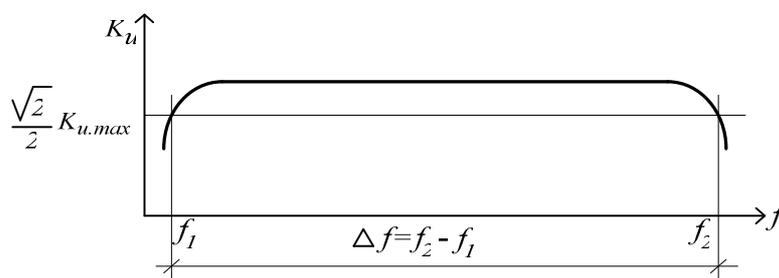


Рис. 13.5. Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада по схеме с ОЭ

Причиной завала характеристики в области низких частот является наличие проходного конденсатора (конденсатора связи) на входе усили-

теля (конденсатор C_1 , см. рис. 13.1). Это происходит потому, что с понижением частоты реактивное сопротивление конденсатора C_1 увеличивается, т.к.

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1}.$$

На низких частотах реактивное сопротивление X_{C1} становится соизмеримым с входным сопротивлением усилительного каскада, и поскольку X_{C1} включено последовательно с указанным входным сопротивлением, то часть входного сигнала в виде падения напряжения на X_{C1} теряется и до входа усилителя не доходит. Таким образом, на низкой частоте до входа усилителя доходит только часть входного сигнала, и чем ниже частота, тем меньше эта часть. В результате выходной сигнал уменьшается, и т.к. C_1 является элементом схемы, то это явление рассматривается как снижение коэффициента усиления каскада.

Причиной завала характеристики в области высоких частот является наличие паразитной (конструктивной) емкости между коллектором и базой $C_{бк}$. С увеличением частоты реактивное сопротивление конденсатора $C_{бк}$ уменьшается и становится соизмеримым с входным сопротивлением усилительного каскада, в результате чего часть выходного напряжения попадает на вход усилителя. Поскольку выходное напряжение находится почти в противофазе к входному, то в результате суммирования результирующее напряжение на входе усилителя опять уменьшается, выходное напряжение также уменьшается, что также рассматривается как снижение коэффициента усиления каскада.

Важным параметром усилительного каскада является полоса пропускания частот Δf . Этот параметр Δf определяется по амплитудно-частотной характеристике усилительного каскада. Для этого на характеристике необходимо провести горизонтальную линию на уровне $K_{u,\max} \cdot \sqrt{2} / 2$. Проекции точек пересечения этой линии с амплитудно-частотной характеристикой соответствуют границам полосы пропускания частот усилительного каскада Δf (см. рис 13.5).

Фазочастотная характеристика усилительного каскада – это зависимость угла сдвига фазы между выходным и входным напряжениями от частоты (рис. 13.6).

Причины появления значительных сдвигов по фазе между указанными напряжениями в области низких и высоких частот те же, что и для предыдущей характеристики.

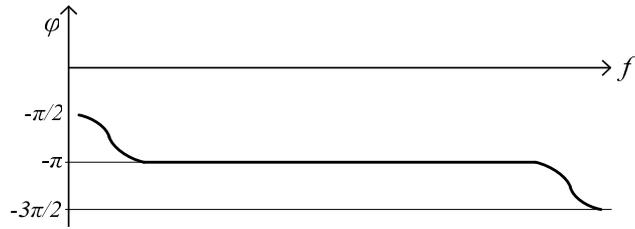


Рис. 13.6. Фазочастотная характеристика усилительного каскада по схеме с ОЭ

Усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с ОК (эмиттерный повторитель). Такие усилители также широко применяются. Схема усилительного каскада по схеме с ОК приведена на рис. 13.7.

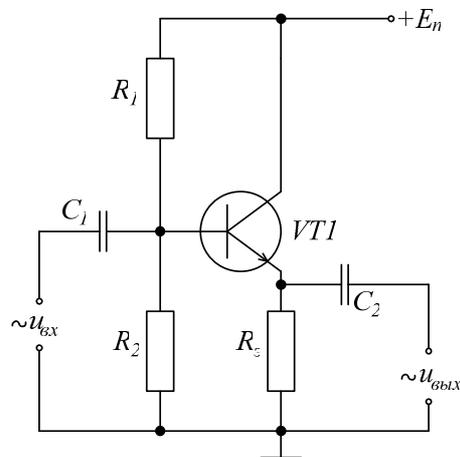


Рис. 13.7. Усилитель переменного тока на биполярном транзисторе по схеме с ОК

Отличительной особенностью такого каскада усиления является то, что коллектор через малое внутреннее сопротивление источника напряжения E_n подключен к общему проводу. Поэтому коллектор непосредственно подключен к E_n . Вторая отличительная особенность – сопротивление нагрузки включается в цепь эмиттера, и выходной сигнал также снимается с эмиттера (см. рис. 13.7). Назначение остальных элементов схемы аналогично предыдущей схеме усилителя с ОЭ.

Основные свойства усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОК:

- коэффициенты усиления по току и по мощности значительно больше единицы;
- коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, но приближается к единице. Для доказательства рассмотрим входную цепь усилительного каскада с ОК (рис. 13.8).

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для входной цепи каскада (рис. 13.8):

$$U_{вх} = U_{бэ} + U_{вых},$$

тогда

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_{бэ} + U_{вых}} < 1;$$

– входное сопротивление каскада велико. Для доказательства опять составим уравнение по второму закону Кирхгофа для входной цепи по схеме (рис. 13.8):

$$U_{вх} = U_{бэ} + R_э \cdot I_э.$$

Но входное сопротивление равно:

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_б} = \frac{U_{бэ} + R_э \cdot I_э}{I_б} = r_{бэ} + \frac{I_э}{I_б} \cdot R_э = r_{бэ} + (\beta + 1) \cdot R_э.$$

Таким образом $R_{вх}$ в $(\beta + 1)$ раз больше выходного сопротивления $R_э$, плюс относительно небольшое сопротивление перехода $r_{бэ}$ (десятки Ом);

– сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями близок к 0° .

Благодаря указанным свойствам этого усилительного каскада ($K_u \approx 1$, $\Delta\varphi \approx 0$) его называют эмиттерным повторителем, т.к. выходной сигнал, снимаемый с эмиттера, и по амплитуде и по фазе практически повторяет входной сигнал.

Частотные характеристики усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОК:

Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада по схеме с ОК выглядит аналогично (рис. 13.5) с теми отличиями, что модуль коэффициента усиления не больше единицы, и полоса пропускания частот значительно шире за счет сдвига в сторону высоких частот, так как паразитная емкость $C_{кб}$ уже не влияет, в этом случае начинает проявляться входная емкость $C_{бэ}$.

Фазочастотная характеристика усилительного каскада по схеме с ОК отличается от аналогичной характеристики для каскада с ОЭ (см. рис. 13.6) тем, что она будет располагаться выше на π (рис. 13.9).

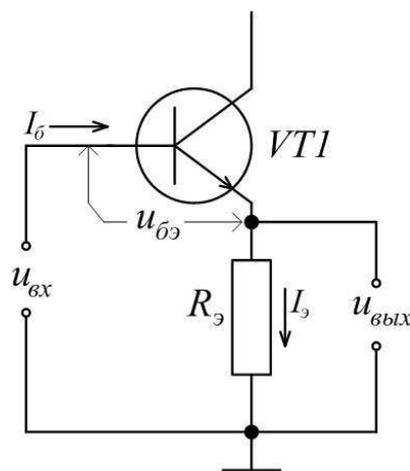


Рис. 13.8. Входная цепь усилительного каскада с ОК

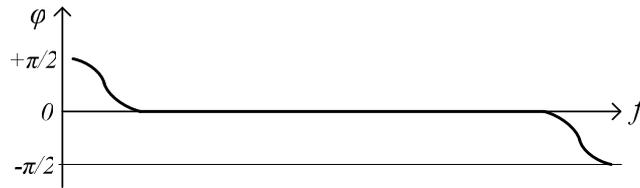


Рис. 13.9. Фазочастотная характеристика усилительного каскада по схеме с ОК

Усилительные каскады по схеме с ОК обычно применяют для целей согласования источника сигнала со входом усилителя, выхода усилителя – с нагрузкой.

Контрольные вопросы

1. Виды и типы усилителей электрических сигналов?
2. Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ, его свойства и характеристики.
3. Принцип температурной стабилизации режима работы усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ.
4. Что такое нагрузочная характеристика усилительного каскада? Ее построение.
5. Определение графоаналитическим методом коэффициента усиления усилительного каскада по напряжению.
6. Режимы работы усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ.
7. Частотные характеристики усилительного каскада на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ.
8. Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОК, его свойства и характеристики.
9. Почему у эмиттерного повторителя коэффициент усиления по напряжению меньше единицы?
10. Почему у эмиттерного повторителя большое входное сопротивление?

13.2. Усилители электрических сигналов на полевых транзисторах

Усилительные каскады на полевых транзисторах управляются напряжением, приложенным к затвору, и отличаются тем, что входные токи много меньше по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах

($10^{-7} - 10^{-9}$ А для полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом, $10^{-12} - 10^{-15}$ А для МДП-транзисторов).

Усилительный каскад на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом по схеме с ОИ. Такие усилители находят наиболее широкое применение.

Усилительный каскад (рис. 3.10) управляется входным напряжением, которое изменяет ток стока I_c транзистора. Последовательно с ним включен резистор R_c . Изменение тока I_c через резистор R_c приводит к изменению падения напряжения на нем, которое во много раз больше входного сигнала. Таким образом, согласно второму закону Кирхгофа, напряжение на стоке формируется по закону

$$U_c = E_n - I_c \cdot R_c.$$

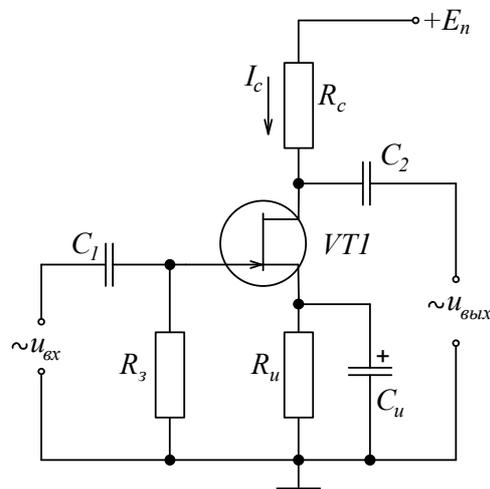


Рис. 13.10. Схема усилительного каскада, по схеме с ОИ

Необходимое напряжение смещения между затвором и истоком транзистора $U_{зи0}$ обеспечивается за счет падения напряжения на резисторе R_u , которое рассчитывается по выбранному току стока покоя I_{c0} и напряжению смещения $U_{зи0}$ по формуле

$$R_u \approx \frac{U_{зи0}}{I_{c0}}.$$

Конденсатор C_u сглаживает пульсации падения напряжения на R_u , в результате на исток задается постоянное напряжение смещения, равное $U_{зи0}$.

При отсутствии входного сигнала (статический режим) через транзистор проходит ток стока покоя I_{c0} , и на исток подано постоянное напряжение смещения, равное $U_{зи0} = R_u \cdot I_{c0}$, а на стоке установится постоянное напряжение покоя $U_c = E_n - R_c I_{c0}$.

Также как и для биполярных транзисторов, в этом случае для определения параметров усилительного каскада можно применить графоаналитический метод расчета каскада (рис. 13.11).

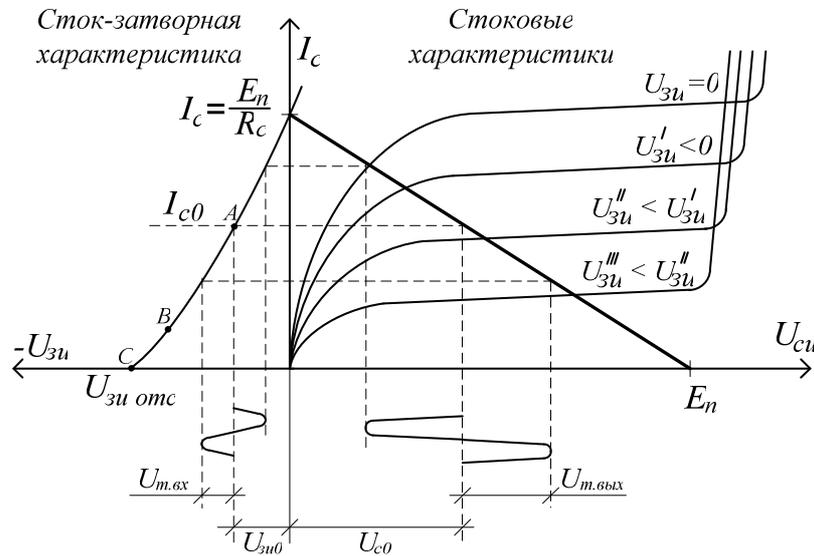


Рис. 13.11. Графоаналитический метод расчета усилительного каскада на полевом транзисторе для схемы с ОИ

В первом квадранте системы координат располагают семейство выходных стоковых характеристик транзистора $I_c = f(U_{cu})$ при $U_{zu} = \text{const}$, во втором — сток-затворную характеристику (характеристику управления) $I_c = f(U_{zu})$ при $U_{cu} = \text{const}$.

Затем, также как для биполярного транзистора, на семействе выходных стоковых характеристик полевого транзистора строят выходную нагрузочную характеристику согласно уравнению

$$U_c = E_n - I_c \cdot R_c .$$

Выходная нагрузочная характеристика также представляет собой прямую линию и строится по двум точкам:

- $I_c = 0$ (транзистор полностью закрыт), тогда $U_c = E_n$;
- $U_c = 0$ (транзистор полностью открыт), тогда $I_c = E_n/R_c$ (рис. 13.11).

Далее с учетом режима работы каскада и максимальной амплитуды усиливаемого сигнала выбирают положение рабочей точки каскада на входной характеристике транзистора (точка A на рис. 13.11). Проекция точки A на ось напряжения U_{zu} определяет величину постоянного напряжения смещения U_{zu0} . Проекция точки A через выходную нагрузочную ха-

рактическую характеристику на ось напряжения U_{cu} определяет величину постоянного напряжения смещения (покоя) стока U_{c0} , которое является постоянной составляющей выходного сигнала. Проекция точки A на ось тока I_c определяет величину тока покоя стока I_{c0} . (см. рис. 13.11).

После этого на постоянное напряжение смещения U_{zu0} накладывают переменный входной сигнал амплитудой $U_{m.вх}$ (в масштабе), и верхушки амплитуд положительной и отрицательной полуволны проектируют через сток-затворную и через выходную нагрузочную характеристики на ось напряжения U_{cu} . В результате определяют амплитуду переменной составляющей выходного сигнала $U_{m.вых}$ (см. рис. 13.11).

Коэффициент усиления каскада по напряжению определяется как отношение вида

$$K_u = \frac{U_{m.вых}}{U_{m.вх}}.$$

Поскольку все построения выполняются в масштабе, то величины амплитуд $U_{m.вых}$ и $U_{m.вх}$ определяются графически.

Таким образом, в результате выполненных построений определены ток покоя стока I_{c0} , напряжения смещения U_{zu0} и U_{c0} , построена выходная нагрузочная характеристика и определен коэффициент усиления каскада по напряжению K_u .

Режимы работы усилительного каскада по схеме с ОИ. Режим работы каскада определяется положением рабочей точки усилителя на сток-затворной характеристике (рис. 13.11).

Назначение режимов работы А, В и С такие же, как и для усилительного каскада на биполярном транзисторе с ОЭ.

Основные свойства усилительного каскада на полевом транзисторе по схеме с ОИ. По своим свойствам указанный усилительный каскад похож на усилитель, построенный на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ:

- коэффициенты усиления по напряжению, по току и по мощности значительно больше единицы;
- сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями близок к 180° ;
- Коэффициент усиления по напряжению K_u пропорционален величине R_c .

Частотные характеристики усилительного каскада на полевом транзисторе по схеме с ОИ. Частотные характеристики также аналогичны характеристикам усилителя на биполярном транзисторе с ОЭ, но с тем отличием, что частотный диапазон меньше, т.к. паразитные емкости в полевых транзисторах заметно больше, по сравнению с биполярными транзисторами.

Усилительный каскад на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом по схеме с ОС (истоковый повторитель). Такие усилители также широко применяются. Схема усилительного каскада, по схеме с ОС приведена на рис. 13.12.

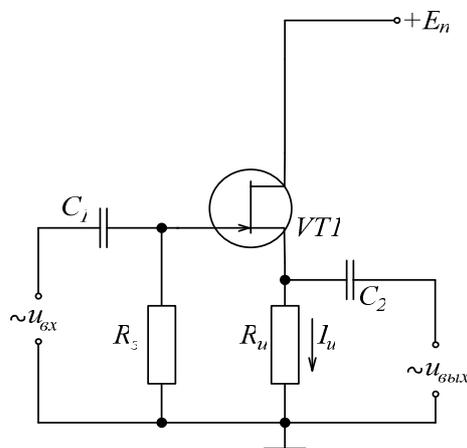


Рис. 13.12. Усилитель переменного тока на полевом транзисторе по схеме с ОС

Отличительной особенностью такого каскада усиления является то, что сток через малое внутреннее сопротивление источника напряжения E_n подключен к общему проводу. Поэтому сток непосредственно подключен к E_n . Вторая отличительная особенность – сопротивление нагрузки включается в цепь истока и выходной сигнал также снимается с истока (см. рис. 13.12). Назначение остальных элементов схемы аналогично предыдущей схеме усилителя с ОИ.

Основные свойства усилительного каскада на полевом транзисторе по схеме с ОС:

- коэффициенты усиления по току и по мощности значительно больше единицы;
- коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, но приближается к единице.

Для доказательства рассмотрим входную цепь усилительного каскада с ОС (рис. 13.13).

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для входной цепи каскада (рис. 13.13):

$$U_{вх} = U_{зи} + U_{вых}, \text{ тогда } K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{U_{зи} + U_{вых}} < 1;$$

- входное сопротивление каскада велико;

– сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями близок к 0° .

Благодаря указанным свойствам этого усилительного каскада ($K_u \approx 1$, $\Delta\varphi \approx 0$) его называют истоковым повторителем, т.к. выходной сигнал, снимаемый с истока, и по амплитуде и по фазе практически повторяет входной сигнал

Частотные характеристики усилительного каскада на полевом транзисторе по схеме с ОС. Указанные частотные характеристики аналогичны характеристикам эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе, но со сдвигом в область более низких частот.

Усилительные каскады на полевых транзисторах по схеме с ОС обычно применяют для целей согласования источника сигнала со входом усилителя или выхода усилителя с нагрузкой.

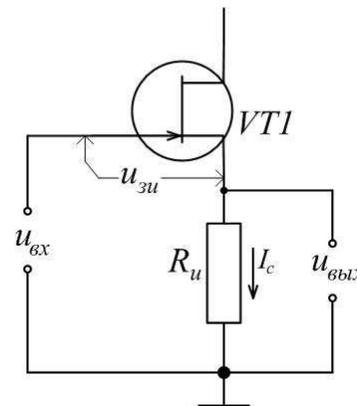


Рис. 13.13. Входная цепь усилительного каскада с ОС

Контрольные вопросы

1. Усилитель на полевом транзисторе с ОИ, его свойства и характеристики.
2. Как подается напряжение смещения на затвор полевого транзистора в схеме усилителя с ОИ?
3. Определение коэффициента усиления усилительного каскада с ОИ по напряжению графоаналитическим методом.
4. Усилитель на полевом транзисторе с ОС, его свойства и характеристики.
5. Где и почему применяются усилительные каскады на полевых транзисторах?
6. Сравнительная оценка свойств усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах.

13.3. Усилители постоянного тока

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления медленно изменяющихся во времени сигналов. Типовые амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики УПТ приведены на рис 13.14.

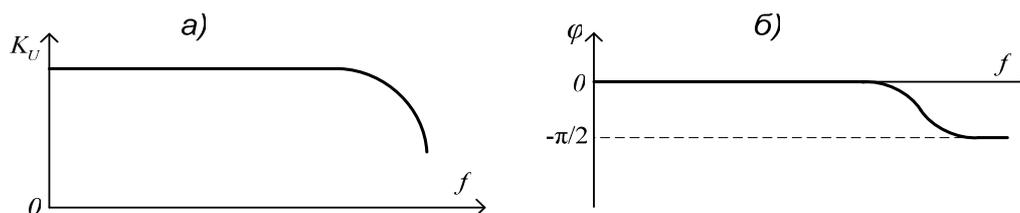


Рис. 13.14. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристики УПТ

При построении УПТ связь источника сигнала со входом УПТ, а также межкаскадные связи осуществляются только с помощью элементов, обладающих проводимостью как на постоянном, так и на переменном токе. Это резисторы, диоды и проводники. Реактивные элементы – конденсаторы и трансформаторы – для этих целей применять нельзя.

Характерной особенностью УПТ является то, что они обладают дрейфом нуля. Дрейф нуля – это самопроизвольное изменение выходного напряжения УПТ при $U_{вх} = 0 = \text{const}$. Различают абсолютный дрейф нуля на выходе УПТ и дрейф нуля, приведенный ко входу УПТ (приведенный дрейф). Абсолютный дрейф нуля представляет собой максимальное изменение выходного напряжения $U_{вых.др}$ при короткозамкнутом входе за определенный промежуток времени. Дрейф нуля, приведенный ко входу усилителя, оценивают как

$$U_{вх.др} = \frac{U_{вых.др}}{K_U}.$$

Причинами дрейфа нуля является ряд дестабилизирующих факторов, таких как колебания температуры, изменение напряжения источников питания, изменение параметров окружающей среды (давление, влажность), электромагнитные наводки, старение элементов схемы и др. Явление дрейфа нуля является недостатком УПТ, т.к. вносит дополнительные погрешности за счет суммирования дрейфа нуля с входным сигналом.

Основными способами уменьшения дрейфа нуля являются: применение глубоких отрицательных обратных связей; применение термокомпенсирующих элементов (резисторов, диодов, транзисторов); преобразование постоянного напряжения в переменное, усиление и обратное преобразование в постоянное напряжение; применение балансных (мостовых) схем и др.

Типовая схема усилителя постоянного тока (УПТ) приведена на рис. 13.15.

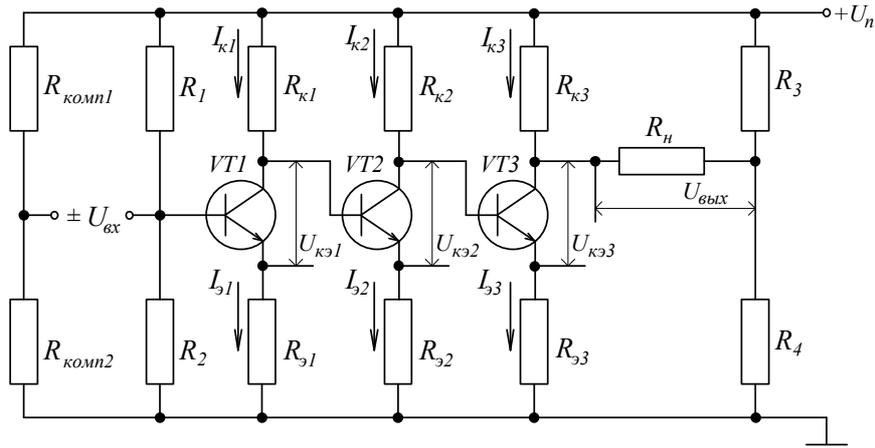


Рис. 13.15. Схема усилителя постоянного тока

Усилители постоянного тока обычно бывают многокаскадными, т.к. в одном каскаде трудно получить необходимое усиление из-за глубоких отрицательных обратных связей. К тому же, в многокаскадных усилителях удастся уменьшить величину приведенного дрейфа нуля.

Особенностью УПТ является то, что выводы коллектора и базы транзисторов соседних каскадов соединены проводниками. А резисторы, включенные в цепь эмиттера каждого каскада (см. рис. 13.15), обеспечивают внутрикаскадные отрицательные обратные связи по току и, кроме того, создают необходимые напряжения $U_{бэ0}$ в режиме покоя за счет падения напряжения $I_{эi} \cdot R_{эi}$. Так, например, для транзистора VT2 (см. рис. 13.15):

$$U_{бэ02} = U_{к01} - U_{э02} = U_{к01} - I_{э02} \cdot R_{э2}.$$

Задание режима по постоянному току первого каскада УПТ (см. рис. 13.15) осуществляется так же, как и для усилителей переменного тока с помощью входного делителя напряжения на резисторах R_1 и R_2 . Но входной сигнал $U_{вх}$ следует задавать с учетом напряжения смещения входного каскада на VT1. Для этого на входе образована мостовая схема, два плеча которой образуют резисторы R_1 и R_2 , задающие смещение на базу VT1, а два других плеча – резисторы $R_{комп1}$ и $R_{комп2}$ (см. рис. 13.15).

Часто сопротивление нагрузки УПТ $R_н$ включается в диагональ моста, образованного элементами выходной цепи оконечного каскада и резисторами R_3 и R_4 . Этим обеспечивается $U_{вых} = 0$ при $U_{вх} = 0$. Резисторы R_3 и R_4 создают компенсирующее напряжение выходной цепи каскада, которое равно напряжению покоя выходной цепи:

$$U_{комп.вых} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_n = U_{к03}.$$

Одним из эффективных способов уменьшения дрейфа нуля УПТ является применение дифференциальных усилительных каскадов (рис. 13.16).

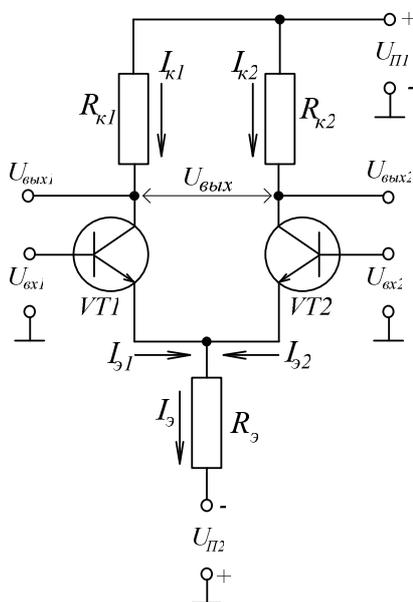


Рис. 13.16. Схема дифференциального усилительного каскада на биполярных транзисторах

Дифференциальным, т.е. разностным, называется усилительный каскад, усиливающий разность двух напряжений. Он представляет собой симметричный усилитель, построенный по параллельно-балансной схеме (см. рис. 13.16). Дифференциальный усилитель (ДУ) построен по принципу сбалансированного моста, два плеча которого образованы резисторами $R_{к1}$ и $R_{к2}$, а два других – транзисторами VT1 и VT2. Выходное напряжение снимается между коллекторами транзисторов (с диагонали моста) или с коллекторов.

Для питания ДУ обычно используются два разнополярных источника напряжения $U_{п1}$ и $U_{п2}$, напряжения которых равны по модулю. Использование источника напряжения $U_{п2}$ снижает потенциалы эмиттеров транзисторов VT1 и VT2 (см. рис. 13.16) до потенциала общего провода. Это позволяет подавать сигналы на входы усилителя относительно общего провода без введения дополнительных компенсирующих напряжений.

Поскольку схема ДУ (см. рис. 13.16) полностью симметрична, то изменение напряжения питания воздействует одинаково на транзисторы VT1 и VT2, баланс моста не нарушается, выходные напряжения не изменятся. Изменение температуры воздействует на токи транзисторов VT1 и VT2 тоже одинаково. Следовательно, в идеально симметричной схеме ДУ дрейф нуля должен отсутствовать. Но в реальной схеме ДУ дрейф нуля все же существует, но он в 10...100 раз меньше, чем в схеме обычного УПТ на биполярных транзисторах с ОЭ (см. рис. 13.15).

Если на обоих входах ДУ действуют равные по амплитуде, форме и фазе сигналы, то их называют *синфазными*.

Если на входы ДУ подаются сигналы, имеющие равные амплитуду и форму, но противоположные по фазе, то их называют *дифференциальными*.

ДУ работает следующим образом. При отсутствии входных сигналов $U_{вх.диф} = 0$ в коллекторных цепях транзисторов VT1 и VT2 протекают коллекторные токи $I_{к1} = I_{к2}$. Эти токи создают одинаковые падения напряжения на резисторах $R_{к1}$ и $R_{к2}$, т.е. $U_{вых1} = U_{вых2}$. Тогда дифференциальное выходное напряжение:

$$U_{вых.диф} = U_{вых1} - U_{вых2} = 0.$$

Равенство выходного дифференциального напряжения нулю при отсутствии входного сигнала называют режимом покоя. При этом через сопротивление $R_э$ протекают эмиттерные токи $I_{э1}$ и $I_{э2}$, которые создают на нем падение напряжения, направленное встречно $U_{н2}$. В результате на транзисторы VT1 и VT2 подаются постоянные напряжения смещения, задающие режим покоя:

$$U_{бэ} = U_{н2} - (I_{э1} + I_{э2}) \cdot R_э.$$

Таким образом, резистор $R_э$, включенный в цепь эмиттеров VT1 и VT2 (см. рис. 13.16), создает последовательную обратную связь по току, стабилизируя рабочую точку транзисторов. При изменении токов $I_{э1}$ и $I_{э2}$, вызванных изменениями напряжений источников питания $U_{н1}$ и $U_{н2}$, и температуры, происходит изменение $U_{бэ}$, которое в свою очередь стремится вернуть коллекторные токи к исходному состоянию, т.е. стабилизирует режим работы схемы. Но, все равно, наблюдается заметный уход рабочей точки режима работы транзисторов. Улучшить стабилизацию режима работы ДУ позволяет применение вместо $R_э$ генератора тока на транзисторе VT3 (рис. 13.17), который стабильно выдерживает условие:

$$I_g = I_{э1} + I_{э2} = \text{const}.$$

Качество работы ДУ характеризуется коэффициентом ослабления синфазного сигнала $K_{осс}$:

$$K_{осс} = \frac{K_{U.диф}}{K_{U.син}}.$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала показывает способность ДУ различать малый дифференциальный сигнал на фоне большого

синфазного напряжения. Для более качественной работы ДУ стремятся сделать K_{occ} как можно больше. Применение генератора тока на транзисторе VT3 (рис. 13.17), позволяет увеличить K_{occ} .

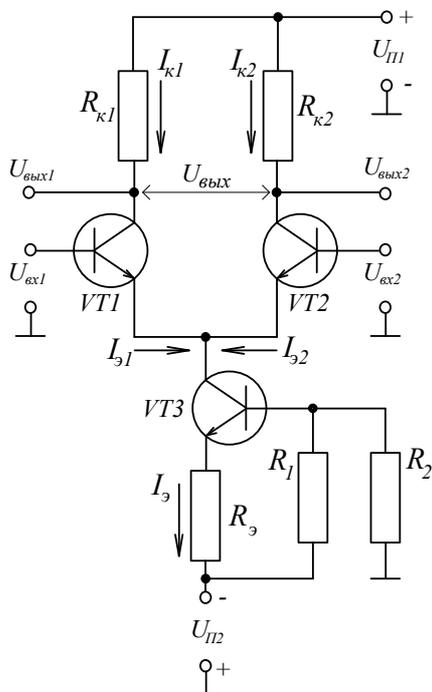


Рис. 13.17. Схема ДУ на биполярных транзисторах с генератором тока в цепях эмиттеров

Контрольные вопросы

1. Усилитель постоянного тока (УПТ), его свойства и характеристики.
2. Понятие дрейфа нуля УПТ, причины его возникновения и способы снижения.
3. Дифференциальный усилительный каскад на биполярных транзисторах, его свойства.
4. Понятие синфазного и дифференциального входного напряжения УПТ.
5. Понятие коэффициента ослабления синфазного сигнала для дифференциального УПТ или ОУ.

13.4. Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель напряжения, предназначенный для выполнения различных операций с аналоговыми сигналами: их усиление или ослабление, сложение или вычитание, интегрирование или дифференцирование, логарифмирование или потенцирова-

ние, преобразование их формы, компарирование и др. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей положительной и отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и другие элементы.

Для повышения точности выполняемых операций требуется, чтобы ОУ как можно ближе соответствовал идеальному усилителю, управляемому напряжением с бесконечно большим коэффициентом усиления. Значит, входное сопротивление ОУ должно быть равно бесконечности, тогда входной ток ОУ должен быть равен нулю. Выходное сопротивление должно быть равно нулю, нагрузка не должна влиять на выходное напряжение. Поскольку коэффициент усиления ОУ очень велик, то при конечном значении выходного напряжения входное напряжение должно быть близким к нулю.

Входная цепь ОУ обычно выполняется по дифференциальной схеме, а это значит, что входные сигналы можно подавать на любой из двух входов, один из которых изменяет полярность выходного напряжения и потому называется инвертирующим, другой не изменяет полярность выходного напряжения и называется неинвертирующим.

В интегральных ОУ для обеспечения устойчивости в широкой полосе частот используется частотная коррекция усиления, которая обеспечивает снижение усиления с ростом частоты. Для этого в состав ОУ включают интегрирующий каскад с внутренними или внешними цепями коррекции (рис. 13.18).

Таким образом, внутренняя структура ОУ включает в себя один или несколько дифференциальных каскадов УПТ, генераторы стабильного тока для питания каждого из них, интегрирующий каскад для обеспечения частотной коррекции, и выходной повторитель напряжения для уменьшения выходного сопротивления.

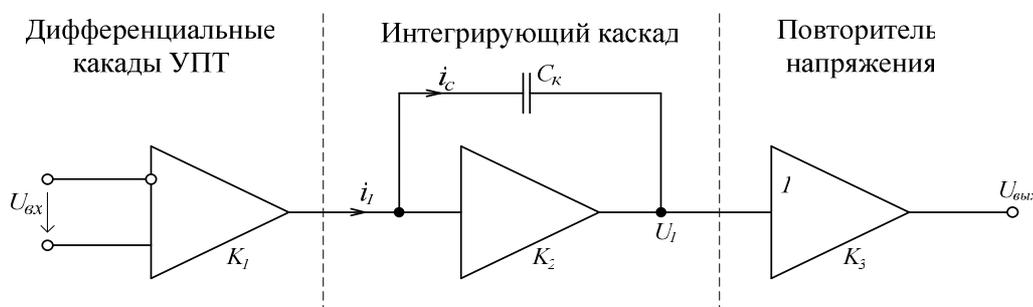


Рис. 13.18. Упрощенная внутренняя структура ОУ

Условные графические обозначения дифференциального ОУ приведено на рис 13.19.

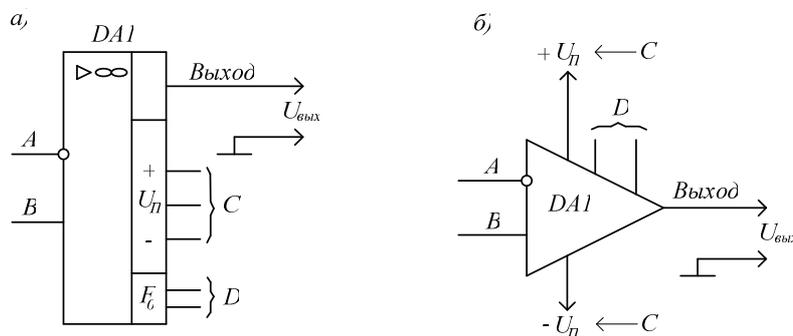


Рис. 13.19. Условные графические обозначения дифференциального ОУ

Согласно требованиям действующего ГОСТ на схемах принципиальных электрических следует пользоваться условным обозначением по рис. 13.19, *а*. Но во многих литературных источниках и журналах часто используют обозначение по рис. 13.19, *б*.

Инвертирующий вход (вход *A*) отмечают кружочком или пишут около него знак «минус» (-). Неинвертирующий вход (вход *B*) или совсем не отмечают или пишут около него знак «плюс» (+). Два вывода ОУ (группа выводов *C*) используются для подачи на него напряжений питания $+U_{n1}$ и $-U_{n2}$. Напряжения положительного $+U_{n1}$ и отрицательного $-U_{n2}$ источников питания обычно равны, а их общий вывод одновременно является общим выводом для входных и выходных сигналов. Группа выводов *D* используется для подключения элементов, входящих во внешние цепи частотной коррекции, но если в ОУ заложены внутренние цепи коррекции, то группа выводов *D* может отсутствовать.

Основные характеристики ОУ можно разделить на две группы: *статические* и *динамические*.

К *статическим* относятся характеристики, определяющие работу ОУ в установившемся режиме:

- коэффициент усиления на постоянном напряжении $K(0) = \Delta U_{вых} / \Delta U_{вх}$;
- напряжение смещения нулевого уровня $e_{см}$ - это напряжение, которое нужно приложить ко входу ОУ, чтобы сделать $U_{вых} = 0$;
- входные токи $i_{вх+}$ и $i_{вх-}$ - это токи, протекающие через входные цепи ОУ;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{осс}$;
- максимальный выходной ток $I_{вых.мах}$.

Динамические характеристики ОУ описываются обычно двумя параметрами: предельной частотой (частотой единичного усиления) f_{np} , т.е. $K(f_{np}) = 1$, и максимальной скоростью нарастания выходного напряжения $V_{и\text{ вых.мах}}$.

По своим техническим характеристикам все ОУ делятся на следующие группы по совокупности их параметров:

- универсальные ОУ, или общего применения ($K(0)=10^3\dots 10^5$, $f_{np} = 1,0\dots 10$ МГц, $e_{см} > 0,5$ мВ);
- прецизионные ОУ, или инструментальные ($K(0) > 0,5 \cdot 10^6$, $e_{см} < 0,5$ мВ);
- быстродействующие ОУ ($VU_{вых} > 20$ В/мкс, $f_{np} > 15$ МГц).

Типовые операции, выполняемые с использованием ОУ. Операционные усилители используются в качестве инвертирующих и неинвертирующих усилителей, повторителей напряжения, интегрирующих и дифференцирующих устройств, а также для создания аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, активных фильтров и других устройств.

Инвертирующий усилитель на ОУ выполняет операцию умножения входного напряжения на постоянный коэффициент (масштабирование) с изменением знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.20.

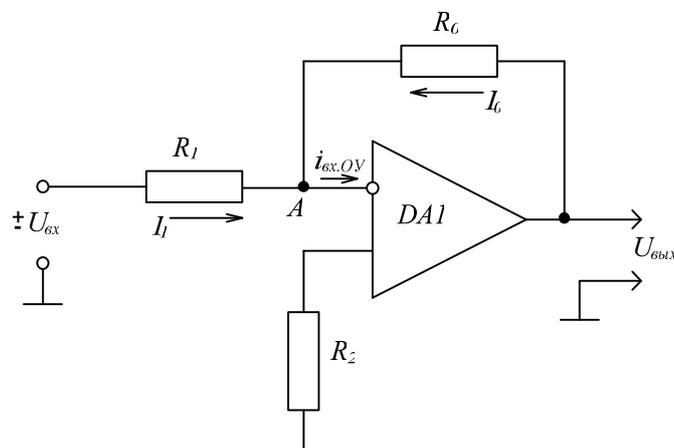


Рис. 13.20. Практическая схема инвертирующего усилителя

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение точки А (рис. 13.20) $U_A \approx 0$;
- входной ток ОУ $i_{вх.ОУ} \approx 0$.

Справедливость первого допущения основывается на том, что выходное напряжение ОУ $U_{вых}$ не может превысить величину напряжения ис-

точников питания, а это обычно не более ± 15 В. Пусть коэффициент усиления напряжения ОУ $K_u \approx 10^5$, тогда напряжение U_A не может превысить значение $U_A < \frac{U_n}{K_u} = 150$ мкВ относительно неинвертирующего входа.

Справедливость второго допущения основывается на том, что входное сопротивление ОУ много больше сопротивлений элементов, включенных во входные цепи R_1 и R_2 , и цепь обратной связи R_0 .

Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для точки А (см. рис. 13.20):

$$I_1 + I_0 = 0.$$

Выразим токи I_1 и I_2 через напряжения и сопротивления:

$$I_1 = \frac{U_{ex}}{R_1}, \quad I_0 = \frac{U_{вых}}{R_0}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$\frac{U_{ex}}{R_1} + \frac{U_{вых}}{R_0} = 0.$$

Решаем полученное уравнение относительно $U_{вых}$:

$$U_{вых} = -\frac{R_0}{R_1} \cdot U_{ex}.$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ пропорционально по величине входному напряжению U_{ex} и противоположно ему по знаку. Величина коэффициента, на который произошло умножение (масштабирование), определяется соотношением номиналов резисторов $\alpha = R_0 / R_1$. При этом значение α может быть как больше, так и меньше единицы.

Точность выполняемой операции определяется точностью выполнения сделанных допущений. Поэтому для повышения точности выполнения операций необходимо увеличивать коэффициент усиления ОУ K_u и входное сопротивление ОУ.

Неинвертирующий усилитель на ОУ выполняет операцию умножения входного напряжения на постоянный коэффициент (масштабирование) без изменения знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.21.

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение точки А (рис. 13.21) $U_A \approx U_{ex}$;
- входной ток ОУ $i_{ex.ОУ} \approx 0$.

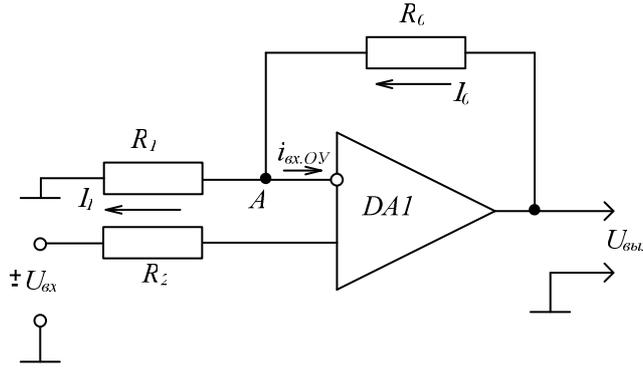


Рис. 13.21. Практическая схема неинвертирующего усилителя

Справедливость первого допущения основывается на том, что выходное напряжение ОУ $U_{\text{вых}}$ не может превысить величину напряжения источников питания, а это обычно не более ± 15 В. Пусть коэффициент усиления напряжения ОУ $K_u \approx 10^5$, тогда напряжение U_A не может превысить значение $U_A < \frac{U_n}{K_u} = 150$ мкВ относительно неинвертирующего входа, а на нем $U_{\text{вх}}$.

Справедливость второго допущения основывается на том, что входное сопротивление ОУ много больше сопротивлений элементов, включенных во входные цепи R_1 и R_2 и цепь обратной связи R_0 .

Составим уравнение по первому закону Киргофа для точки А (см. рис. 13.21):

$$I_0 - I_1 = 0.$$

Выразим токи I_1 и I_2 через напряжения и сопротивления:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}, \quad I_0 = \frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}}{R_0}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$\frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}}{R_0} - \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} = 0.$$

Решаем полученное уравнение относительно $U_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{R_0}{R_1} + 1 \right) U_{\text{вх}}.$$

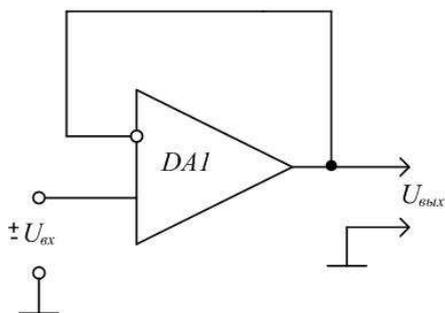


Рис. 13.22. Точный повторитель напряжения

Таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально по величине входному напряжению $U_{\text{вх}}$ и совпадает по знаку. Величина коэффициента, на который произошло умножение (масштабирование), определяется соотношением номиналов резисторов $\alpha = (1 + R_0/R_1)$. При этом значение α может быть только равно или больше единицы.

Так, если $R_0 = 0$ или R_1 равно бесконечности, то получим точный повторитель напряжения (рис. 13.22).

Точность выполнения операции определяется указанными выше факторами.

Инвертирующий сумматор напряжений на ОУ выполняет операцию алгебраического суммирования напряжений, поступающих на его входы с изменением знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.23.

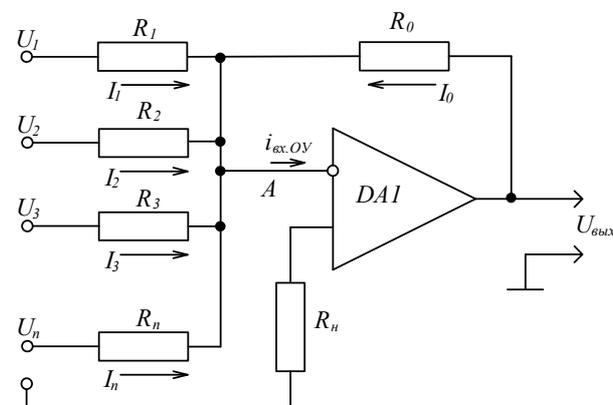


Рис. 13.23. Инвертирующий сумматор напряжений

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение точки А (см. рис. 13.23) $U_A \approx 0$;
- входной ток ОУ $i_{\text{вх.ОУ}} \approx 0$.

Справедливость сделанных допущений оговорена выше.

Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для точки А (см. рис. 13.23):

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n + I_0 = 0.$$

Выразим токи $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$ через напряжения и сопротивления:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_2}, I_3 = \frac{U_3}{R_3}, \dots I_n = \frac{U_n}{R_n}, I_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{R_0}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_0} = 0.$$

Решаем полученное уравнение относительно $U_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{вых}} = - \left(\frac{R_0}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_0}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_0}{R_3} \cdot U_3 + \dots + \frac{R_0}{R_n} \cdot U_n \right).$$

Или (что то же самое):

$$U_{\text{вых}} = - \sum_{i=1}^n \frac{R_0}{R_i} \cdot U_i.$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально по величине алгебраической сумме входных напряжений U_i с противоположным знаком. При этом перед каждым слагаемым напряжением стоит свой весовой коэффициент, равный отношению R_0/R_i . При равенстве всех резисторов $R_i = R_0$ все весовые коэффициенты обращаются в единицы, и тогда выполняется алгебраическое (с учетом знака) суммирование напряжений без весовых коэффициентов.

Точность выполнения операции определяется указанными выше факторами.

Неинвертирующий сумматор напряжений на ОУ выполняет операцию алгебраического суммирования напряжений, поступающих на его входы без изменения знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.24.

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение между точками А и В (рис. 13.24) $U_{AB} \approx 0$;
- входной ток ОУ $i_{\text{вх.ОУ}} \approx 0$.

Справедливость сделанных допущений оговорена выше.

Напряжения U_A и U_B равны (рис. 13.24):

$$U_A = U_B = \frac{R}{R + R_0} \cdot U_{\text{вых}}.$$

Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для точки В (рис. 13.24):

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0.$$

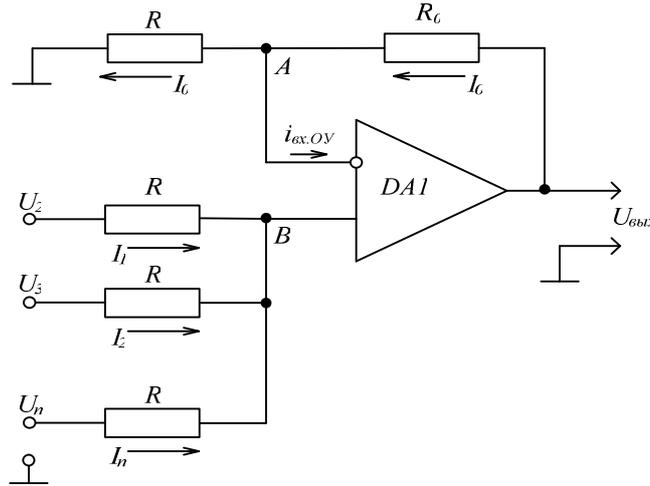


Рис. 13.24. Неинвертирующий сумматор напряжений

Выразим токи I_1, I_2, \dots, I_n через напряжения и сопротивления:

$$I_0 = \frac{U_1 - U_B}{R}, \quad I_2 = \frac{U_2 - U_B}{R}, \quad \dots, \quad I_n = \frac{U_n - U_B}{R}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$\frac{U_1 - U_B}{R} + \frac{U_2 - U_B}{R} + \dots + \frac{U_n - U_B}{R} = 0.$$

Отсюда $U_1 + U_2 + \dots + U_n = nU_B$.

Но $U_{\text{вых}} = U_B \left(1 + \frac{R_0}{R} \right),$

Поэтому $U_B = \frac{RU_{\text{вых}}}{R + R_0}.$

Тогда

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = \frac{n \cdot R}{R + R_0} \cdot U_{\text{вых}}.$$

Отсюда

$$U_{\text{вых}} = \frac{R + R_0}{n \cdot R} (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально по величине алгебраической сумме входных напряжений U_i без изменения знака. При этом перед суммой напряжений стоит общий коэффициент, равный отношению $(R + R_0)/n \cdot R$, где n – количество входов сумматора. При условии $R_0 = (n - 1) \cdot R$ этот коэффициент обращается в единицу, и тогда выполняется прямое алгебраическое (с учетом знака) суммирование напряжений.

Точность выполнения операции определяется указанными выше факторами.

Интегрирующий усилитель на ОУ выполняет операцию интегрирования входного напряжения с изменением знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.25.

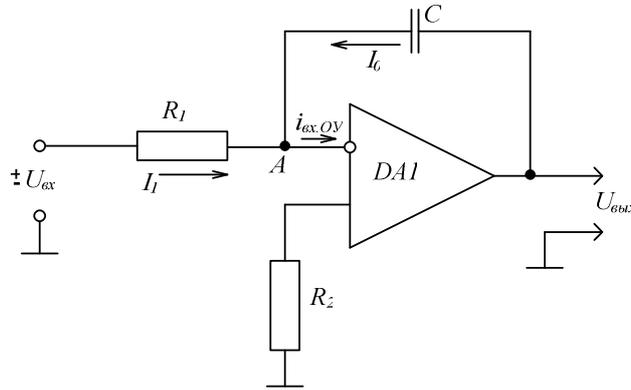


Рис. 13.25. Интегрирующий усилитель

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение точки А (см. рис. 13.25) $U_A \approx 0$;
- входной ток ОУ $i_{\text{вх.ОУ}} \approx 0$.

Справедливость сделанных допущений оговорена выше.

Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для точки А (см. рис. 13.25):

$$I_1 + I_0 = 0.$$

Выразим токи I_1 и I_2 через напряжения и элементы схемы:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}; \quad I_0 = C \cdot \frac{du_{\text{вых}}}{dt}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_1} + C \cdot \frac{du_{\text{вых}}}{dt} = 0.$$

Отсюда

$$\frac{du_{\text{вых}}}{dt} = -\frac{1}{R_1 C} U_{\text{вх}}.$$

После интегрирования получаем:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R_1 C} \int U_{\text{вх}} dt + C_u.$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально по величине интегралу от входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и противоположно ему по знаку. Перед интегралом стоит коэффициент $1/R_1C$, который следует учитывать. При необходимости можно выбрать значения номиналов резистора R_1 и конденсатора C такими, что их произведение обратится в единицу.

Точность выполнения операции определяется указанными выше факторами.

Дифференцирующий усилитель на ОУ выполняет операцию дифференцирования входного напряжения с изменением знака (полярности) выходного напряжения. Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.26.

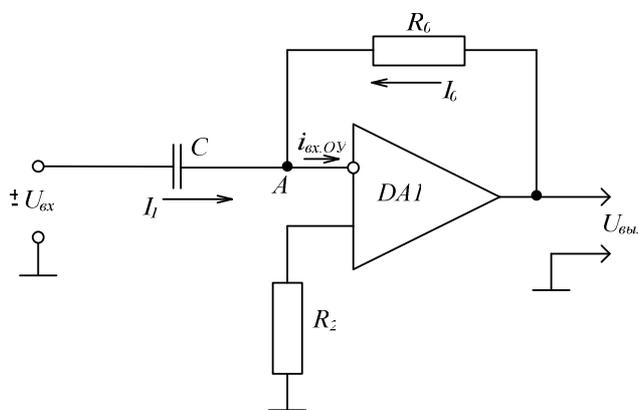


Рис. 13.26. Дифференцирующий усилитель

Для получения функции передачи такого усилителя сделаем два допущения:

- напряжение точки А (см. рис. 3.26) $U_A \approx 0$;
- входной ток ОУ $i_{\text{вх.ОУ}} \approx 0$.

Справедливость сделанных допущений оговорена выше.

Составим уравнение по первому закону Кирхгофа для точки А (рис. 13.26):

$$I_1 + I_0 = 0.$$

Выразим токи I_1 и I_2 через напряжения и элементы схемы:

$$I_1 = C \cdot \frac{du_{\text{вх}}}{dt}; \quad I_0 = \frac{U_{\text{вых}}}{R_0}.$$

Сделаем замены в уравнении токов:

$$C \cdot \frac{du_{\text{вх}}}{dt} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_0} = 0.$$

Решаем полученное уравнение относительно $U_{\text{вых}}$:

$$U_{\text{вых}} = -R_0 C \frac{du_{\text{вх}}}{dt}.$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально по величине производной от входного напряжения $U_{\text{вх}}$ и противоположно ему по знаку. Перед производной стоит коэффициент $R_0 C$, который следует учитывать. При необходимости можно выбрать значения номиналов резистора R_0 и конденсатора C такими, что их произведение обратится в единицу.

Точность выполнения операции определяется указанными выше факторами.

Компаратор напряжения на ОУ выполняет операцию сравнения двух входных напряжений и по результату сравнения формирует на выходе логический сигнал (больше-меньше). Практическая схема такого усилителя приведена на рис. 13.27.

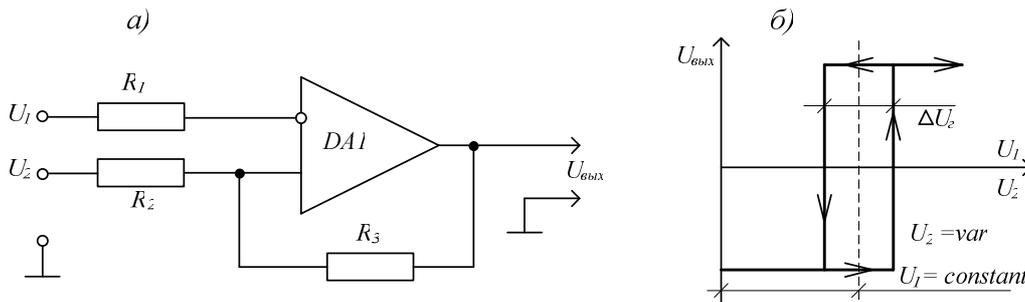


Рис. 13.27. Компаратор напряжения на ОУ и диаграмма его работы

В принципе ОУ без обратных связей способен выполнять функции компаратора напряжения, но такой вариант схема нестабилен, т.к. при равенстве сравниваемых напряжений $U_1 = U_2$ возможна генерация напряжения на выходе ОУ. Для предотвращения этого явления в схему введен резистор R_3 , который вводит гистерезис в характеристику передачи компаратора (см. рис. 13.27).

Если зафиксировать $U_1 = \text{const}$, то при изменении U_2 в прямом и обратном направлении переключения компаратора происходят при разных напряжениях (см. рис. 13.27, б). Это происходит за счет положительной обратной связи с выхода ОУ через R_3 на неинвертирующий вход ОУ.

Ширина петли гистерезиса ΔU_2 определяется величиной R_3 :

$$\Delta U_2 \approx \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot 2U_n.$$

Точность выполнения операции определяется теми же, указанными выше факторами.

Контрольные вопросы

1. Операционный усилитель (ОУ) и его назначение.
2. Внутренняя структура ОУ и понятие частотной коррекции ОУ.
3. Условные графические обозначения ОУ на схемах.
4. Статические и динамические параметры и характеристики ОУ.
5. Деление ОУ на виды по совокупности технических характеристик.
6. Инвертирующий усилитель, его схема, выполняемая операция, коэффициент передачи?
7. Неинвертирующий усилитель, его схема, выполняемая операция, коэффициент передачи?
8. Точный повторитель напряжения на ОУ, его схема и свойства.
9. Инвертирующий сумматор напряжений, его схема, выполняемая операция, коэффициенты передачи.
10. Неинвертирующий сумматор напряжений, его схема, выполняемая операция, коэффициенты передачи.
11. Интегрирующий усилитель, его схема, выполняемая операция, коэффициент передачи.
12. Дифференцирующий усилитель, его схема, выполняемая операция, коэффициент передачи.
13. Компаратор напряжений на ОУ, его схема, свойства и применение.

14. ИМПУЛЬСНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Импульсные и цифровые устройства относятся к категории устройств дискретной электроники, работа которых основана на использовании свойств электронных ключей. Электронные ключи используются для коммутации электрических сигналов и могут находиться всего в двух состояниях: «открыто» или «закрыто». Электронные ключи выполняют на полупроводниковых диодах, биполярных и полевых транзисторах.

К импульсным устройствам относятся различные управляемые и неуправляемые генераторы, формирователи и преобразователи импульсов, которые широко используются в составе цифровых устройств с памятью.

К цифровым устройствам относятся узлы комбинационного типа (без памяти), способные выполнять арифметические и логические операции, кодирование и декодирование сигналов, и др., и цифровые автоматы (с памятью), способные запоминать свои состояния (триггеры), коды чисел (регистры), выполнять счет импульсов (счетчики импульсов) и др.

14.1. Арифметические основы цифровых устройств

В цифровых устройствах в основном применяются только позиционные системы счисления (ПСС). *Позиционной* называется такая система счисления, в которой значение цифры зависит от ее позиции (разряда) в записи числа. Примером является десятичная ПСС. Переходя от младшего разряда к более старшему, проходим позиции (разряды) единиц, десятков, сотен и т.д.

Принципы построения ПСС общие для всех ПСС.

Пусть p – основание ПСС. Последовательность символов $\{0; 1; \dots; p - 1\}$ – цифры ПСС. Тогда любое число A в p -ичной ПСС может быть представлено в виде последовательности цифр этой ПСС:

$$A_{(p)} = \pm a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0, a_{-1}a_{-2}\dots a_{-m}.$$

При этом a_i принадлежит множеству $\{0; 1; \dots; p - 1\}$. Последовательность цифр слева от запятой – это целая часть числа, справа от запятой – это дробная часть числа.

Оценить значение этого числа мы можем только в десятичной ПСС, значит, его следует перевести в десятичную ПСС. Это делается с помощью полинома вида

$$A_{(10)} = a_{n-1} \cdot p^{n-1} + a_{n-2} \cdot p^{n-2} + \dots + a_1 \cdot p^1 + a_0 \cdot p^0 + a_{-1} \cdot p^{-1} + a_{-2} \cdot p^{-2} + \dots + a_{-m} \cdot p^{-m}. \quad (14.1)$$

В цифровых устройствах практическое применение находят двоичная ПСС, десятичная ПСС и шестнадцатиричная ПСС. Соответствие цифр перечисленных ПСС приведено в табл. 14.1.

Таблица 14.1

$p = 16$	$p = 10$	$p = 2$
0	0	0000
1	1	0001
2	2	0010
3	3	0011
4	4	0100
5	5	0101
6	6	0110
7	7	0111
8	8	1000
9	9	1001
A	10	1010
B	11	1011
C	12	1100
D	13	1101
E	14	1110
F	15	1111

Из табл. 14.1 видно, что каждая шестнадцатиричная цифра представляется четырехразрядным двоичным числом. Расположение разрядов во всех ПСС одинаково: справа младшие разряды, слева – старшие.

Двоичная ПСС получила самое широкое применение в цифровых устройствах потому, что две ее цифры «0» и «1» отождествляются с состояниями электронного ключа «открыто» и «закрыто». А это позволило создать устройства, выполняющие арифметические и логические операции, а также запоминающие устройства.

Десятичная ПСС используется только для ввода и вывода информации в форме, удобной для человека.

Шестнадцатиричная ПСС используется только для упакованной формы представления двоичных чисел при вводе и выводе информации.

Правило перевода чисел из двоичной ПСС в шестнадцатиричную. Двигаясь от запятой вправо и влево, разбивают число на группы по четыре цифры, дополняя неполные группы в начале и в конце числа нулями. Затем каждую группу из четырех цифр заменяют одной шестнадцатиричной цифрой по табл. 14.1.

Пример:

$$\underline{0011} \underline{0001}, \underline{1011} \underline{1000}_{(2)} = 31, \text{B8}_{(16)}.$$

Правило перевода чисел из шестнадцатиричной ПСС в двоичную. Каждая шестнадцатиричная цифра заменяется четырехразрядным двоичным числом по табл. 14.1.

Пример:

$$4F,CA_{(16)} = 0100\ 1111,1100\ 1010_{(2)}.$$

Правило перевода чисел из десятичной ПСС в двоичную (шестнадцатиричную). Перевод целой и дробной части числа выполняется раздельно по разным алгоритмам.

Для перевода целой части числа ее делят на основание $p = 2$, ниже записывают целую часть частного, а напротив – остаток. На следующем шаге делению подвергают полученную целую часть частного. Эта последовательность действий повторяется многократно до получения целой части частного, равной нулю. Число в двоичной ПСС запишется в виде остатков от деления, начиная с последнего частного, представляющего собой старшую цифру числа.

Пример:

$$35/2 \vdots 1$$

$$17/2 \vdots 1$$

$$8/2 \vdots 0$$

$$4/2 \vdots 0$$

$$2/2 \vdots 0$$

$$1/2 \vdots 1$$

$$0 \quad \text{Результат перевода: } 35_{(10)} = 100011_{(2)}.$$

Для перевода дробной части числа ее умножают на основание $p = 2$, ниже записывают целую часть произведения, отделяя ее от новой дробной части. На следующем шаге умножению подвергают новую дробную часть произведения. Эта последовательность действий повторяется многократно до получения нулевой дробной части или до получения необходимого количества разрядов после запятой. Число в двоичной ПСС запишется в виде целых частей произведений, начиная с первого произведения (сверху вниз).

Пример:

$$0,125 \cdot 2$$

$$0 \vdots 25 \cdot 2$$

$$0 \vdots 5 \cdot 2$$

$$1 \vdots 0 \quad \text{Результат перевода: } 0,125_{(10)} = 0,001_{(2)}.$$

Перевод чисел из любых ПСС в десятичную выполняется с помощью полинома (14.1).

Арифметические операции в двоичной ПСС выполняются по тем же правилам, что и в десятичной.

Контрольные вопросы

1. Принцип построения и форма представления чисел в позиционных системах счисления (ПСС).
2. Как выполняется перевод чисел из любой p -ичной ПСС в десятичную?
3. Понятия двоичной и шестнадцатиричной ПСС, их использование.
4. Перевод чисел из двоичной системы счисления в десятичную, переведите число $1101,101_{(2)}$ в десятичную ПСС.
5. Перевод чисел из шестнадцатиричной системы счисления в десятичную, переведите число $7AC,8D_{(16)}$ в десятичную ПСС.
6. Перевод чисел из двоичной системы счисления в шестнадцатиричную, переведите число $11011001,101_{(2)}$ в шестнадцатиричную ПСС.
7. Перевод чисел из шестнадцатиричной системы счисления в двоичную, переведите число $1FD,6A8_{(2)}$ в двоичную ПСС.
8. Выполните суммирование двоичных чисел $1101_{(2)}$ и $1010_{(2)}$.
9. Выполните вычитание двоичных чисел $1101_{(2)}$ и $1010_{(2)}$.
10. Выполните умножение двоичных чисел $1101_{(2)}$ и $1010_{(2)}$.

14.2. Логические основы цифровых устройств

Для формального описания узлов цифровых устройств при их анализе и синтезе используется аппарат алгебры логики (булевой алгебры).

В алгебре логики различают двоичные переменные (аргументы) и логические (переключательные) функции. Двоичные переменные могут принимать только два значения: 0 и 1, и обозначаются символами x_1, x_2, x_3 и т.д. Логические функции, как и аргументы, могут принимать лишь два значения: 0 или 1, и обозначаются как функции $f(x_1, x_2, \dots)$ либо в виде y_1, y_2, \dots .

Логические функции могут быть заданы либо в виде алгебрологических выражений, включающих операторы и операнды, либо в виде таблиц истинности, в которых для всех наборов аргументов указываются значения логических функций. Число наборов аргументов в таблице истинности ограничено числом 2^n , где n – количество аргументов.

Любая логическая функция может быть выражена в виде комбинации *элементарных* логических функций. К элементарным логическим функциям относятся всего три функции – это функции *И*, *ИЛИ*, *НЕ*.

Техническая реализация логических функций осуществляется логическими элементами (электронными схемами), которые называются также,

как и реализуемые логические функции. На физическом уровне логические сигналы 1 и 0 представляются в виде уровней напряжений (рис. 14.1, а). Условные графические обозначения логических элементов *И*, *ИЛИ*, *НЕ* приведены на рис. 14.1, б).

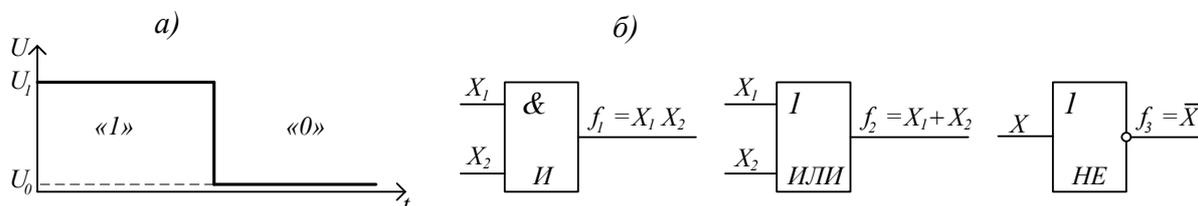


Рис. 14.1. Физическое представление логических сигналов и условные графические обозначения логических элементов

Сигнал логической 1 представляется обычно уровнем напряжения примерно $U_1 = 5,9$ или 15 В, в зависимости от серии используемых микросхем. Сигнал логического 0 представляется обычно отсутствием напряжения U_0 около $0,4$ В.

Логическая функция *И* (конъюнкция, логическое умножение) может иметь два и более аргументов. При этом функция принимает значение 1, если все аргументы одновременно равны 1, и значение 0 – если хотя бы один из аргументов равен 0. Отсюда и название функции «*И*», т.к. она принимает значение 1, только если и первый, и второй, и все остальные аргументы равны 1.

Аналитическая форма представления конъюнкции (функции *И*) от двух переменных X_1 и X_2 имеет вид: $f_1(X_1, X_2) = X_1 \cdot X_2$ или $f_1(X_1, X_2) = X_1 \& X_2$.

Табличная форма представления (таблица истинности) конъюнкции (функции *И*) от двух переменных X_1 и X_2 имеет следующий вид (табл. 14.2):

Таблица 14.2

X_1	X_2	f_1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Условное обозначение логического элемента, реализующего логическую функцию *И* от двух аргументов, приведено на рис. 14.1, б).

Логическая функция *ИЛИ* (дизъюнкция, логическое сложение) может иметь два и более аргументов. При этом функция принимает значение 0, если все аргументы одновременно равны 0, и значение 1 – если хотя бы

один из аргументов равен 1. Отсюда и название функции *ИЛИ*, т.к. она принимает значение 1, если или первый, или второй, или все остальные аргументы равны 1.

Аналитическая форма представления дизъюнкции (функции *ИЛИ*) от двух переменных X_1 и X_2 имеет вид: $f_2(X_1, X_2) = X_1 + X_2$ или $f_2(X_1, X_2) = X_1 \vee X_2$.

Табличная форма представления (таблица истинности) дизъюнкции (функции *ИЛИ*) от двух переменных X_1 и X_2 имеет следующий вид (табл. 14.3):

Таблица 14.3

X_1	X_2	f_2
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Условное обозначение логического элемента, реализующего логическую функцию *ИЛИ* от двух аргументов, приведено на рис. 14.1, б.

Логическая функция НЕ (отрицание) может иметь только один аргумент. При этом функция принимает значение 1, если аргумент равен 0, и функция принимает значение 0, если аргумент равен 1. Отсюда и название функции *НЕ*, т.к. она принимает значения, противоположные значению аргумента.

Аналитическая форма представления отрицания (функции *НЕ*) имеет вид: $f_3(X) = \overline{X}$

Табличная форма представления (таблица истинности) отрицания (функции *НЕ*) имеет вид (табл. 14.4):

Таблица 14.4

X	f_3
0	1
1	0

Условное обозначение логического элемента, реализующего логическую функцию *НЕ*, приведено на рис. 14.1, б.

Широкое применение на практике находят более сложные (комбинированные) логические элементы, реализующие более сложные логические функции, и выпускаемые в виде интегральных микросхем.

Отрицание конъюнкции (логическая функция *И-НЕ*). Эта функция образуется путем отрицания результата, получаемого при выполнении операции *И*.

Аналитическое представление функции *И-НЕ* от двух аргументов:

$$f_4(X_1, X_2) = \overline{X_1 \cdot X_2}.$$

Табличная форма представления (таблица истинности) функции *И-НЕ* от двух переменных X_1 и X_2 имеет вид (табл. 14.5):

Таблица 14.5

X_1	X_2	f_4
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Такая логическая функция может быть реализована при последовательном соединении логического элемента *И* с двумя входами и логического элемента *НЕ*. Условное обозначение логического элемента *И-НЕ* приведено на рис 14.2, а.

Отрицание дизъюнкции (логическая функция *ИЛИ-НЕ*). Эта функция образуется путем отрицания результата, получаемого при выполнении операции *ИЛИ*.

Аналитическое представление функции *ИЛИ-НЕ* от двух аргументов:

$$f_5(X_1, X_2) = \overline{X_1 + X_2}.$$

Табличная форма представления (таблица истинности) функции *ИЛИ-НЕ* от двух переменных X_1 и X_2 приведена в табл. 14.6.

Такая логическая функция может быть реализована при последовательном соединении логического элемента *ИЛИ* с двумя входами и логического элемента *НЕ*. Условное обозначение логического элемента *ИЛИ-НЕ* приведено на рис 14.2, б.

Таблица 14.6

X_1	X_2	f_5
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (операция *НЕРАВНОЗНАЧНОСТЬ*, или *СЛОЖЕНИЕ ПО МОДУЛЮ ДВА*). Обычно эта логическая функция от двух аргументов. Эта функция принимает значение 1, если значения аргументов X_1 и X_2 противоположны.

Аналитическое представление функции *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ* от двух аргументов:

$$f_6(X_1, X_2) = X_1 \oplus X_2.$$

Табличная форма представления (таблица истинности) функции *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ* от двух переменных X_1 и X_2 имеет вид (табл. 14.7):

Таблица 14.7

X_1	X_2	F_6
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Такая логическая функция может быть реализована с помощью функций *И*, *ИЛИ*, *НЕ* в соответствии с логическим выражением:

$$f_6(X_1, X_2) = \overline{X_1} \cdot X_2 + X_1 \cdot \overline{X_2}.$$

Для реализации такой логической функции потребуются два элемента *НЕ*, два элемента *И* и один элемент *ИЛИ*. В наборах выпускаемых интегральных микросхем выпускаются элементы *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ*, реализующие указанную функцию. Условное обозначение логического элемента *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ* приведено на рис 14.2, в.

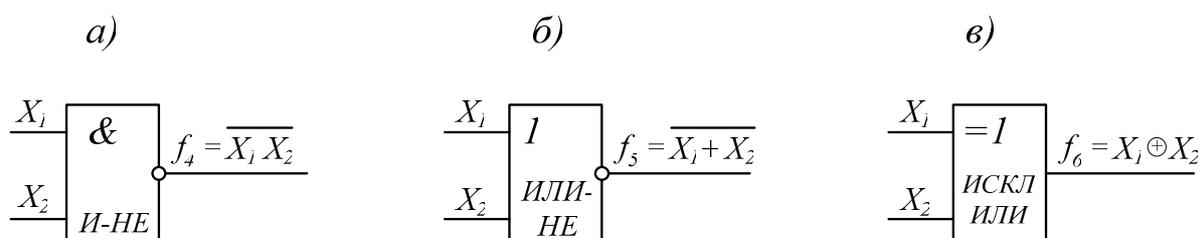


Рис. 14.2. Условные графические обозначения логических элементов

Законы алгебры логики. В алгебре логики используются четыре основных закона: переместительный, сочетательный, распределительный и закон инверсии. Эти законы позволяют проводить эквивалентные преобразования логических функций, выраженных с помощью функций *И*, *ИЛИ*, *НЕ*, упрощать и минимизировать их.

Переместительный закон аналогичен переместительному закону обычной алгебры и записывается в виде:

а) для дизъюнкции $X_1 + X_2 = X_2 + X_1$;

б) для конъюнкции $X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1$.

Таким образом, от перемены мест слагаемых (сомножителей) их логическая сумма (логическое произведение) не меняется.

Сочетательный закон также аналогичен сочетательному закону обычной алгебры и записывается в виде:

а) для дизъюнкции $X_1 + (X_2 + X_3) = (X_1 + X_2) + X_3$;

б) для конъюнкции $X_1 \cdot (X_2 \cdot X_3) = (X_1 \cdot X_2) \cdot X_3$.

Следовательно, можно группировать переменные, объединенные знаком дизъюнкции или конъюнкции, это не меняет значений логических функций.

Распределительный закон аналога в обычной алгебре не имеет и записывается в виде:

а) для дизъюнкции $X_1 + X_2 \cdot X_3 = (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3)$;

б) для конъюнкции $X_1 \cdot (X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3$.

Справедливость распределительного закона доказывается путем составления таблиц истинности для левой и правой частей каждого выражения.

Закон инверсии:

а) для дизъюнкции $\overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2}$;

б) для конъюнкции $\overline{X_1 \cdot X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$.

Справедливость закона инверсии также доказывается путем составления таблиц истинности для левой и правой частей каждого выражения..

Контрольные вопросы

1. Понятие логических функций, способы их задания и применение).
2. Элементарные логические функции, их алгебрологические выражения и таблицы истинности.
3. Логические функции *И-НЕ* и *ИЛИ-НЕ*, формы их представления.
4. Логическая функция *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ* (*Сумма по Мод2*), формы ее представления.
5. Основные законы алгебры логики.
6. Выражения переместительного закона для конъюнкции и дизъюнкции.
7. Выражения сочетательного закона для конъюнкции и дизъюнкции.

8. Выражения распределительного закона для конъюнкции и дизъюнкции.
9. Выражения законов инверсии для конъюнкции и дизъюнкции.
10. Условные графические обозначения логических элементов.
11. Физическая форма представления логических сигналов.

14.3. Техническая реализация логических элементов

Логические элементы могут быть построены в виде диодно-резисторных, транзисторных или интегральных схем. Первые простейшие логические элементы были построены на диодах и резисторах.

Техническая реализация двухвходового элемента *И* на диодах и резисторах приведена на рис. 14.3.

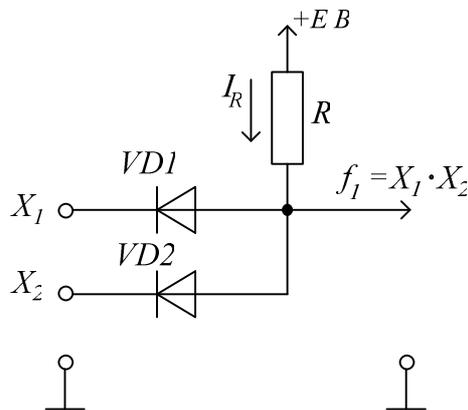


Рис. 14.3. Диодно-резисторный элемент *И*

Сигналы $X_i = 0$ будем имитировать подключением к общему проводу. Сигналы $X_i = 1$ будем имитировать подключением к источнику питания $+E В$. Тогда, если хотя бы один из сигналов $X_i = 0$, то от источника $+E В$ через резистор R пойдет ток:

$$I_R = \frac{E}{R}.$$

Такое значение тока получается при условии, что величина R много больше, чем сопротивление открытого диода. Тогда напряжение на выходе элемента примет значение

$$U_{\text{вых}} = E - I_R \cdot R = 0,$$

что соответствует логическому нулю. И только в случае, когда оба логических сигнала $X_1 = X_2 = 1$ (оба входа подключены к источнику $+E$) ток $I_R = 0$,

т.к. нет разности потенциалов между обоими входами и источником +E, а напряжение на выходе элемента примет значение

$$U_{\text{вых}} = E - 0 \cdot R = E ,$$

что соответствует единичному логическому сигналу. Таким образом, таблица истинности такого логического элемента совпадает с табл. 14.2 для двухвходового логического элемента *И*.

Техническая реализация двухвходового элемента *ИЛИ* на диодах и резисторах приведена на рис. 14.4.

Сигналы $X_i = 0$ будем имитировать подключением к общему проводу. Сигналы $X_i = 1$ будем имитировать подключением к источнику питания +E В.

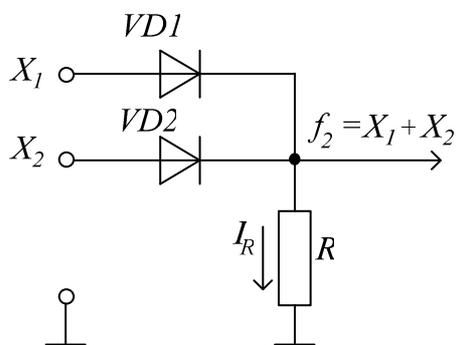


Рис. 14.4. Диодно-резисторный элемент *ИЛИ*

Тогда, если хотя бы один из сигналов $X_i = 1$, то от источника +E В через резистор R пойдет ток:

$$I_R = \frac{E}{R} .$$

Такое значение тока получается при условии, что величина R много больше, чем сопротивление открытого диода. Тогда напряжение на выходе элемента примет значение

$$U_{\text{вых}} = I_R \cdot R = \frac{E}{R} \cdot R = E ,$$

что соответствует логической единице. И только в случае, когда оба логических сигнала $X_1 = X_2 = 0$ (оба входа подключены к общему проводу) ток $I_R = 0$, т.к. нет разности потенциалов между обоими входами и общим проводом, а напряжение на выходе элемента примет значение

$$U_{\text{вых}} = 0 ,$$

что соответствует нулевому логическому сигналу. Таким образом, таблица истинности такого логического элемента совпадает с табл. 14.3 для двухвходового логического элемента *ИЛИ*.

Техническая реализация элемента *НЕ* возможна только с использованием транзисторов. По сути логический элемент *НЕ* представляет собой усилительный каскад на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ или на полевом транзисторе по схеме с ОИ. Схема логического элемента *НЕ* на биполярном транзисторе приведена на рис. 14.5.

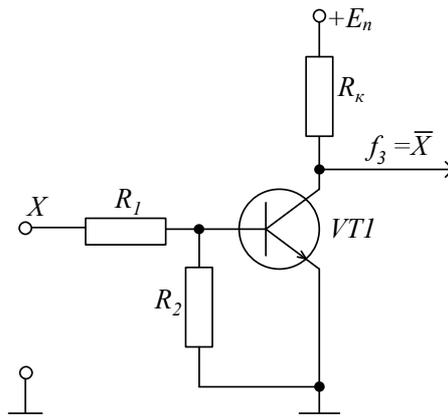


Рис. 14.5. Элемент *НЕ* на биполярном транзисторе

Транзистор *VT1* работает в ключевом режиме, т.е. он или полностью открыт, или полностью закрыт.

Сигнал $X = 0$ будем имитировать подключением входа к общему проводу. Сигнал $X = 1$ будем имитировать подключением входа элемента к источнику питания $+E$ В.

При подаче на вход элемента сигнала $X = 0$ (т.е. напряжения 0 В) транзистор *VT1* будет закрыт, т.к. ток базы $I_{\bar{o}} = 0$. Тогда, согласно второму закону Кирхгофа, напряжение на выходе элемента (на коллекторе *VT1*):

$$U_{\text{вых}} = E_n - I_{\kappa} \cdot R_{\kappa} = E_n - 0 \cdot R_{\kappa} = E_n.$$

Таким образом, уровень напряжения на выходе элемента соответствует логической единице.

При подаче на вход элемента сигнала $X = 1$ (т.е. напряжения E_n В) транзистор *VT1* будет открыт, т.к. ток базы $I_{\bar{o}} \approx E_n/R_1$. Тогда ток коллектора будет примерно равен $I_{\kappa} \approx E_n/R_{\kappa}$. Напряжение на выходе элемента будет

$$U_{\text{вых}} = E_n - I_{\kappa} \cdot R_{\kappa} = E_n - \frac{E_n}{R_{\kappa}} \cdot R_{\kappa} = 0.$$

Таким образом, уровень напряжения на выходе элемента соответствует логическому нулю.

Поскольку выходной сигнал такого логического элемента всегда противоположен входному, то его таблица истинности совпадает с табл. 14.4 для логической функции *НЕ*.

Более сложные логические элементы образуются комбинацией элементарных логических элементов. Так, например, если соединить последовательно логические элементы *И* и *НЕ*, то получим логический элемент *И-НЕ*.

Логические элементы в широком ассортименте выпускаются в виде интегральных микросхем с использованием биполярных и полевых транзисторов. Одним из направлений является транзисторно-транзисторные логические схемы (ТТЛ). На рис. 14.6, *а* приведена упрощенная схема базового элемента ТТЛ серии К155.

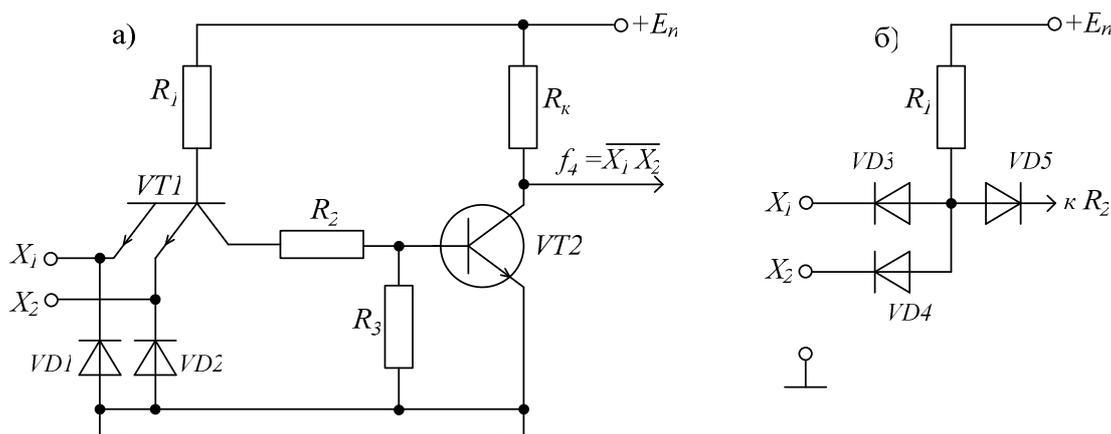


Рис. 14.6. Упрощенная схема базового элемента ТТЛ серии К155

В схеме базового элемента ТТЛ можно выделить две основные части: многоэмиттерный транзистор (МЭТ) $VT1$ с резистором R_1 и диодами $VD1$ и $VD2$, а также инвертор на транзисторе $VT2$. Двухэмиттерный транзистор можно приближенно представить в виде эквивалентной схемы из трех диодов $VD3$, $VD4$ и $VD5$ (рис. 14.6. *б*). Тогда двухэмиттерный транзистор $VT1$ с резистором R_1 превращается в диодный логический элемент *И*, и в сочетании с инвертором на транзисторе $VT2$ в итоге получается логический элемент *И-НЕ*.

Демпфирующие диоды $VD1$ и $VD2$ (рис. 14.6, *а*) служат для ограничения импульсов напряжения отрицательной полярности на входах логического элемента.

Контрольные вопросы

1. Схема и принцип действия диодно-резисторного элемента *И*.
2. Схема и принцип действия диодно-резисторного элемента *ИЛИ*.
3. Схема и принцип действия элемента *НЕ* на биполярном транзисторе.
4. Схема и принцип действия интегрального базового элемента ТТЛ серии К155.
5. Эквивалентная схема многоэмиттерного транзистора на диодах.
6. Назначение демпфирующих диодов *VD1* и *VD2* в схеме базового элемента ТТЛ.

14.4. Триггеры

Триггером называется электронная схема, имеющая два устойчивых состояния, одно из которых условно принимается за нулевое, а второе – за единичное, и способная запоминать свое состояние. Таким образом, триггер способен запомнить значение одного разряда двоичного числа.

Двоичный статический триггер имеет два выхода: прямой выход Q и инверсный \bar{Q} . Когда $Q = 0$, $\bar{Q} = 1$, триггер находится в нулевом состоянии, при $Q = 1$, $\bar{Q} = 0$ – в единичном состоянии.

Триггер может иметь следующие виды входов управления:

- S, R – установочные входы;
- D, J, K – информационные входы, определяющие, в какое состояние необходимо установить триггер;
- C – синхронизирующий вход, определяет момент переключения триггера.

В зависимости от используемых информационных входов управления триггеры бывают следующих типов:

- *RS-триггеры* (триггеры с отдельными входами), которые имеют вход S установки в состояние 1 (от англ. set – установка) и вход R установки в 0 (от англ. reset – сброс, установка в 0). Триггеры, имеющие инверсные входы \bar{R} и \bar{S} , называются *RS-триггеры с инверсными входами*;

- *D-триггеры* (от англ. delay – задержка), имеющие один информационный вход D , по которому они устанавливаются как в состояние 1, так и в 0;

- *JK-триггеры*, имеющие информационный вход K установки в состояние 0 (от англ. kill – внезапное отключение) и вход J установки в 1 (от англ. jock – внезапное включение).

В зависимости от наличия синхровхода C триггеры бывают асинхронные (триггер не имеет ни одного синхровхода C) и синхронные (триггер имеет хотя бы один синхровход C),

RS-триггер. Чаще всего RS-триггеры бывают асинхронными, но могут иметь либо прямые, либо инверсные входы.

Условное графическое обозначение и схема построения RS-триггера с инверсными входами приведены на рис. 14.7.

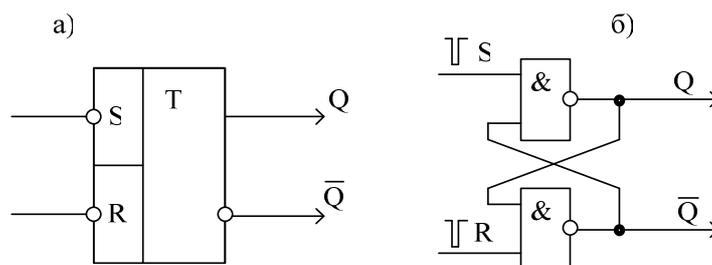


Рис. 14.7. Условное обозначение и схема построения RS-триггера с инверсными входами (кружочки на входах и выходах обозначают инверсию)

При поступлении на вход S инверсного входного сигнала (активный уровень 0) на выходе $Q = 1$ (рис. 14.7, б), тогда на входах нижнего элемента И-НЕ совпадут две единицы и $\bar{Q} = 0$. Таким образом, RS-триггер установился в состояние 1 и будет сохранять его после снятия сигнала со входа S , т.к. инверсный выходной сигнал $\bar{Q} = 0$ удерживает выход верхнего элемента И-НЕ в состоянии 1.

При поступлении на вход R инверсного входного сигнала RS-триггер установится в состояние 0 ($Q = 0$, $\bar{Q} = 1$) и также будет сохранять его после снятия сигнала со входа R . Все процессы происходят аналогично, но наоборот.

Режимы работы RS-триггера с инверсными входами и его состояния отражены в табл. 14.7.

Таблица 14.7

Режим работы RS-триггера	Входы RS-триггера		Выходы RS-триггера	
	S	R	Q	\bar{Q}
Установка в состояние «1»	0	1	1	0
Режим хранения	1	1	1	0
Установка в состояние «0»	1	0	0	1
Режим хранения	1	1	0	1
Запрещенная комбинация	0	0	1	1

Как видно из табл. 14.7, одновременно на входы RS -триггера нельзя подавать сигналы $R = S = 0$, т.к. при этом состояние триггера неопределенно $Q = \bar{Q} = 1$, и после снятия сигналов он установится в произвольное состояние, что грозит утерей информации о предыдущем состоянии триггера.

Условное графическое обозначение и схема построения RS -триггера (с прямыми входами) приведены на рис. 14.8.

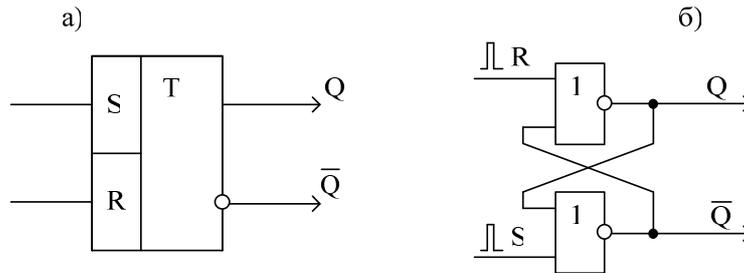


Рис. 14.8. Условное обозначение и схема построения RS -триггера

При поступлении на вход S прямого входного сигнала (активный уровень $S = 1$) на выходе $\bar{Q} = 0$ (рис. 4.8, б), тогда на входах верхнего элемента *ИЛИ-НЕ* совпадут два нуля и $Q = 1$. Таким образом, RS -триггер установился в состояние 1 и будет сохранять его после снятия сигнала со входа S , т.к. выходной сигнал $Q = 1$ удерживает выход нижнего элемента *ИЛИ-НЕ* в состоянии 0, а два нуля на входах верхнего элемента *ИЛИ-НЕ* удерживают выход $Q = 1$.

При поступлении на вход R прямого входного сигнала RS -триггер установится в состояние 0 ($Q = 0, \bar{Q} = 1$) и также будет сохранять его после снятия сигнала со входа R . Все процессы происходят аналогично, но наоборот.

Режимы работы RS -триггера (с прямыми входами) и его состояния отражены в табл. 14.8.

Таблица 14.8

Режим работы RS -триггера	Входы RS -триггера		Выходы RS -триггера	
	S	R	Q	\bar{Q}
Установка в состояние «1»	1	0	1	0
Режим хранения	0	0	1	0
Установка в состояние «0»	0	1	0	1
Режим хранения	0	0	0	1
Запрещенная комбинация	1	1	0	0

Как видно из табл. 14.8 одновременно на входы RS -триггера нельзя подавать сигналы $R = S = 1$, т.к. при этом состояние триггера неопределенно $Q = \bar{Q} = 0$ и после снятия сигналов он установится в произвольное состояние, что грозит утерей информации о предыдущем состоянии триггера.

RS -триггеры применяются для построения различных устройств управления с запоминанием состояния и построения регистров.

D-триггер. D -триггеры обычно бывают синхронными, т.к. они имеют один синхровход (рис. 14.9). Стандартный D -триггер кроме инверсных R и S входов имеет информационный D -вход и синхровход C .

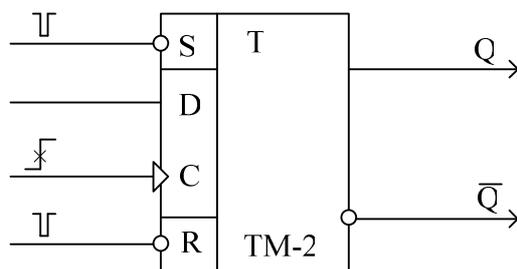


Рис. 14.9. Условное графическое обозначение D -триггера

По установочным R и S входам D -триггер устанавливается как обычный RS -триггер, при этом R и S входы обладают приоритетом перед D и C входами. Это значит, что в моменты времени когда входные сигналы R и S активны, сигналы на D и C входах игнорируются.

Особенностью переключения D -триггера при действии сигналов на D и C входы является то, что триггер копирует состояние D -входа при поступлении синхроимпульса на C -вход. Причем триггер переключается в момент действия именно прямого (переднего) фронта синхроимпульса. Это значит, что если вход $D = 0$, то с приходом синхроимпульса триггер переключится в нулевое состояние ($Q = 0, \bar{Q} = 1$). Если же вход $D = 1$, то с приходом синхроимпульса триггер переключится в единичное состояние ($Q = 1, \bar{Q} = 0$).

Такие D -триггеры широко применяются для построения регистров различного типа и назначения.

D -триггер может работать в режиме счетного триггера (T -триггера), который применяют для построения счетчиков импульсов.

Основным свойством T -триггера является переключение триггера в противоположное состояние с приходом на его T -вход каждого следующего импульса (рис. 14.10).

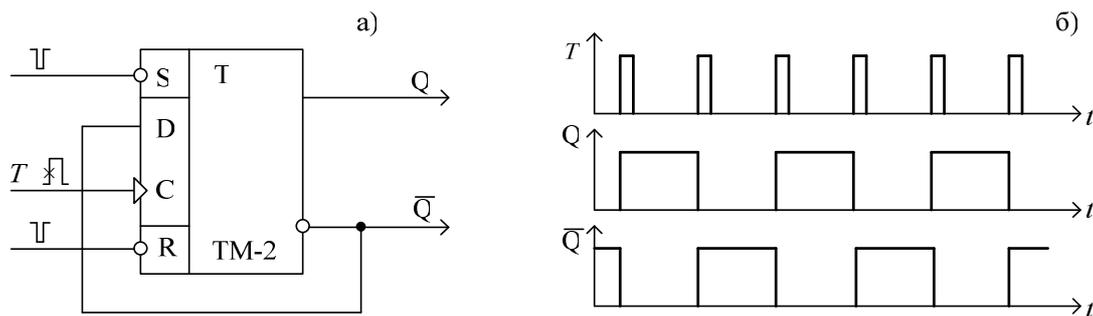


Рис. 14.10. Включение D -триггера в режиме T -триггера

Перевод D -триггера в режим T -триггера обеспечивается соединением D -входа с инверсным выходом триггера \bar{Q} . Так, если D -триггер находится в нулевом состоянии, то на его D -вход действует сигнал $\bar{Q} = 1$, тогда с приходом следующего импульса на T -вход D -триггер переключится в единичное состояние ($Q = 1, \bar{Q} = 0$). Теперь на его D -вход действует сигнал $\bar{Q} = 0$ и с приходом следующего импульса на T -вход D -триггер переключится в нулевое состояние ($Q = 0, \bar{Q} = 1$). На рис 14.10, б приведены временные диаграммы переключения такого T -триггера при действии на T -вход последовательности импульсов.

JK-триггер. JK -триггеры обычно бывают синхронными, т.к. они имеют один синхровход (рис. 14.11). Стандартный JK -триггер кроме инверсных R и S входов имеет информационные входы: J -конъюнкция – на три входа, K -конъюнкция – на три входа и синхровход C .

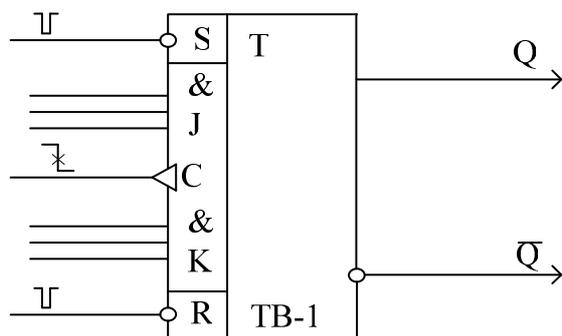


Рис. 14.11. Условное графическое обозначение JK -триггера

По установочным R - и S -входам JK -триггер устанавливается как обычный RS -триггер, при этом R - и S -входы обладают приоритетом перед

JK- и *C*-входами. Это значит, что в моменты времени когда входные сигналы *R* и *S* активны, сигналы на *JK*- и *C*-входах игнорируются.

Переключение *JK*-триггера при действии сигналов на *JK*- и *C*-входы происходит следующим образом.

Если срабатывает конъюнкция *J* (на всех трех входах *J* действует логическая 1) и не срабатывает конъюнкция *K* (хотя бы на одном из трех входов *K* действует логический 0), то с приходом синхроимпульса на *C*-вход *JK*-триггер переключается в единичное состояние ($Q = 1, \bar{Q} = 0$). Причем триггер переключается в момент действия именно обратного (заднего) фронта синхроимпульса.

Если срабатывает конъюнкция *K* (на всех трех входах *K* действует логическая 1) и не срабатывает конъюнкция *J* (хотя бы на одном из трех входов *J* действует логический 0), то с приходом синхроимпульса на *C*-вход *JK*-триггер переключается в нулевое состояние ($Q = 0, \bar{Q} = 1$).

На таких *JK*-триггерах строят регистры и различные управляющие устройства с памятью.

JK-триггер также может работать в режиме счетного триггера (*T*-триггера) и также используется для построения счетчиков импульсов.

Перевод *JK*-триггера в режим *T*-триггера обеспечивается при подаче на все входы сборок *J* и *K* единичных логических сигналов. Тогда с приходом на *C*-вход каждого следующего синхроимпульса *JK*-триггер будет переключаться в противоположное состояние. Временные диаграммы переключения *JK*-триггера в этом режиме совпадают с рис. 14.10, б.

Контрольные вопросы

1. Что такое триггер? Его свойства, виды триггеров.
2. *RS*-триггер на элементах *И-НЕ*, его свойства и режимы работы.
3. *RS*-триггер на элементах *ИЛИ-НЕ*, его свойства и режимы работы.
4. Интегральный *D*-триггер, его свойства и условия переключения.
5. Как включить *D*-триггер в режиме *T*-триггера?
6. Интегральный *JK*-триггер, его свойства и условия переключения.
7. Как включить *JK*-триггер в режиме *T*-триггера?
8. Применение *RS*-, *D*- и *JK*-триггеров?

14.5. Счетчики импульсов и регистры

Счетчики импульсов. Счетчиком импульсов называется цифровое устройство, выполняющее подсчет импульсов, поступивших на его вход.

По виду выполняемой операции счетчики импульсов бывают суммирующие, вычитающие и реверсивные.

По виду получения результата счета счетчики импульсов бывают двоичные и двоично-десятичные.

Для построения счетчиков импульсов используют T -триггеры, которые могут быть реализованы на D - или JK -триггерах.

Схема трехразрядного суммирующего двоичного счетчика импульсов на D -триггерах приведена на рис. 14.12.

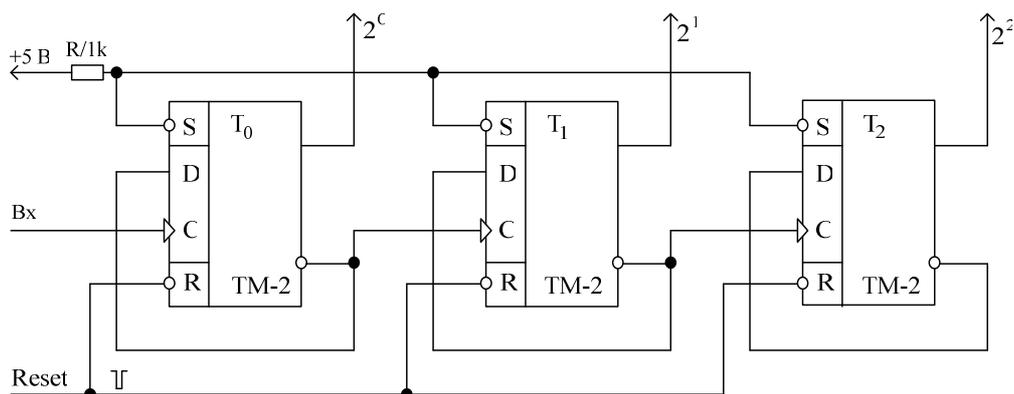


Рис. 14.12. Суммирующий двоичный счетчик импульсов на D -триггерах.

Отличительной чертой суммирующего двоичного счетчика импульсов на D -триггерах является соединение инверсного выхода каждого предыдущего триггера с C -входом следующего триггера.

R -входы триггеров всех разрядов объединены в общую шину сброса (**Reset**). Входом счетчика является C -вход триггера младшего разряда T_0 . S -входы триггеров всех разрядов объединены в общую шину и через резистор $1k$ подключены к источнику напряжения $+5$ В. Этим самым на все S -входы подан сигнал логической 1, и все S -входы заблокированы. Результат счета снимается с прямых выходов D -триггеров параллельным двоичным кодом.

Счетчик импульсов работает следующим образом. Перед началом счета счетчик необходимо сбросить (все триггеры установить в нулевое состояние). Для этого на вход **Reset** следует подать инверсный сигнал (активный уровень 0 вольт). Во время счета на вход **Reset** следует подать логическую 1.

Итак, перед началом счета кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 000$.

С приходом первого импульса младший триггер T_0 перейдет в состояние 1, а на его инверсном выходе сформируется инверсный перепад напряжения (спад напряжения), на который D -триггеры не реагируют. Сле-

довательно, триггер T_1 , а значит, и T_2 своего состояния не изменят. Таким образом, после первого импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 001$.

С приходом второго импульса младший триггер T_0 вернется в состояние 0, а на его инверсном выходе сформируется прямой перепад напряжения (скачок напряжения), по которому триггер T_1 переключится в состояние 1. При этом на инверсном выходе триггера T_1 сформируется инверсный перепад напряжения (спад напряжения), и триггер T_2 своего состояния не изменит. Таким образом, после второго импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 010$.

Третий входной импульс обработает, как первый. Поэтому после третьего входного импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 011$.

Четвертый входной импульс переключит триггер T_0 в состояние 0, прямой перепад напряжения с инверсного выхода T_0 переключит триггер T_1 в состояние 0, и далее прямой перепад напряжения с инверсного выхода T_1 переключит триггер T_2 в состояние 1. Тогда после четвертого входного импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 100$.

В табл. 14.9 приведено соответствие кодового состояния триггеров $T_2T_1T_0$ числу поданных на вход счетчика импульсов.

Таблица 14.9

Число импульсов, поступивших на вход счетчика	Кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0$		
	T_2	T_1	T_0
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0

Из сравнения числа поданных на вход счетчика импульсов и кодовых состояний триггеров $T_2T_1T_0$ (см. табл. 4.9) можно сделать вывод, что состояния триггеров в двоичной системе счисления показывают суммарное число импульсов, поступивших на вход счетчика импульсов.

Схема трехразрядного вычитающего двоичного счетчика импульсов на D -триггерах приведена на рис. 4.13.

Отличительной чертой вычитающего двоичного счетчика импульсов на D -триггерах является соединение прямого выхода каждого предыдущего триггера с C -входом следующего триггера.

Вычитающий счетчик импульсов работает следующим образом. Перед началом счета, как и в предыдущем случае, счетчик необходимо сбросить в нулевое состояние.

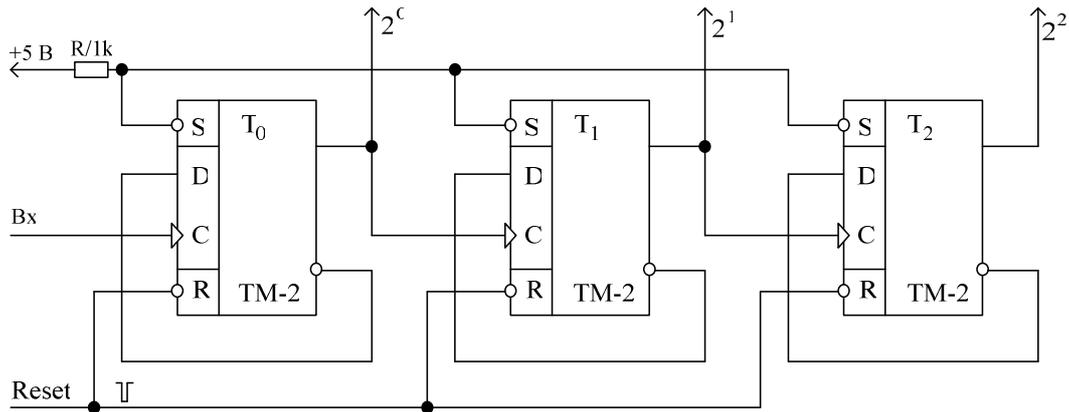


Рис. 14.13. Вычитающий двоичный счетчик импульсов на D -триггерах

Итак, перед началом счета кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 000$.

С приходом первого импульса младший триггер T_0 перейдет в состояние 1, а на его прямом выходе сформируется прямой перепад напряжения (скачок напряжения), по которому следующий триггер T_1 тоже перейдет в состояние 1, в свою очередь на прямом выходе T_1 также сформируется прямой перепад напряжения (скачок напряжения), по которому следующий триггер T_2 тоже перейдет в состояние 1. Таким образом, после первого импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 111$.

С приходом второго импульса младший триггер T_0 переключится в состояние 0, а на его прямом выходе сформируется инверсный перепад напряжения (спад напряжения), на который триггер T_1 не среагирует и останется в состоянии 1. Триггер T_2 своего состояния не изменит, т.к. на его C -входе никаких перепадов напряжения не было. Таким образом, после второго импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 110$, то есть на 1 меньше.

Третий входной импульс переключит триггер T_0 в состояние 1, при этом на его прямом выходе сформируется прямой перепад напряжения по которому триггер T_1 переключится в состояние 0. А триггер T_2 опять своего состояния не изменит, т.к. на его C -вход действует инверсный перепад напряжения с прямого выхода триггера T_1 . Поэтому после третьего входного импульса получим кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0 = 101$, еще на 1 меньше.

В табл. 14.10 приведено соответствие кодового состояния триггеров $T_2T_1T_0$ числу поданных на вход счетчика импульсов.

Из сравнения числа поданных на вход счетчика импульсов и кодовых состояний триггеров $T_2T_1T_0$ (табл. 14.10) можно сделать вывод, что состояния триггеров в двоичной системе счисления с приходом каждого следующего импульса уменьшается на 1. То есть выполняется обратный счет.

Таблица 14.10

Число импульсов, поступивших на вход счетчика	Кодовое состояние триггеров $T_2T_1T_0$		
	T_2	T_1	T_0
0	0	0	0
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	0	1

Регистры. Регистром называется цифровое устройство, предназначенное для запоминания двоичных кодов, а также для преобразования параллельного двоичного кода в последовательный и наоборот.

По виду выполняемой операции регистры бывают параллельные, сдвиговые (последовательные) и кольцевые.

Для построения регистров чаще используют D -триггеры или JK -триггеры.

Схема трехразрядного параллельного регистра на D -триггерах приведена на рис. 14.14, *а*.

Параллельный регистр представляет собой линейку триггеров, R -входы которых соединены между собой и образуют шину сброса **Reset**. S -входы всех триггеров регистра также соединены между собой и образуют шину **Запись**. S -входы триггеров соединены между собой и подключены через R_1 к источнику напряжения +5 В, т.е. к логической 1 (S -входы заблокированы). Предварительно назначают младший и старший разряды регистра (на рис. 14.14, *а* младший разряд вверху, старший – внизу).

Входная информация подается на D -входы всех триггеров параллельно, после чего поступает импульс на вход **Запись**, и триггеры одновременно устанавливаются в состояние, копирующее входную информацию, и запоминают ее. Для смены информации в регистре нужно повторить описанную процедуру. Предварительный сброс не нужен. Шина **Reset** используется для быстрого обнуления регистра.

Записанная в регистр информация считывается с прямых выходов D -триггеров.

На рис. 14.14, *б* показано условное графическое обозначение параллельного регистра (для функциональных схем), также изображаются интегральные микросхемы регистров только с указанием номеров выводов.

Схема трехразрядного сдвигового регистра на D -триггерах приведена на рис. 14.15, *а*.

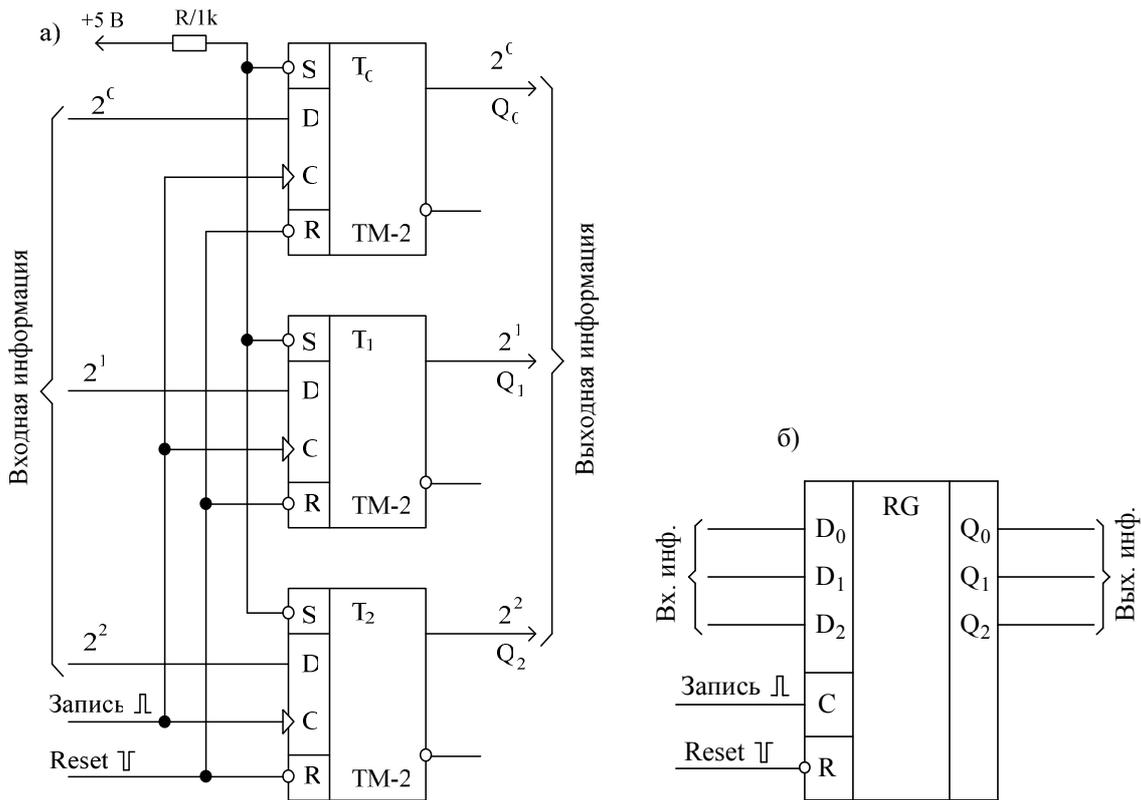


Рис. 14.14. Схема трехразрядного параллельного регистра на D -триггерах

Последовательный регистр представляет собой линейку триггеров R -входы которых соединены между собой и образуют шину сброса **Reset**. C -входы всех триггеров регистра также соединены между собой и образуют шину **Сдвиг**. Прямой выход каждого предыдущего триггера соединен с D -входом каждого следующего триггера. S -входы триггеров соединены между собой и подключены через R_1 к источнику напряжения $+5$ В, т.е. к логической 1 (S -входы заблокированы). Предварительно назначают младший и старший разряды регистра (на рис. 14.15, a младший разряд вверху, старший – внизу). Число, помещаемое в регистр, может быть записано в него либо старшими, либо младшими разрядами вперед (на рис. 14.15, a – старшими разрядами вперед).

Входная информация подается на вход D_R (D -вход младшего триггера) поразрядно и последовательно старшими разрядами вперед. На первом шаге на вход D_R подается старший разряд числа, после чего на вход **Сдвиг** подается синхроимпульс. Старший разряд запишется в младший триггер, а предыдущее состояние триггера T_0 переместится в триггер T_1 , и, соответственно предыдущее состояние T_1 перейдет в T_2 . Для последующих разрядов эта процедура повторяется еще два раза, т.к. рассматриваемый регистр

трехразрядный. Таким образом, для загрузки информации в сдвиговый регистр требуется повторить описанную процедуру столько раз, сколько разрядов имеет число, и, соответственно, регистр. Записанная информация может быть считана параллельным кодом с прямых выходов триггеров. Для считывания информации в последовательном коде, следует подать на вход **Сдвиг** столько синхроимпульсов, сколько разрядов имеет регистр. Информация в последовательном коде старшими разрядами вперед считывается с прямого выхода старшего триггера T_2 .

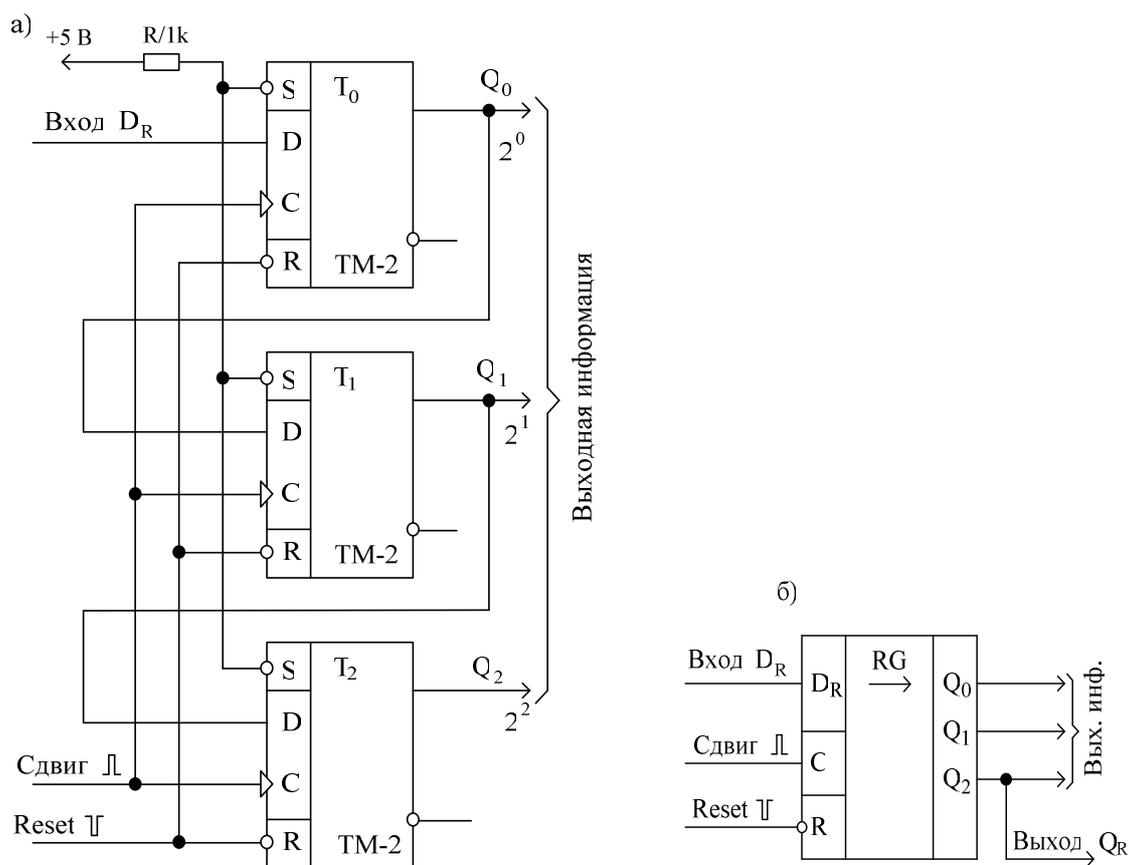


Рис. 14.15. Схема трехразрядного сдвигового регистра на D -триггерах

Для смены информации в регистре нужно повторить описанную процедуру. Предварительный сброс не нужен. Шина **Reset** используется для быстрого обнуления регистра.

На рис. 14.15, б показано условное графическое обозначение сдвигового регистра (для функциональных схем).

Описанный сдвиговый регистр (рис. 14.15, а) используется для преобразования последовательного кода в параллельный. Для обратного преобразования потребуется сдвиговый регистр с параллельной загрузкой и

последовательной выгрузкой. Такие преобразования применяются при обмене информацией между компьютерами по интерфейсу.

Кроме того, сдвиговые регистры применяются при выполнении арифметических операций умножения и деления, т.к. операция умножения двоичных чисел заменяется последовательностью операций сложения и сдвига, а операция деления – последовательностью операций вычитания и сдвига.

Контрольные вопросы

1. Понятие счетчика импульсов, его функции, виды счетчиков, их назначение и применение.
2. Схема и принцип действия суммирующего двоичного счетчика импульсов на *D*-триггерах.
3. Схема и принцип действия вычитающего двоичного счетчика импульсов на *D*-триггерах.
4. Понятие регистра, его функции, виды регистров, их назначение и применение.
5. Схема и принцип действия параллельного регистра на *D*-триггерах.
6. Схема и принцип действия последовательного (сдвигового) регистра на *D*-триггерах.
7. Как с помощью последовательного (сдвигового) регистра преобразовать последовательный код числа в параллельный?
8. Как с помощью последовательного (сдвигового) регистра преобразовать параллельный код числа в последовательный?

14.6. Цифровые устройства комбинационного типа

Дешифратор. Полный двоичный дешифратор, или декодер, – это цифровое устройство, преобразующее *n*-разрядный двоичный позиционный код в сигнал на одном из $m = 2^n$ выходов. Таким образом, полный двоичный дешифратор имеет *n* входов и *m* выходов. Каждому значению входного кода соответствует появление единичного выходного сигнала только на одном из *m* выходов, при нулях на остальных (*m* – 1) выходах (или наоборот, если дешифратор имеет не прямые, а инверсные выходы).

Логика работы полного двухразрядного двоичного дешифратора с прямыми выходами описывается таблицей истинности (табл. 14.11).

Таблица 14.11

X_1	X_0	Y_3	Y_2	Y_1	Y_0
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Такой дешифратор имеет $n = 2$ входа X_1 и X_0 , и $m = 2^2 = 4$ выхода Y_3 , Y_2 , Y_1 и Y_0 . В соответствии с таблицей истинности (см. табл. 14.11) составим систему логических уравнений, описывающих работу этого дешифратора:

$$Y_0 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_0}, \quad Y_1 = \overline{X_1} \cdot X_0, \quad Y_2 = X_1 \cdot \overline{X_0}, \quad Y_3 = X_1 \cdot X_0.$$

Из полученной системы логических уравнений следует, что для построения такого дешифратора потребуются два элемента *НЕ* (инвертора) и четыре двухвходовых элемента *И*. Схема полного двоичного дешифратора на два входа приведена на рис. 14.16, а.

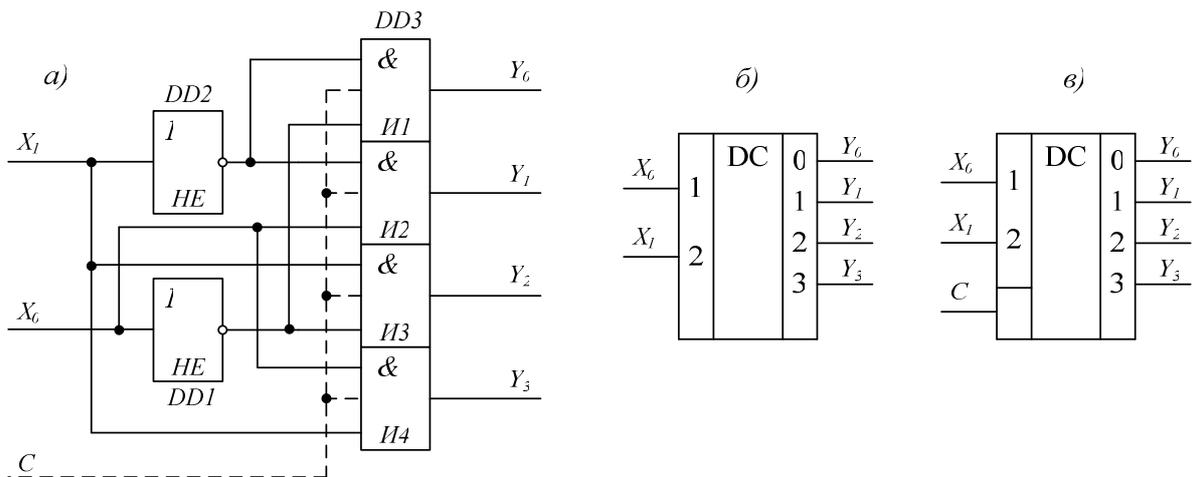


Рис. 14.16. Схема полного двоичного дешифратора на два входа

Задавая различные комбинации логических уровней сигналов на входах X_1 и X_0 в соответствии с таблицей истинности (см. табл. 14.11) и анализируя состояния уровней сигналов на входах выходных элементов *И*, убедитесь, что единичный логический уровень на каждом выходе появляется только при определенной комбинации входных сигналов.

Если в схеме дешифратора на рис. 14.16, а добавить вход синхронизации C (показан пунктиром), то получим синхронизируемый дешифратор. Для этого в данной схеме необходимо использовать элементы *И* с тремя входами, а система логических уравнений примет вид:

$$Y_0 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_0} \cdot C, \quad Y_1 = \overline{X_1} \cdot X_0 \cdot C, \quad Y_2 = X_1 \cdot \overline{X_0} \cdot C, \quad Y_3 = X_1 \cdot X_0 \cdot C.$$

На рис. 14.16, б приведено условное графическое обозначение не-синхронизируемого двоичного дешифратора на два входа, на рис. 14.16, в – обозначение синхронизируемого двоичного дешифратора тоже на два входа.

Аналогично могут быть построены дешифраторы на любое количество разрядов входного кода. Промышленностью выпускаются готовые микросхемы дешифраторов на два, три и четыре разряда входного кода. Для построения многоразрядных дешифраторов применяют каскадное включение микросхем дешифраторов меньшей разрядности.

Дешифраторы применяются в устройствах управления для дешифрации операций или команд с целью формирования управляющих сигналов.

Демультимплексор. Демультимплексор – это цифровое устройство, выполняющее операцию передачи сигнала с одного информационного входа на любой один из нескольких выходов. Таким образом, демультимплексор имеет один информационный вход X , k адресных входов (k -разрядный двоичный код a_{k-1}, \dots, a_0) и $m = 2^k$ выходов.

Система логических уравнений, описывающая работу демультимплексора, имеет вид:

$$Y_0 = \overline{a_1} \cdot \overline{a_0} \cdot X, \quad Y_1 = \overline{a_1} \cdot a_0 \cdot X, \quad Y_2 = a_1 \cdot \overline{a_0} \cdot X, \quad Y_3 = a_1 \cdot a_0 \cdot X.$$

Эта система логических уравнений полностью совпадает с системой логических уравнений синхронизируемого дешифратора. Поэтому такой дешифратор может выполнять функции демультимплексора, если синхровход C использовать как информационный ($C = X$), входы дешифратора X_1 и X_0 – как адресные входы демультимплексора, тогда выходы дешифратора будут выходами демультимплексора.

С помощью демультимплексора возможно распределение информации с одного входа по нескольким различным адресам и преобразование информации из последовательной формы в параллельную.

Шифратор. Шифратор, или кодер, – это цифровое устройство, выполняющее функцию, обратную дешифратору, т.е. преобразует (кодирует) сигнал с одного из входов в двоичный позиционный код. Он имеет $(m - 1)$ входов и n выходов ($m = 2^n$). При подаче сигнала на один из входов (только на один) на выходе появляется двоичный код, соответствующий этому входу.

Логика работы двоичного шифратора с $n = 2$ (двухразрядный выходной код) и прямыми выходами описывается таблицей истинности (табл. 14.12).

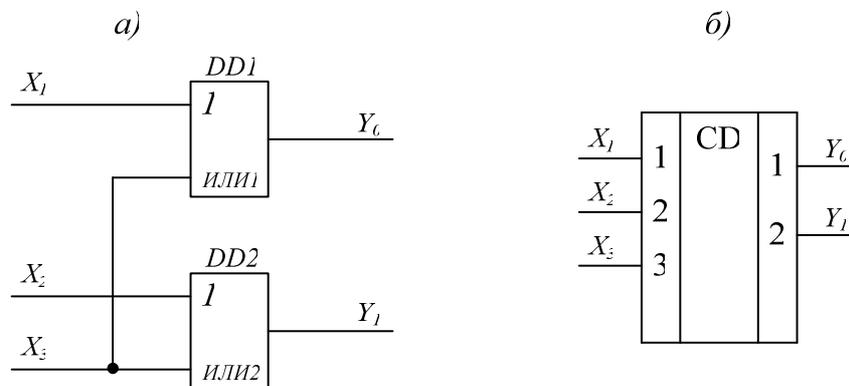
Таблица 14.12

X_3	X_2	X_1	X_0	Y_1	Y_0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	0	1	1

По табл. 14.12 составим систему логических уравнений, описывающих работу двоичного шифратора:

$$Y_0 = X_1 + X_3, \quad Y_1 = X_2 + X_3.$$

Из полученной системы логических уравнений видно, что для построения такого шифратора потребуются только два элемента *ИЛИ* (рис. 14.17, а).

Рис. 14.17. Схема двоичного шифратора с $n = 2$

Задавая различные комбинации логических уровней сигналов на входах X_1 , X_2 и X_3 в соответствии с таблицей истинности (табл. 14.12) и анализируя состояния уровней сигналов на выходах выходных элементов *ИЛИ*, убедитесь, что каждая кодовая комбинация на выходах Y_1 и Y_0 появляется только при поступлении единичного логического сигнала на соответствующий вход X_i . При этом вход X_0 отсутствует, так как комбинация входных сигналов $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ эквивалентна $X_0 = 1$. Поэтому число входов шифратора на один меньше, чем число наборов выходного кода.

На рис. 14.17, б приведено условное графическое обозначение (для функциональных схем) полного двоичного шифратора для $n = 2$.

Аналогично могут быть построены двоичные шифраторы для любой разрядности выходного кода.

Мультиплексор. Мультиплексор – это цифровое устройство, выполняющее операцию передачи сигнала с любого информационного входа на

один выход. Мультиплексор выполняет функцию, обратную функции де-мультиплексора.

Мультиплексор имеет k адресных входов (a_{k-1}, \dots, a_0), имеет $n = 2^k$ информационных входов (X_{n-1}, \dots, X_0) и один выход Y . С выходом Y соединяется тот вход X_i , адрес которого определяется кодом адресных входов (a_{k-1}, \dots, a_0).

Логика работы мультиплексора на четыре информационных входа ($n = 4$) с двумя адресными входами ($k = 2$, т.к. $n = 2^k = 4$) описывается таблицей истинности (табл. 14.13).

Таблица 14.13

a_1	a_0	Y
0	0	X_0
0	1	X_1
1	0	X_2
1	1	X_3

По табл. 14.13 составим алгебрологическое уравнение, описывающее работу такого мультиплексора:

$$Y = \overline{a_1} \cdot \overline{a_0} \cdot X_0 + \overline{a_1} \cdot a_0 \cdot X_1 + a_1 \cdot \overline{a_0} \cdot X_2 + a_1 \cdot a_0 \cdot X_3.$$

Из полученного логического уравнения видно, что для построения такого мультиплексора потребуются два элемента *НЕ*, четыре трехвходовых элемента *И* и один элемент *ИЛИ* на четыре входа (рис. 14.18, *a*).

При анализе работы схемы, задавая различные кодовые комбинации на адресные входы, убедитесь в справедливости табл. 14.13. Аналогично могут быть построены мультиплексоры на большее количество информационных входов.

На рис. 14.18, *б* приведено условное графическое обозначение (для функциональных схем) мультиплексора с $n = 4$ и $k = 2$.

Мультиплексоры бывают синхронизируемые и несинхронизируемые. В синхронизируемых мультиплексорах добавляется вход синхронизации S (показан пунктиром на рис. 14.18, *a*).

Мультиплексоры применяются для переключения магистралей (шин) передачи цифровой информации. Готовые мультиплексоры выпускаются в виде интегральных микросхем до $n = 8$.

Схема сравнения. Схема сравнения (компаратор) – это цифровое устройство, выполняющее операцию сравнения двух чисел A и B . Результатом сравнения является обнаружение состояний $A = B$, $A > B$ или $A < B$.

Схемы сравнения бывают одноразрядные и многоразрядные. Одноразрядная схема сравнения имеет два входа, соответственно вход числа A

(один бит) и вход числа В (один бит), и три выхода, соответственно $Y_{A=B}$, $Y_{A>B}$ и $Y_{A<B}$. Логика работы одноразрядной схемы сравнения описывается таблицей истинности (табл. 14.14).

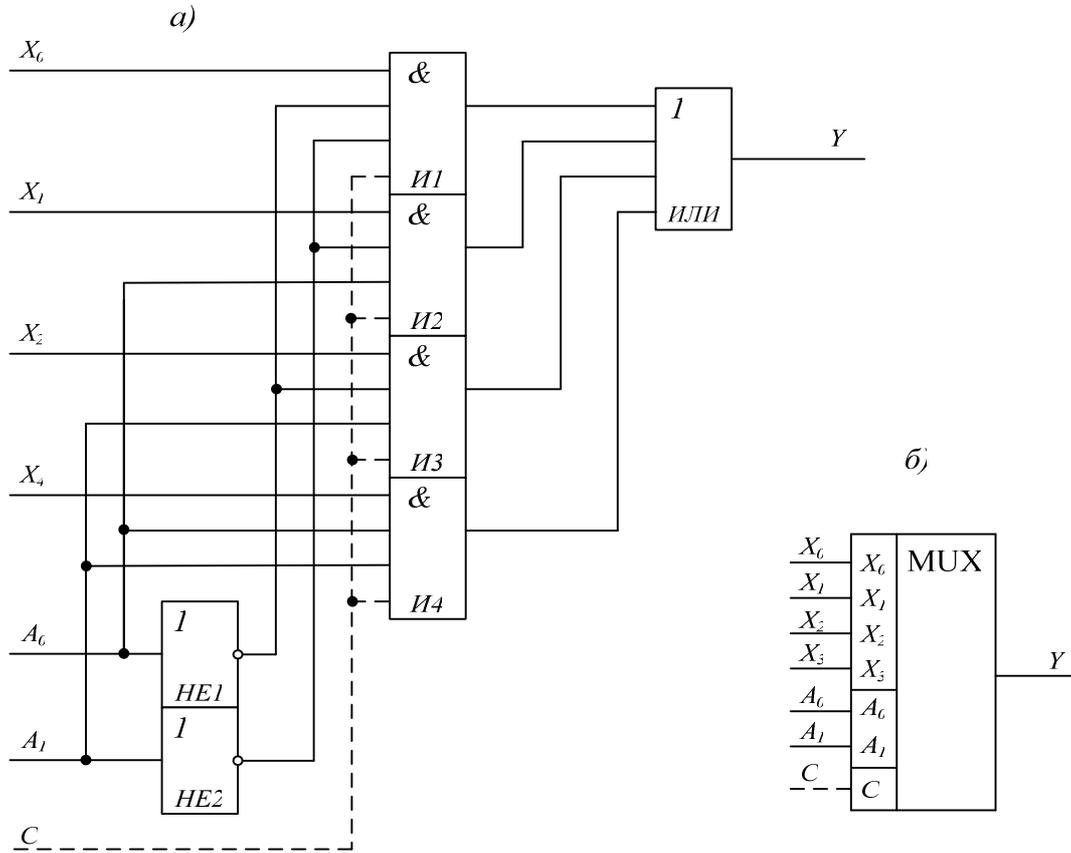


Рис. 14.18. Схема мультиплексора на четыре информационных входа

Таблица 14.14

A	B	$Y_{A>B}$	$Y_{A=B}$	$Y_{A<B}$
0	0	0	1	0
0	1	0	0	1
1	0	1	0	0
1	1	0	1	0

По табл. 14.14 составим систему логических уравнений, описывающих работу одноразрядной схемы сравнения:

$$Y_{A>B} = A \cdot \overline{B}, \quad Y_{A=B} = \overline{A \cdot B} + A \cdot B = \overline{A \oplus B}, \quad Y_{A<B} = \overline{A} \cdot B.$$

Из полученной системы логических уравнений видно, что для построения такой схемы сравнения потребуются три элемента *НЕ*, два элемента *И* и один элемент *ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ* (рис. 14.19).

При анализе работы схемы 14.19, задавая различные кодовые комбинации на входы A и B , убедитесь в справедливости табл. 14.14.

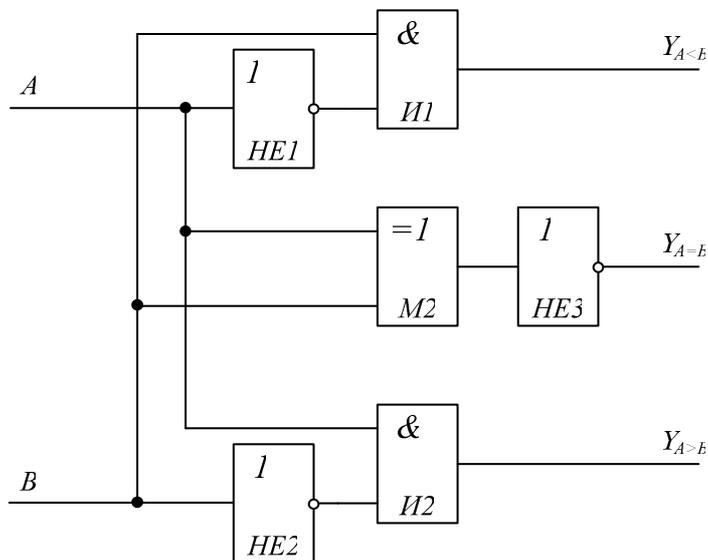


Рис. 14.19. Реализация схемы сравнения (компаратора)

Многоразрядные схемы сравнения сравнивают числа, начиная со старших разрядов. На выход такой схемы сравнения передается результат сравнения самых старших из несовпадающих разрядов. Естественно, многоразрядные схемы сравнения гораздо сложнее.

Двоичный сумматор. Сумматор – это цифровое устройство, выполняющее операцию сложения двоичных чисел. При сложении двух одноразрядных чисел A и B возможны следующие комбинации:

$$0+0=0, \quad 1+0=1, \quad 0+1=1, \quad 1+1=10,$$

где «+» – арифметическое сложение.

При $A = B = 1$ происходит перенос в старший разряд. Поэтому одноразрядный двоичный сумматор имеет два входа – A_0 и B_0 , и два выхода – выход суммы S_0 и выход переноса в старший разряд C_1 . Логика работы одноразрядного двоичного сумматора описывается таблицей истинности (табл. 14.15).

Таблица 14.15

A_0	B_0	$S_{0>B}$	C_1
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

По табл. 14.15 составим систему логических уравнений, описывающих работу одноразрядного двоичного сумматора:

$$S_0 = \bar{A} \cdot B + A \cdot \bar{B} = A \oplus B, \quad C_1 = A \cdot B.$$

Из полученной системы логических уравнений видно, что для построения одноразрядного двоичного сумматора потребуются один элемент **ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ** и один элемент **И** (рис. 14.20, а).

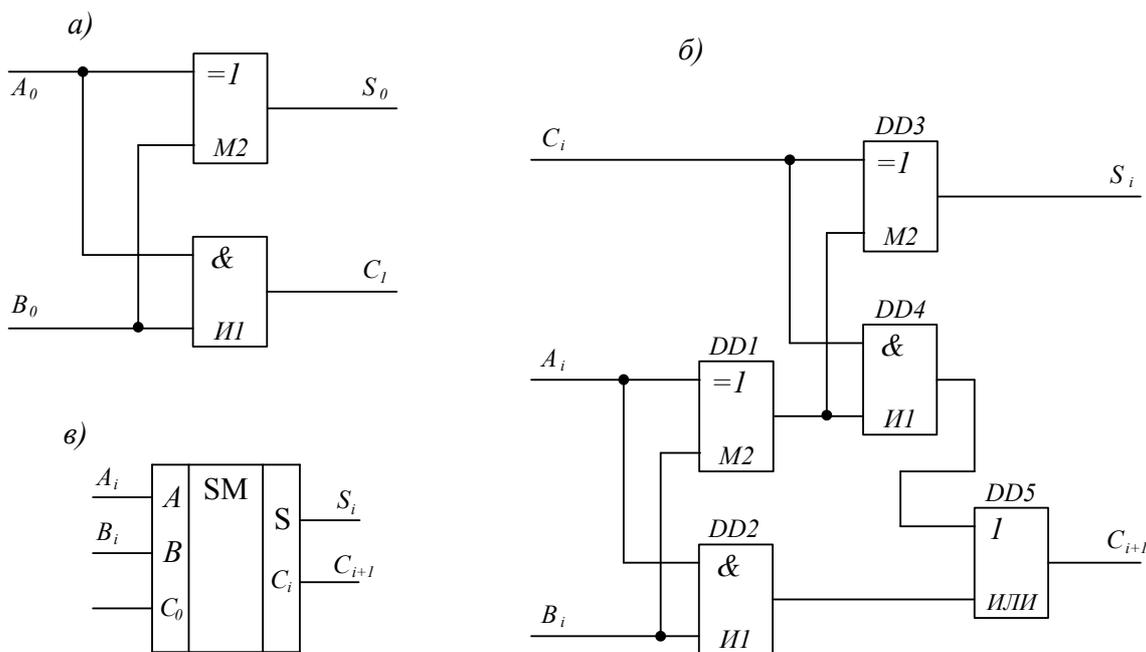


Рис. 14.20. Схемы одноразрядных сумматоров

При анализе работы схемы 14.20, а, задавая различные кодовые комбинации на входы A_0 и B_0 , убедитесь в справедливости табл. 14.15. Такой одноразрядный двоичный сумматор с двумя входами называется полусумматором (ПСМ).

При сложении двух многоразрядных двоичных чисел полусумматор можно использовать только для младшего разряда. Это связано с тем, что в более старших разрядах складываются не два, а три бита, с учетом переноса из младшего разряда. Такой одноразрядный двоичный сумматор с тремя входами называется полный одноразрядный сумматор (ПОС). Его строят с использованием двух полусумматоров (рис. 14.20, б).

Один полусумматор на элементах $D1$ и $D2$ суммирует два бита A_i и B_i , второй полусумматор на элементах $D3$ и $D4$ суммирует выход суммы первого полусумматора с битом переноса из младшего разряда C_i и выдает результат суммы S_i , а элемент $D5$ (элемент **ИЛИ**) формирует перенос в старший разряд C_{i+1} .

Работа полного одноразрядного двоичного сумматора описывается таблицей истинности (табл. 14.16).

Таблица 14.16

A_i	B_i	C_i	S_i	C_{i+1}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

При анализе работы схемы 14.20, б, задавая различные кодовые комбинации на входы A_i , B_i и C_i , убедитесь в справедливости табл. 14.16.

Многоразрядный двоичный сумматор представляет собой линейку полных одноразрядных сумматоров, а в младшем разряде стоит полусумматор.

Условное графическое обозначение полного одноразрядного сумматора приведено на рис. 14.20, в.

Контрольные вопросы

1. Понятие дешифратора, его функции и применение.
2. Алгебрологическое описание функций двоичного дешифратора.
3. Схема и принцип действия двоичного дешифратора.
4. Понятие шифратора, его функции и применение.
5. Алгебрологическое описание функций двоичного шифратора.
6. Схема и принцип действия двоичного шифратора.
7. Понятие демультиплексора, его функции и применение.
8. Работа дешифратора в режиме демультиплексора.
9. Понятие мультиплексора, его функции и применение.
10. Алгебрологическое описание функции мультиплексора.
11. Схема и принцип действия мультиплексора.
12. Понятие двоичного полусумматора, его функции и применение.
13. Алгебрологическое описание функций полусумматора.
14. Схема и принцип действия двоичного полусумматора.
15. Понятие полного одноразрядного двоичного сумматора, его функции и применение.
16. Алгебрологическое описание функций полного одноразрядного двоичного сумматора.

17. Схема и принцип действия полного одноразрядного двоичного сумматора.
18. Как построить полный одноразрядный двоичный сумматор?
19. Понятие цифровой схемы сравнения, ее функции и применение.
20. Схема и принцип действия одноразрядной двоичной схемы сравнения.

14.7. Цифроаналоговые преобразователи

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования цифровых кодов в аналоговые величины, например, напряжение, ток, сопротивление и т.п. Принцип преобразования заключается в суммировании всех разрядных токов (или напряжений), взвешенных по двоичному закону и пропорциональных значению опорного напряжения. Другими словами, преобразование заключается в суммировании токов или напряжений, пропорциональных весам двоичных разрядов, причем суммируются только токи тех разрядов, значения которых равны логической 1. В двоичном коде вес от разряда к разряду изменяется вдвое. При построении ЦАП с выходом по напряжению наиболее распространены две схемы суммирования токов – параллельная и последовательная. На рисунке 14.21 приведена схема ЦАП с параллельным суммированием токов.

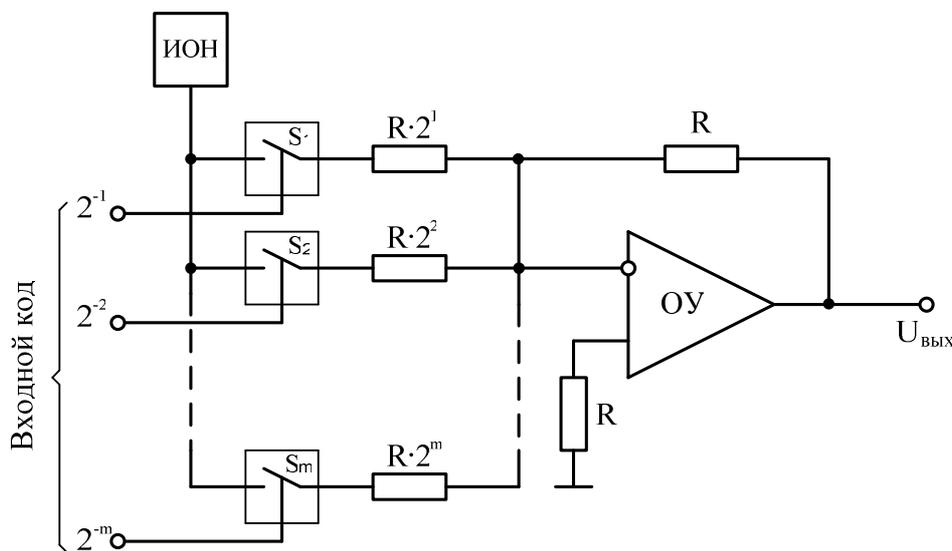


Рис. 14.21. Схема ЦАП с параллельным суммированием токов

ЦАП включает в свой состав источник опорного напряжения (ИОН), линейку ключей ($S_1 - S_m$), где m – количество разрядов входного кода и

суммирующий операционный усилитель, номиналы входных резисторов которого распределены по двоичному закону (см. рис. 14.21).

Ключи S_i замыкаются при поступлении на вход ключа напряжения, соответствующего уровню логической 1, тем самым подключая соответствующие резисторы к источнику опорного напряжения. Через резисторы протекает соответствующий весу разряда ток. Сопротивление резисторов прогрессивно изменяется в два раза от разряда к разряду. В результате на выходе операционного усилителя формируется напряжение в виде (см. раздел 13.3, рис. 13.21):

$$U_{вых} = -U_0 \left[a_{-1} \cdot 2^{-1} + a_{-2} \cdot 2^{-2} + \dots + a_{-m} \cdot 2^{-m} \right].$$

Входной двоичный код рассматривается как дробное двоичное число в виде: $A = 0, a_{-1}a_{-2}\dots a_{-m}$. Таким образом, значение числа в квадратных скобках не может превысить значения единицы, а при максимальном входном коде (все $a_i = 1$) выходное напряжение ЦАП стремится к U_0 .

При высокой разрядности сопротивления резисторов должны быть согласованы с высокой точностью. Особо жесткие требования предъявляются к резисторам старших разрядов, т.к. разброс тока в них не должен превышать тока младшего разряда. Это позволит получить ЦАП с приемлемой точностью преобразования входного двоичного кода в напряжение.

Единственным достоинством такого ЦАП является его простота.

К недостаткам рассмотренной схемы ЦАП относятся:

- трудность подгонки резисторов в каждом разряде для получения необходимой точности преобразования;
- ток, потребляемый от ИОН, при изменении входного двоичного кода изменяется, что вызывает небольшие изменения опорного напряжения U_0 , а это приводит к дополнительным погрешностям.

Более широкое применение получил ЦАП с последовательной схемой суммирования токов. На рис. 14.22 приведена схема 4-разрядного ЦАП со схемой последовательного суммирования токов.

В такой схеме задание весовых коэффициентов осуществляется с помощью резистивной матрицы R - $2R$ постоянного сопротивления. ЦАП включает в свой состав ИОН, линейку перекидных ключей ($S_1 - S_4$), резисторную матрицу R - $2R$ на 4 входа и операционный усилитель с резистором в цепи обратной связи.

Правому положению ключа соответствует единица в данном разряде входного кода N (разряды $D1 \dots D4$). Первым (левым по рисунку) ключом коммутируется ток величиной $U_0/2R$, вторым ключом – ток $U_0/4R$, третьим – ток $U_0/8R$, четвертым – ток $U_0/16R$. Т.е. токи, коммутируемые соседними

ключами, различаются вдвое, как и веса разрядов двоичного кода. Токи, коммутируемые всеми ключами, суммируются и преобразуются в выходное напряжение с помощью операционного усилителя с сопротивлением $R_{OC} = R$ в цепи отрицательной обратной связи.

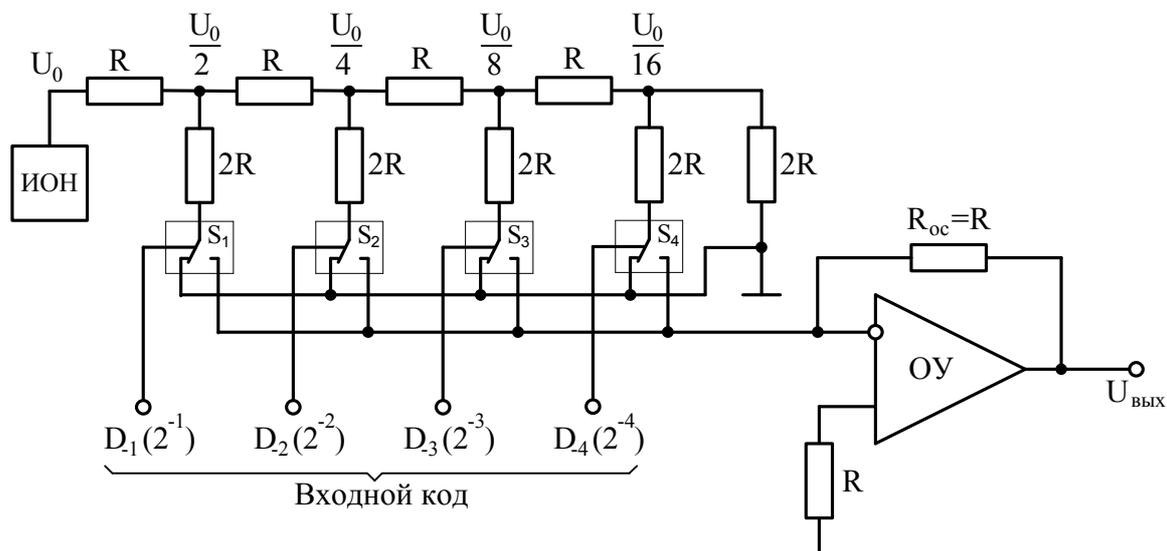


Рис. 14.22. Схема 4-разрядного ЦАП с последовательным суммированием токов

При правом положении каждого ключа (единица в соответствующем разряде входного кода ЦАП) ток, коммутируемый этим ключом, поступает на суммирование. При левом положении (ноль в соответствующем разряде входного кода ЦАП) ток, коммутируемый этим ключом, на суммирование не поступает.

Суммарный ток I_0 от всех ключей создает на выходе операционного усилителя напряжение $U_{вых} = I_0 R_{OC} = I_0 \cdot R$. Т.е. вклад первого ключа (старшего разряда кода) в выходное напряжение составляет $U_0/2$, второго – $U_0/4$, третьего – $U_0/8$, четвертого – $U_0/16$. Таким образом, при входном коде $N = 0000$ выходное напряжение схемы будет нулевым, а при входном коде $N = 1111$ $U_{вых} = 15U_0/16$.

В общем случае выходное напряжение ЦАП при $R_{OC} = R$ будет связано со входным кодом N и опорным напряжением U_0 простой формулой

$$U_{вых} = -N \cdot U_0 \cdot 2^{-n},$$

или для этой схемы

$$U_{вых} = -U_0 \left[D_{-1} \cdot 2^{-1} + D_{-2} \cdot 2^{-2} + D_{-3} \cdot 2^{-3} + D_{-4} \cdot 2^{-4} \right],$$

где n – количество разрядов входного кода. Знак «минус» получается из-за инверсии сигнала операционным усилителем.

Достоинства ЦАП на основе матрицы $R-2R$:

– используются резисторы только двух номиналов, что облегчает задачу точной подгонки их значений и позволяет выпускать резисторные матрицы $R-2R$ в интегральном исполнении;

– ток, потребляемый от ИОН, не изменяется при изменении входного кода, т.к. перекидными ключами S_i он переключается либо в точку суммирования, либо на общую шину, а значит U_0 остается постоянным и дополнительные погрешности не возникают.

Недостатком ЦАП на основе матрицы $R-2R$ является необходимость использования перекидных ключей S_i , которые, как правило, представляют собой структуры на полевых транзисторах со схемами управления в интегральном исполнении.

Погрешность ЦАП составляет не меньше величины, соответствующей единице младшего разряда преобразователя. Кроме того, на погрешность ЦАП влияют нестабильность выходного напряжения ИОН, точность подгонки резисторов, разброс сопротивлений ключей и точность работы ОУ.

Промышленностью выпускаются ЦАП в виде интегральных микросхем. Из отечественных типов ЦАП это микросхемы КР572ПА1 и КР572ПА2. Это 12-разрядные ЦАП с резисторной матрицей $R-2R$ и внешним ОУ.

ЦАП находят широкое применение в системах управления и автоматике в различных отраслях промышленности, т.к. все шире для целей управления применяется вычислительная техника, и для формирования управляющих сигналов требуется применение ЦАП.

Контрольные вопросы

1. Понятие цифроаналогового преобразователя (ЦАП), его функции и применение.
2. Способы выполнения цифроаналогового преобразования.
3. Схема и принцип действия ЦАП на основе суммирующего операционного усилителя (ОУ).
4. Назначение источника опорного напряжения (ИОН) в структурах ЦАП.
5. Схема и принцип действия ЦАП на основе прецизионной резисторной матрицы $R-2R$.
6. Сравнительная оценка ЦАП, построенных на основе ОУ и на основе резисторной матрицы $R-2R$.
7. Из каких составляющих складывается общая погрешность ЦАП?

14.8. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования различных непрерывных физических параметров (аналоговых величин) в цифровую форму с целью дальнейшего использования в цифровых системах управления на основе микропроцессоров, микроконтроллеров или компьютеров.

В большинстве случаев выполняется аналого-цифровое преобразование напряжения, тока или интервала времени в цифровой код. Все остальные физические параметры чаще всего предварительно преобразуются в напряжение, ток или временной интервал и только потом в цифровой код.

Наиболее широкое распространение получили АЦП напряжения в цифровой код.

В настоящее время известно достаточно много способов выполнения аналого-цифрового преобразования напряжения:

- АЦП с промежуточным преобразованием во временной интервал;
- разворачивающий АЦП с использованием ЦАП в цепи обратной связи;
- АЦП поразрядного уравнивания;
- АЦП с двойным интегрированием;
- параллельные АЦП и др.

Наиболее простым и наглядным преобразователем является АЦП напряжения с промежуточным преобразованием во временной интервал.

Способ преобразования основан на том, что входное напряжение АЦП предварительно преобразуется во временной интервал за счет использования генератора линейно растущего напряжения (напряжения развертки), а затем полученный временной интервал преобразуется в цифровой код (рис. 14.23).

В момент начала преобразования запускается генератор развертки и одновременно устанавливается триггер формирования временного интервала. Выходное напряжение генератора развертки линейно растет, и в момент равенства напряжений $U_p = U_x$ выполняется сброс триггера. Таким образом, триггер сформировал временной интервал длительностью $\tau = t_1$. При этом длительность полученного временного интервала τ пропорциональна величине U_x , т.к.

$$\tau = \frac{U_x}{\text{tg}\varphi},$$

где $\text{tg}\varphi = Q$ – скорость нарастания напряжения развертки.

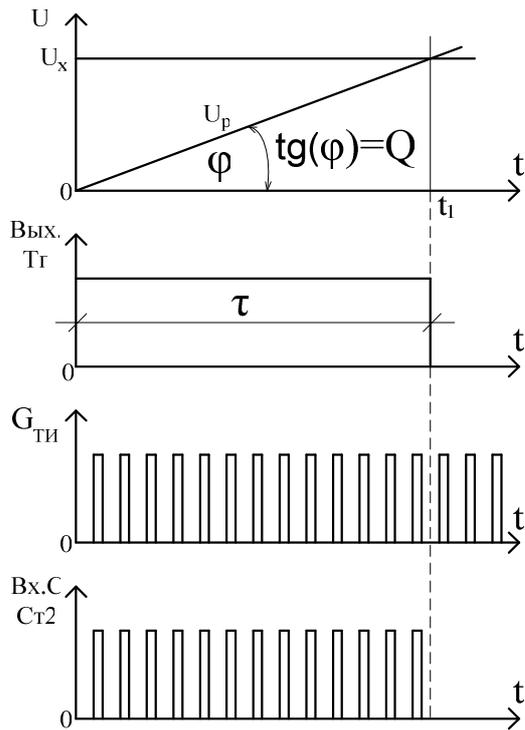


Рис. 14.23. Способ построения АЦП с промежуточным преобразованием напряжения во временной интервал:

U_x – входное напряжение АЦП, которое подвергается преобразованию; U_p – линейно растущее напряжение развертки; Вых. Тг – состояние триггера, формирующего временной интервал; $G_{ти}$ – выход генератора тактовых импульсов стабильной частоты; Вх.С Ст2 – вход двоичного счетчика импульсов, формирующего результат преобразования

Полученный временной интервал элементарно преобразуется в цифровой код путем его заполнения импульсами стабильной частоты. На рис. 14.23 показаны импульсы на выходе генератора тактовых импульсов $G_{ти}$ и ниже то количество импульсов, которое успеет пройти на вход C счетчика импульсов $Ст2$ за время τ .

Пусть $f_{ми}$ – стабильная частота тактовых импульсов, $f_{ми} = \text{const}$. Тогда период следования тактовых импульсов $1/f_{ми}$. Следовательно, счетчик импульсов $Ст2$ подсчитает $N = \tau/(1/f_{ми}) = \tau \cdot f_{ми}$ импульсов.

Так как $\tau = U_x/Q$, то $N = U_x \cdot f_{ми} / Q$. Отсюда видно, что выходной код преобразования пропорционален входному напряжению U_x .

Структурная схема такого АЦП приведена на рис. 14.24.

В исходном положении триггер T_2 находится в нулевом состоянии и своим сигналом нулевого уровня с прямого выхода удерживает выходное напряжение генератора развертки $U_p = 0$, и одновременно блокирует прохождение тактовых импульсов от генератора $G_{ми}$ через элемент $И$ на C -вход счетчика импульсов $Ст2$. В счетчике импульсов $Ст2$ сохраняется результат предыдущего преобразования.

При нажатии кнопки «Пуск» формирователь короткого импульса F формирует короткий импульс, который устанавливает триггер T_2 в единичное состояние и одновременно выполняет сброс счетчика импульсов $Ст2$. Единичный логический уровень с прямого выхода триггера T_2 запускает генератор развертки и разрешает прохождение тактовых импульсов от

генератора $G_{ми}$ через элемент I на C -вход счетчика импульсов $Cm2$. Генератор развертки формирует линейно растущее напряжение во времени. Такое состояние схемы сохраняется до момента срабатывания компаратора K при условии $U_p = U_x$. В этот момент времени ($t = t_1$) выходным сигналом компаратора триггер T_2 сбрасывается в нулевое состояние и блокирует прохождение тактовых импульсов от генератора $G_{ми}$ через элемент I на C -вход счетчика импульсов $Cm2$, одновременно обнуляется выходное напряжение генератора развертки ($U_p = 0$). Кодовое состояние счетчика импульсов $Cm2$ соответствует результату преобразования.

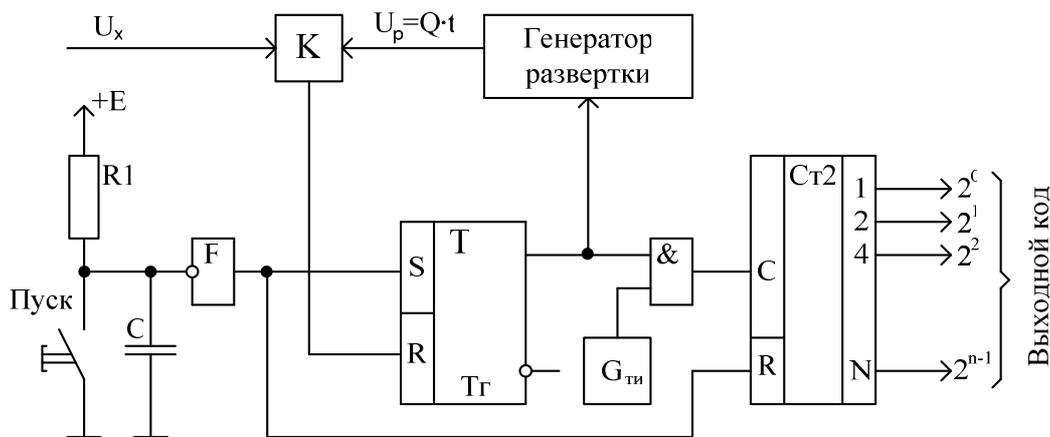


Рис. 14.24. Структура АЦП с промежуточным преобразованием напряжения во временной интервал

Достоинством такого АЦП является его простота.

К недостаткам следует отнести низкое быстродействие и невысокую точность. Погрешность такого АЦП определяется чувствительностью компаратора K , линейностью напряжения развертки U_p и стабильностью частоты генератора тактовых импульсов $G_{ми}$.

Несколько лучшими свойствами обладает АЦП разворачивающего типа с использованием ЦАП в цепи обратной связи (рис. 14.25). ЦАП формирует линейно растущее напряжение развертки $U_p = f(N)$ при линейно растущем кодовом состоянии счетчика импульсов (N) в режиме непрерывного счета импульсов.

Такой АЦП отличается от предыдущего способом формирования линейно растущего напряжения развертки U_p .

В момент пуска совершенно аналогично триггер T_2 устанавливается в единичное состояние, также выполняется сброс счетчика импульсов $Cm2$ и тактовые импульсы от $G_{ми}$ проходят через элемент I на C -вход $Cm2$. Счетчик импульсов $Cm2$ работает в режиме непрерывного счета и его ко-

довое состояние практически линейно растет от нулевого значения. Соответственно также линейно растет выходное напряжение ЦАП. В момент времени, когда $U_p = U_x$ срабатывает компаратор и сбрасывает триггер T_2 в нулевое состояние. Счет импульсов в $См2$ останавливается и с выходов $См2$ снимается результат преобразования.

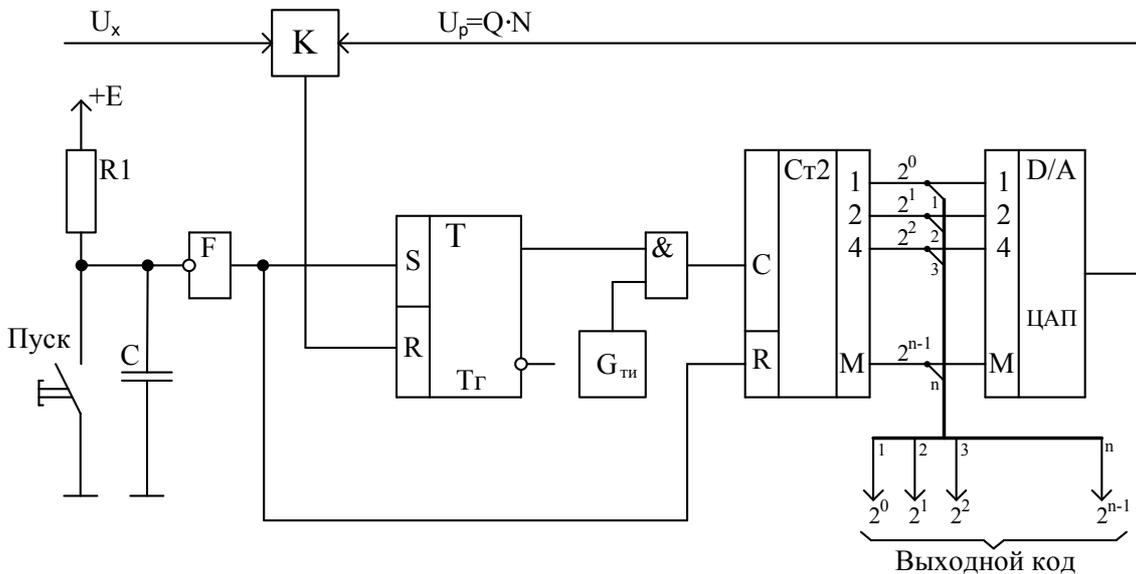


Рис. 14.25. Структура разворачивающего АЦП с использованием ЦАП в цепи обратной связи

Достоинством такого АЦП является то, что линейность напряжения развертки жестко определяется характеристикой ЦАП, т.к. U_p и входной код N связаны однозначной зависимостью $U_p = QN$. По этой же причине отпадает требование стабильности к частоте тактовых импульсов.

В числе недостатков такого АЦП следует отметить его усложнение и, по-прежнему, низкое быстродействие. Кроме того, оба типа рассмотренных АЦП имеют слабую помехоустойчивость.

В плане повышения помехоустойчивости выгодно отличается от рассмотренных АЦП напряжения с двойным интегрированием.

Суть аналого-цифрового преобразования методом двойного интегрирования заключается в том, что преобразуемое напряжение U_x с помощью интегратора интегрируется в течении фиксированного интервала времени $T_1 = \text{const}$, затем вход интегратора переключается на источник опорного напряжения противоположной полярности U_0 , и выполняется обратный ход интегрирования до равенства нулю выходного напряжения интегратора (рис. 14.26). Измеряется длительность интервала времени обратного хода интегрирования T_2 , формируемого с помощью триггера T_2

(рис. 14.26). Величина T_2 пропорциональна преобразуемому напряжению U_x . Далее полученный интервал времени T_2 преобразуется в цифровой код так же, как было описано ранее.

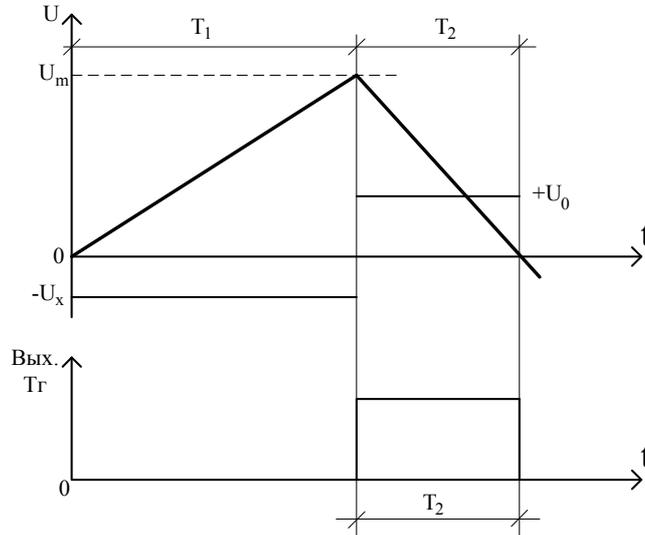


Рис. 14.26. Способ аналого-цифрового преобразования методом двойного интегрирования

На первом этапе интегрирования выходное напряжение интегратора при нулевых начальных условиях увеличится до значения

$$U_m = -A \int_0^{T_1} -U_x dt = A \cdot U_x \cdot t / 0^{T_1} = A \cdot U_x \cdot T_1.$$

На втором этапе интегрирования аналогично и противоположно:

$$U_m = A \cdot U_0 \cdot T_2.$$

Тогда

$$A \cdot U_x \cdot T_1 = A \cdot U_0 \cdot T_2.$$

Отсюда

$$T_2 = \frac{T_1}{U_0} \cdot U_x.$$

В результате преобразования временного интервала T_2 в цифровой код получим:

$$N_{вых} = T_2 \cdot f_{ми} = \frac{T_1}{U_0} \cdot U_x \cdot f_{ми}.$$

Структура АЦП напряжения с двойным интегрированием приведена на рис. 14.27.

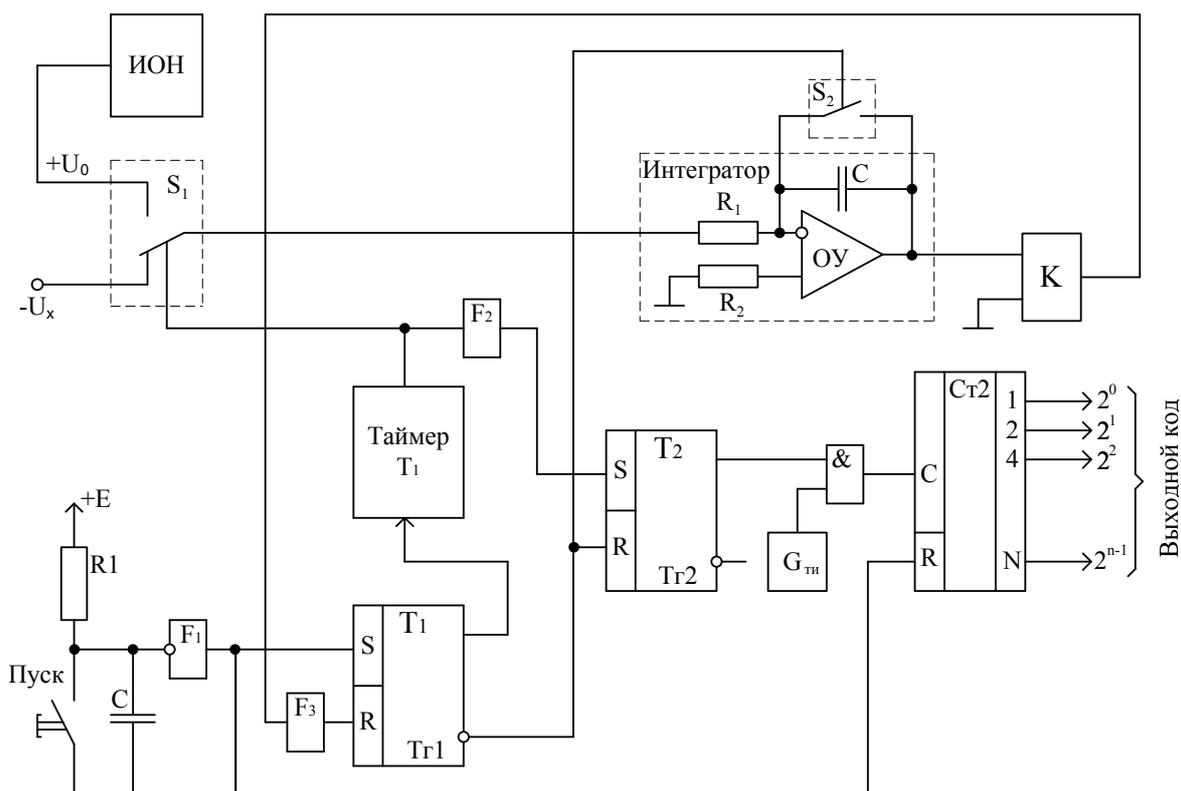


Рис. 14.27. Структура АЦП напряжения с двойным интегрированием

Перед началом преобразования АЦП находится в следующем состоянии. Оба триггера T_{21} и T_{22} находятся в нулевом состоянии, ключ S_1 подключает преобразуемое напряжение $-U_x$ на вход интегратора, построенного на основе операционного усилителя (ОУ), ключ S_2 удерживается в замкнутом состоянии единичным логическим уровнем с инверсного выхода триггера T_{21} , в результате выходное напряжение интегратора равно нулю. Триггер T_{22} блокирует прохождение тактовых импульсов от генератора $G_{ти}$ через элемент И на вход счетчика импульсов $Cm2$. В счетчике $Cm2$ сохраняется результат предыдущего преобразования, если оно выполнялось.

При нажатии кнопки «Пуск» запускается формирователь короткого импульса F_1 , который своим выходным сигналом устанавливает триггер T_{21} в единичное состояние. Сигналом с прямого выхода T_{21} запускается таймер T_1 , а нулевым сигналом с инверсного выхода T_{21} ключ S_2 размыкается, и начинается процесс интегрирования входного напряжения в течение интервала времени T_1 .

В таком состоянии находится преобразователь весь интервал времени T_1 . В момент окончания этого интервала времени (от момента запуска) таймер T_1 выдает на свой выход единичный логический уровень, который перекидывает ключ S_1 для подключения на вход интегратора опорного на-

пряжения $+U_0$, и одновременно через формирователь короткого импульса F_2 устанавливает триггер T_{22} в единичное состояние. С этого момента начинается второй этап интегрирования. Единичным сигналом с прямого выхода T_{22} разрешает прохождение тактовых импульсов через элемент I на C -вход счетчика импульсов $Sm2$, и в счетчике идет подсчет импульсов.

В момент времени, когда выходное напряжение интегратора станет равным нулю срабатывает компаратор K (формирует скачок напряжения), и через формирователь короткого импульса F_3 сбрасывает триггер T_{21} в нулевое состояние, который в свою очередь единичным сигналом с инверсного выхода сбрасывает триггер T_{22} тоже в нулевое состояние. Триггер T_{22} блокирует прохождение тактовых импульсов через элемент I на C -вход счетчика $Sm2$, в котором сформирован результат преобразования. Таким образом, АЦП снова находится в исходном состоянии.

Основным достоинством такого АЦП является его высокая помехоустойчивость, и поэтому такой АЦП находит широкое применение.

Свойство помехоустойчивости достигается тем, что длительность первого этапа интегрирования T_1 выбрана равной периоду самой мощной электромагнитной помехи – это наводка от силовой промышленной электрической сети 380/220 В, 50 Гц. Т.е. длительность $T_1 = 0,02$ с (20мс). Тогда в результате интегрирования преобразуемого напряжения $-U_x$ вместе с наведенной помехой влияние помехи практически исключается (рис. 14.28).

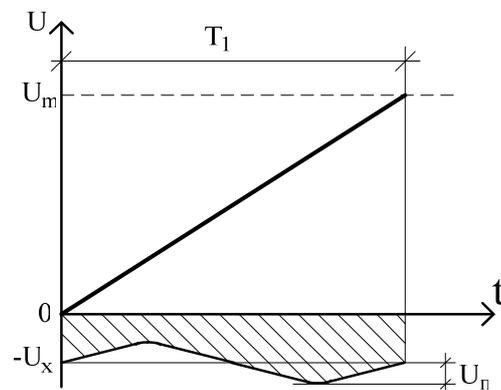


Рис. 14.28. Первый этап интегрирования преобразуемого напряжения $-U_x$ вместе с наведенной помехой с амплитудой U_n

Т.к. длительность первого этапа интегрирования T_1 равна периоду колебания помехи, т.е. $\omega T_1 = 2\pi$, то интеграл от синусоидальной помехи за период равен нулю. Таким образом, в результате интегрирования помеха с частотой 50 Гц исключается. Но в результате того, что реальная частота силовой сети всегда меньше, обычно около 49,5 Гц, то силовая помеха исключается не полностью. Для полного исключения влияния сетевой помехи необходимо формировать длительность первого этапа интегрирования

строго равной периоду частоты сети, и так как частота все время меняется, то этот период все время надо отслеживать.

Такой АЦП обладает невысоким быстродействием, и на его погрешности также влияют чувствительность компаратора K , разрядность преобразователя и нестабильность генератора тактовых импульсов $G_{ми}$.

Контрольные вопросы

1. Понятие аналого-цифрового преобразователя (АЦП), его функции назначение и применение.
2. Обзор способов выполнения аналого-цифрового преобразования.
3. Способ выполнения аналого-цифрового преобразования напряжения с промежуточным преобразованием во временной интервал.
4. Структура и принцип действия АЦП напряжения с промежуточным преобразованием во временной интервал.
5. Составляющие погрешности АЦП напряжения с промежуточным преобразованием во временной интервал.
6. Способ выполнения аналого-цифрового преобразования напряжения с использованием ЦАП в цепи обратной связи.
7. Структура и принцип действия АЦП напряжения с использованием ЦАП в цепи обратной связи.
8. Составляющие погрешности АЦП напряжения с использованием ЦАП в цепи обратной связи.
9. Способ выполнения аналого-цифрового преобразования напряжения методом двойного интегрирования.
10. Структура и принцип действия АЦП напряжения с двойным интегрированием.
11. Составляющие погрешности АЦП напряжения с двойным интегрированием.
12. Почему АЦП напряжения с двойным интегрированием обладает повышенной помехоустойчивостью?

14.9. Микропроцессоры и микроконтроллеры

Микропроцессор. Микропроцессор (МП) – это программно-управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки. Микропроцессоры выполняются в виде одной или нескольких больших интегральных схем (БИС).

Если весь процессор размещен на одной БИС, то его называют однокристалльным микропроцессором (ОМП). Если на нескольких – многокристалльным (ММП).

Одним из первых однокристальных микропроцессоров, который нашел широкое применение в промышленности, является 8-разрядный микропроцессор КР580ВМ80А. Структура этого МП приведена на рис. 14.29.

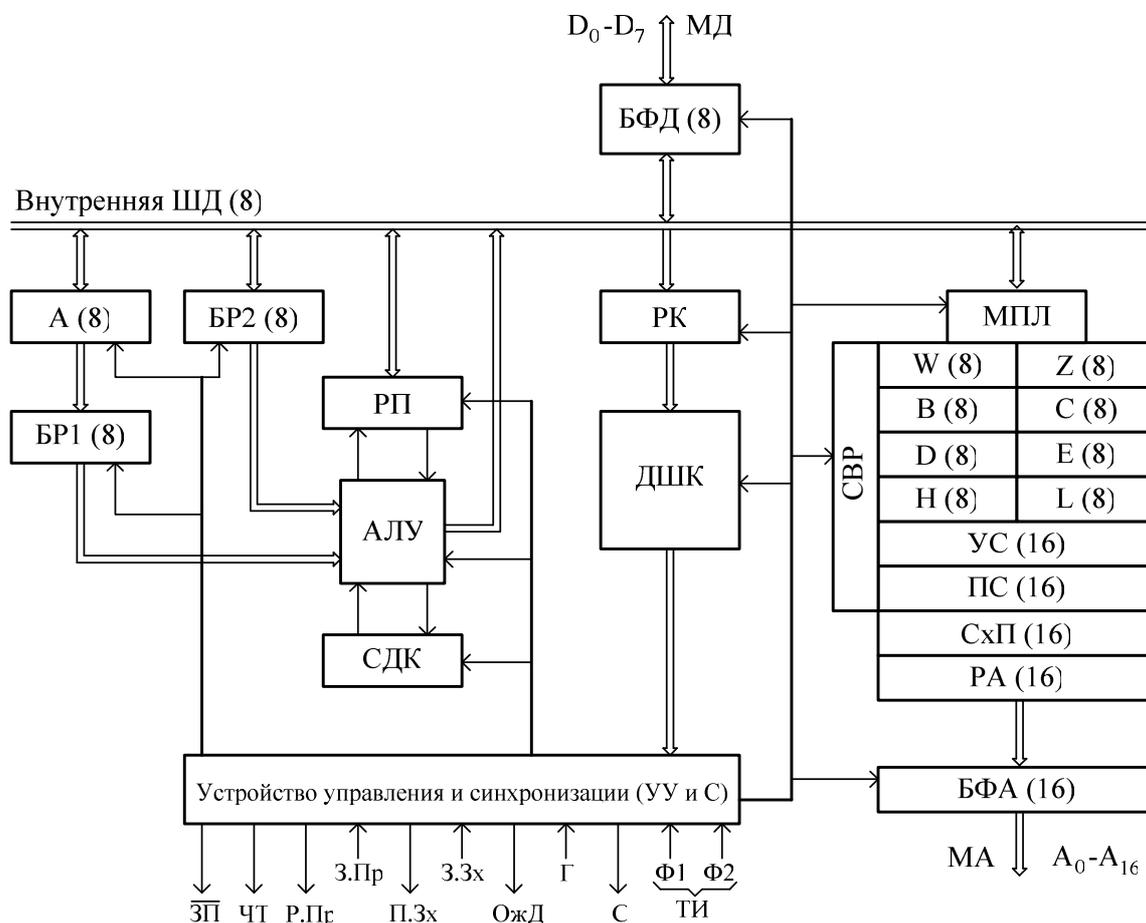


Рис. 14.29. Структура микропроцессора КР580ВМ80А

МП имеет внутреннюю двунаправленную 8-разрядную шину данных для передачи информации, развязанную от внешней магистрали данных D7-D0 двунаправленным буфером с тремя состояниями (одно состояние – ввод информации, второе – вывод информации, третье – выключено или обрыв, т.е. информация не передается).

Обработку информации выполняет арифметико-логическое устройство (АЛУ) со вспомогательными элементами: регистром-аккумулятором А, буферными регистрами БР1 и БР2, регистром признаков РП и схемой десятичной коррекции СДК. Перед началом выполнения операции один из операндов по внутренней шине данных через аккумулятор А помещается в буферный регистр БР1. Второй операнд помещается в буферный регистр БР2. Результат выполнения операции в АЛУ по той же шине пересылается

в регистр аккумулятора А. В регистре признаков РП фиксируются признаки выполнения операции, такие как знак результата, признак нулевого результата, признак переноса и др. Эти признаки используются командами условных переходов.

Важное значение имеет блок регистров общего назначения (РОН), в который входят 8-разрядные регистры W, Z, B, C, D, E, H, L, 16-разрядный указатель стека (УС) и программный счетчик (ПС), а также регистр адреса (РА) и схема приращения (СхП). Обращение к регистрам осуществляется через мультиплексор (МПЛ) при управлении от схемы выбора регистра (СВР), а регистр адреса РА через однонаправленный буфер адреса с третьим состоянием выходит на внешнюю 16-разрядную шину адреса. Регистры W и Z являются служебными и программно не доступны, а регистры B, C, D, E, H, L программно доступны и используются для запоминания операндов и промежуточных результатов, т.е. выполняют роль сверхоперативной памяти.

Указатель стека УС хранит начальный адрес стековой памяти, которая представляет собой область внешнего запоминающего устройства и работает по закону «первый вошел – последний вышел». Стековая память предназначена для запоминания состояния микропроцессора (всех его регистров), когда МП переходит к обработке прерывания, т.е. к другой программе, но после завершения обработки прерывания МП считывает из стековой памяти прерванное состояние и продолжает работу. В программном счетчике (ПС) совместно со схемой приращений (СхП) формируется адрес следующей команды.

Взаимодействие всех узлов микропроцессора организует устройство управления и синхронизации (УУиС). МП работает под управлением программы, которая состоит из отдельных команд. 8-разрядный код команды из внешней памяти через буфер данных и через внутреннюю шину данных поступает на регистр команд (РК), дешифрируется дешифратором команд (ДшК) и воздействует на устройство управления и синхронизации, которое формирует управляющие сигналы для всех узлов МП, в т.ч. и внешние сигналы.

Конструктивно МП КР580ВМ80А размещен в 40-выводном DIP корпусе, и требует подключения трех питающих напряжений +12 В, +5 В, -5 В.

МП КР580ВМ80А не является функционально законченным вычислительным устройством. Чтобы получить вычислительное устройство для обработки информации, МП КР580ВМ80А необходимо дополнить внешним генератором тактовых импульсов (м/сх КР580ГФ24), системным контроллером (м/сх КР580ВК28), контроллером прерываний (м/сх

КР580ВН59), портами ввода-вывода (м/сх КР580ВВ55 или м/сх КР580ВВ51), постоянным запоминающим устройством (ПЗУ) на микросхемах КР573РФ2 и оперативным запоминающим устройством (ОЗУ) на микросхемах КР537РУ3.

ПЗУ отличается от ОЗУ тем, что способно сохранять информацию при отключении напряжения питания, а ОЗУ в этом случае теряет информацию. Кроме того, в процессе работы МП может только считывать информацию из ПЗУ, а при работе с ОЗУ возможны как запись, так и считывание информации.

Микропроцессор тем и отличается от микроконтроллера, что он не является функционально законченным вычислителем, а требует соответствующей обвязки и дополнения микросхемами.

Микропроцессор выполняет обработку информации под управлением программы, которая записана в ОЗУ или ПЗУ. Программа представляет собой набор команд, последовательное выполнение которых обеспечивает необходимые действия. Программа может быть неразветвленной, т.е. не содержит условных или безусловных переходов, может или разветвленной с указанными переходами, может содержать циклы и др. Программа должна быть представлена в системе команд соответствующего микропроцессора.

Система команд микропроцессора имеет обычно несколько десятков команд, разделенных на группы по назначению. Это команды пересылки данных, команды адресации, команды условных и безусловных переходов, команды увеличения (+1) и уменьшения (-1) на единицу содержимого регистров, команды ввода-вывода, команды арифметических и логических операций и др. Состав системы команд микропроцессора позволяет реализовывать достаточно сложные программы по обработке информации с ветвлениями и многократно вложенными циклами.

Микропроцессоры широко применяются в приборостроении, автоматике, машиностроении, связи и других отраслях промышленности.

Микроконтроллер. Микроконтроллер отличается от микропроцессора тем, что является функционально законченным устройством и включает в свой состав все необходимые узлы и блоки, необходимые для выполнения обработки информации. Для микроконтроллеров характерны малое количество внешних выводов, низкое энергопотребление, высокая производительность, наличие энергонезависимой памяти данных и возможность многократного перепрограммирования памяти команд.

На рис. 14.30 приведена структурная схема одного из современных микроконтроллеров КР1878ВЕ1, быстроедействие которого позволяет использовать его в системах управления реального времени.

Центральный процессор микроконтроллера предназначен для выполнения арифметических и логических преобразований 8-разрядных операндов, расположенных в памяти микроконтроллера.

Порты ввода/вывода А и В предназначены для обмена информацией с внешними устройствами по магистралям соответственно (РА0...РА3) и (РВ0...РВ7).

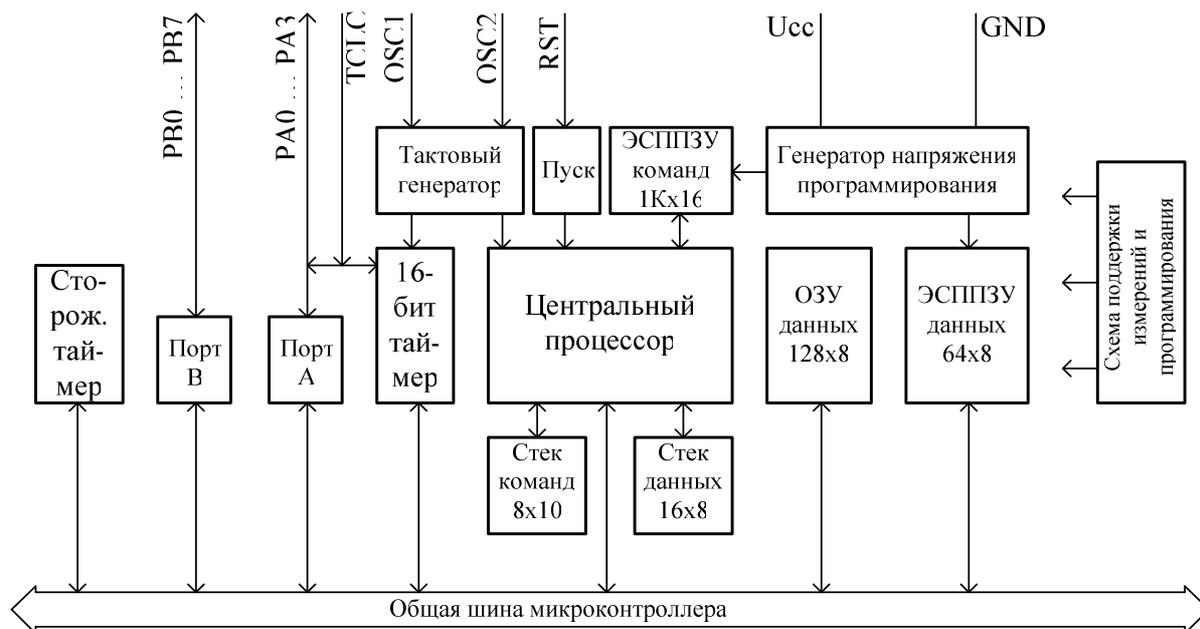


Рис. 14.30. Структурная схема микроконтроллера КР1878ВЕ1

Интервальный таймер-счетчик внешних событий предназначен для формирования требуемых временных интервалов.

Сторожевой таймер предназначен для отслеживания непредвиденных ситуаций и выдачи сигнала прерывания, когда центральный процессор в результате каких-либо сбоев находится в неопределенном состоянии.

В электрически-стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ЭСППЗУ) команд записывается программа, управляющая работой микроконтроллера.

ОЗУ данных и ЭСППЗУ данных предназначены для хранения промежуточных результатов вычислений.

Стек команд и стек данных предназначены для записи состояния центрального процессора при переходе на обработку прерываний, чтобы потом восстановить прерванное состояние и продолжить работу.

Остальные блоки структуры данного микроконтроллера выполняют служебные функции и их назначение очевидно.

Система команд микроконтроллера КР1878ВЕ1 состоит из 52 команд различного назначения и позволяет создавать программы значительной сложности с многочисленными ветвлениями и циклами.

Микроконтроллер выпускается в 18-выводном пластмассовом DIP-корпусе.

Микроконтроллеры находят широкое применение в различных устройствах бытового и промышленного назначения, в частности в измерительной технике, в машиностроении, в управляющих устройствах автоматики, в медицинской технике и других отраслях.

Контрольные вопросы

1. Микропроцессор и его назначение.
2. Назначение арифметико-логического устройства.
3. Назначение и виды памяти в микропроцессорных устройствах.
4. Для чего используются регистры общего назначения, указатель стека и программный счетчик, входящие в структуру микропроцессора?
5. Где располагается программа, управляющая работой микропроцессора?
6. Для чего нужны порты ввода-вывода микропроцессорных устройств и какие они бывают?
7. Назначение регистра команд, дешифратора команд и устройства управления в структуре микропроцессора.
8. Понятие о системе команд микропроцессора. Какие типовые группы команд в нее входят?
9. В чем заключаются отличия микропроцессора от микроконтроллера?
10. Области применения микропроцессоров и микроконтроллеров.

15. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

15.1. Структура электропривода

Электропривод – электротехническое устройство, посредством которого осуществляется движение рабочего органа производственного механизма.

Электропривод состоит из двух частей. **Механическая часть** – это все элементы, соединенные с валом двигателя, и движущиеся вместе с ним (ротор, редуктор, рабочий орган РО). **Электрическая часть** включает в себя *силовые элементы* (электродвигатели, трансформаторы) и *управляющие устройства* (преобразовательные устройства, релейно-контакторная аппаратура). На рис. 15.1 показана структурная схема современного электропривода.

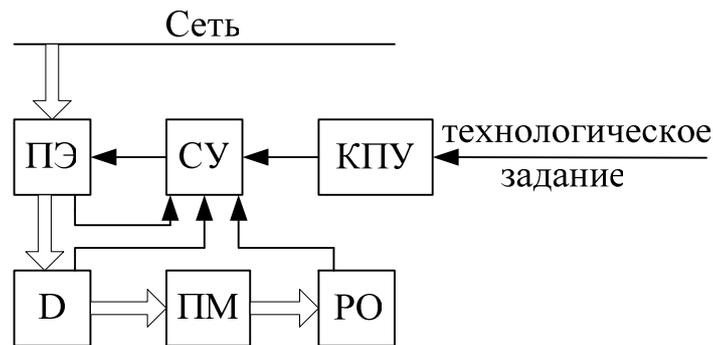


Рис. 15.1. Структурная схема электропривода:

ПЭ – преобразователь электрический, Д – электродвигатель, ПМ – преобразователь механический, РО – рабочий орган, СУ – система управления, КПУ – командно-программное устройство

Основным элементом привода является двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую. В зависимости от способа соединения двигателя и рабочего органа привод разделяют на *групповой, одиночный* и *многодвигательный*.

В групповом электроприводе один электродвигатель обслуживает группу РО. Из-за необходимости использования сложных, громоздких передач движения от двигателя к рабочим органам производственных механизмов групповой электропривод в настоящее время не используется.

Наиболее распространен одиночный привод, в котором каждый рабочий орган приводится в движение одним электродвигателем. В многодвигательном приводе или несколько двигателей приводят в движение

один РО, или каждый электродвигатель приводит в движение свой РО, на одной производственной машине, например, станка.

Особенностью современного электропривода является большой диапазон мощностей (от долей кВт до десятков тысяч кВт) от сервоприводов смазки, приводов систем управления до приводов блюмингов, шахтных подъемников, аэродинамических труб и т.д. Второй особенностью электропривода является глубокая степень автоматизации.

Современный электропривод внедряется во все сферы хозяйственной деятельности, совершенствуются регулировочные и динамические свойства, улучшаются точностные и экономические показатели, повышается надежность, совершенствуются силовые элементы, широко внедряется электроника и в систему управления, и в силовые преобразователи.

15.2. Уравнение движения электропривода

В соответствии со вторым законом Ньютона для вращающихся тел движение электропривода определяется действием двух моментов: вращающим моментом $M_{вр}$, развиваемым электродвигателем, и моментом сопротивления M_c рабочего органа производственного механизма, который направлен в противоположную сторону и является тормозным:

$$M_{вр} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}$$

где J – эквивалентный момент инерции электропривода, равный сумме моментов инерции всех движущихся частей электропривода, приведенных к валу двигателя;

$\frac{d\omega}{dt}$ и ω – угловое ускорение и частота вращения вала двигателя.

Если частота вращения двигателя постоянная ($\omega = \text{const}$ и $\frac{d\omega}{dt} = 0$),

то $M_{вр} = M_c$, и этот режим работы двигателя называется *установившимся*.

Если $M_{вр} > M_c$ или $M_{вр} < M_c$, то возникает ускорение, при котором привод соответственно или увеличивает или уменьшает частоту вращения ($\frac{d\omega}{dt} > 0$ или $\frac{d\omega}{dt} < 0$). Такой, как правило, кратковременный режим называется *переходным*. После переходного режима вновь наступает установившийся режим, при котором восстанавливается механическое равновесие $M_{вр} = M_c$, но уже при другой частоте вращения двигателя.

Как известно, свойство электрических машин автоматически изменять вращающий момент в соответствии с механической нагрузкой на валу двигателя M_c и тем самым поддерживать механическое равновесие называется *саморегулированием*. При этом установившаяся частота вращения привода определяется при равенстве вращающего момента двигателя и момента сопротивления рабочей машины.

15.3. Механические характеристики электродвигателей и рабочих механизмов

Зависимость $\omega = f(M_{ep})$ называется механической характеристикой двигателя. Она снимается в установившемся режиме и показывает, как будет изменяться частота вращения двигателя при изменении вращающего момента.

Но следует помнить, что изменить вращающий момент электрическим способом (изменением напряжения питания, магнитного потока, введением какого-либо сопротивления) можно лишь кратковременно. После переходного процесса вращающий момент всегда установится равным моменту нагрузки. Поэтому **механическая характеристика электродвигателя показывает, как изменяется частота вращения двигателя при изменении нагрузки на его валу.**

Зависимость $\omega = f(M_c)$ называется механической характеристикой рабочего механизма. Характеристика снимается также в установившемся режиме и показывает, какой момент возникает в рабочей машине, если ее приводить в движение с той или иной частотой вращения.

На рис. 15.2 показаны механические характеристики электродвигателей. Синхронный двигатель имеет абсолютно жесткую механическую характеристику, при которой частота вращения двигателя не зависит от момента нагрузки на его валу. Асинхронный двигатель в рабочем диапазоне и двигатель постоянного тока независимого, параллельного и смешанного возбуждения имеют достаточно жесткую механическую характеристику, когда изменение нагрузки вызывает незначительное изменение частоты вращения двигателя. А двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением имеет мягкую механическую характеристику при небольшой нагрузке, но при больших нагрузках характеристика становится достаточно жесткой.

На рис. 15.3 показаны механические характеристики некоторых производственных механизмов.

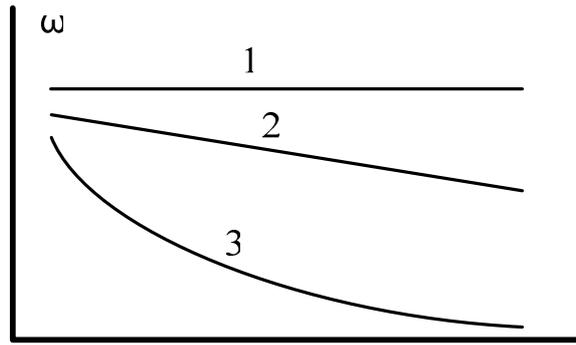


Рис. 15.2. Механические характеристики двигателей:
 1 – синхронного; 2 – постоянного тока;
 3 – постоянного тока последовательного возбуждения

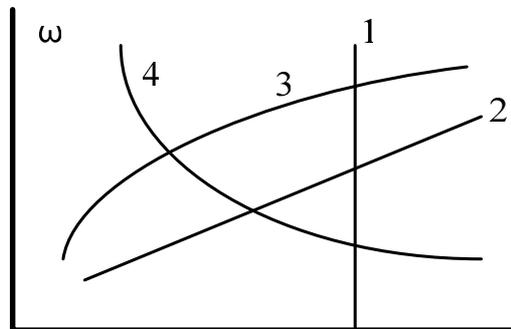


Рис. 15.3 Механические характеристики рабочих органов механизмов:
 1 – механизмы подачи, подъемные механизмы; 2 – генератор постоянного тока;
 3 – вентиляторы, насосы; 4 – токарные, фрезерные станки

При совместной работе электродвигателя и рабочего механизма частоту вращения электродвигателя можно определить графически. Установившийся режим определяется на пересечении механических характеристик двигателя и рабочего механизма при равенстве моментов.

На рис. 15.4 показана механическая характеристика асинхронного двигателя и механические характеристики двух механизмов. В одном из них момент сопротивления не зависит от скорости вращения $M_{c1} = \text{const}$, а в другом M_{c2} линейно возрастает с увеличением частоты вращения.

При нагрузке M_{c1} равенство моментов имеет место в двух точках: А и В. Режим, соответствующий точке А, является устойчивым. Действительно, при случайном уменьшении частоты $\omega < \omega_1$ вращающий момент будет превышать момент сопротивления M_{c1} , возникает положительное ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ и частота вращения восстанавливается. Аналогично, при случайном возрастании скорости возникает отрицательное ускорение, и привод возвращается в режим А.

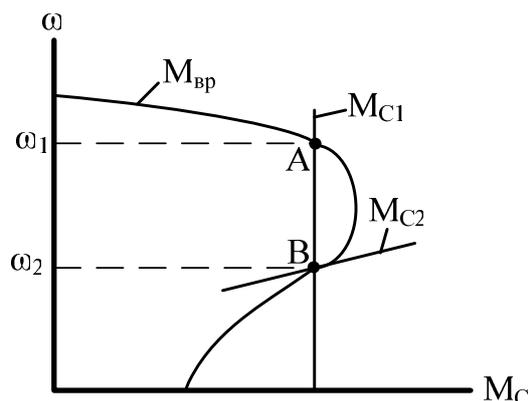


Рис. 15.4. Совместные механические характеристики электродвигателя и рабочего механизма

Режим, соответствующий точке В при нагрузке M_{c1} , является неустойчивым и при случайном возрастании частоты $\omega > \omega_2$ возникает положительное ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ и частота будет нарастать, пока не станет равной ω_1 . При случайном уменьшении частоты $\omega < \omega_2$ вращающий момент становится меньше момента сопротивления M_{c1} и привод будет уменьшать обороты до полной остановки.

Однако нельзя считать, что режим, соответствующий точке В, является неустойчивым при любой нагрузке. Если двигатель вращает, например, генератор постоянного тока, в цепи якоря которого включено постоянное сопротивление, то механическая характеристика M_{c2} будет иметь линейный характер, и легко убедиться в том, что при случайном увеличении или уменьшении частоты ω_2 возникает ускорение, которое возвращает привод в режим В.

15.4. Реверсирование и торможение электродвигателей

Реверс двигателя, т.е. изменение направления вращения, осуществляется изменением направления момента.

Тормозные режимы имеют место, когда направление электромагнитного момента и скорость вращения двигателя противоположны.

Торможение необходимо для быстрого останова двигателя, что особенно важно при наличии значительного момента инерции привода. Торможение необходимо, например, в подъемных механизмах при спуске груза или при движении электротранспорта под уклон. Существуют три способа электрического торможения: торможение противовключением, динамическое и рекуперативное (с отдачей энергии движущихся масс в сеть).

15.4.1. Двигатели постоянного тока

Реверс двигателя постоянного тока в соответствии с формулой $M_{эм} = k\Phi I_я$ можно достичь либо изменением направления магнитного потока (токов обмотке возбуждения), либо изменением направления тока в цепи якоря. При одновременном изменении направления токов в обеих обмотках направление момента и вращения якоря двигателя не меняется, как, например, у двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Такие двигатели могут работать от сети переменного тока. Специальные коллекторные двигатели последовательного возбуждения, которые работают от сетей постоянного и переменного тока, называются универсальными. Универсальные двигатели изготавливаются мощностью до 150 Вт и применяются в бытовой технике (пылесосы, вентиляторы, швейные машины и т.д.).

Пусть машина постоянного тока, работающая в режиме двигателя, поднимает груз, вращаясь со скоростью ω и развивая электромагнитный момент $M_{эм}$, равный моменту сопротивления, направленному в противоположную сторону (рис. 15.5). Потребляемый ток зависит от напряжения питания U , противоЭДС $E_я$ и сопротивления в цепи якоря:

$$I_я = \frac{U - E_я}{R_я}.$$

Торможение противовключением создается изменением полярности питающего напряжения. При этом ток якоря

$$I_я = \frac{-U - E_я}{R_я}$$

изменяет свое направление и резко возрастает, т.к. источник питания и ЭДС якоря действуют согласно (рис. 15.6).

Следовательно, меняет знак и электромагнитный момент $M_{эм} = k\Phi I_я$, и машина, вращаясь по инерции по часовой стрелке, быстро тормозится. Резкий скачок тока вызывает механический удар, поэтому для уменьшения тока в режиме противовключения, как правило, на время торможения включают в цепь якоря ограничивающее ток сопротивление (рис. 15.6, а).

Режим противовключения имеет место и в том случае, если активный момент сопротивления будет настолько большим, что якорь начнет вращаться в противоположную сторону (рис. 15.6, б). При этом ЭДС якоря

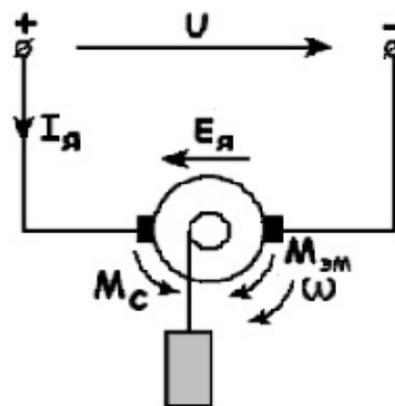


Рис. 15.5. Двигательный режим

меняет свой знак и ток якоря $I_{я} = \frac{(U + E_{я})}{R_{я}}$ создает тормозной момент, направление которого не изменяется, но будет противоположно направлению вращения. Этот режим может быть использован при плавном спуске большого груза.

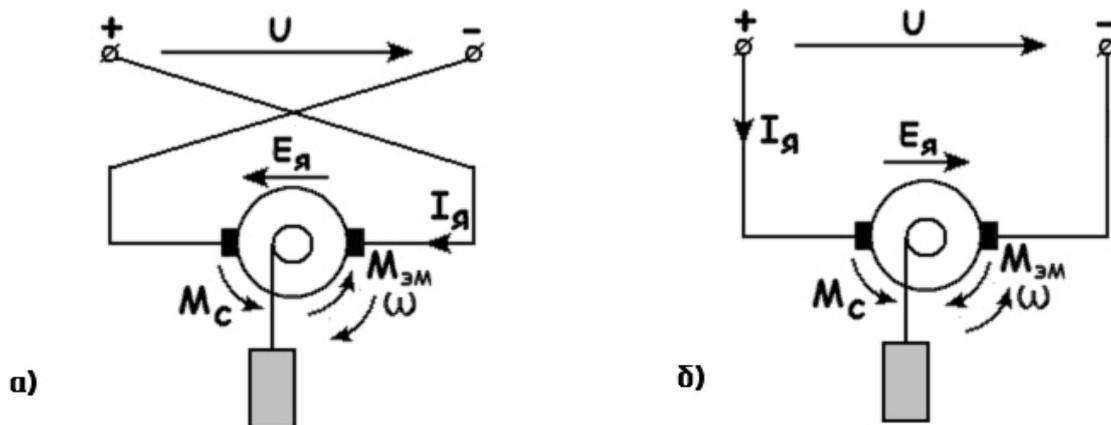


Рис. 15.6. Торможение противовключением:
 а – изменением полярности источника питания; б – при спуске груза

Генераторное рекуперативное торможение создается в том случае, если скорость вращения якоря будет больше скорости холостого хода. Это может иметь место, например, при спуске груза (рис. 15.7) или при движении электровоза под уклон.

В режиме холостого хода $M_{эм} = 0$, следовательно, $I_{я} = 0$, т.е. $U = E_{я}$. Если $\omega > \omega_0$, то $E_{я}$ становится больше напряжения и ток якоря изменяется по направлению:

$$I_{я} = \frac{(E_{я} - U)}{R_{я}}.$$

Это означает, что машина не потребляет ток из сети, а, напротив, отдает энергию в сеть, т.е. переходит в генераторный режим за счет кинетической энергии спускаемого груза.

Динамическое торможение является частным случаем генераторного торможения, когда якорь двигателя отключается от сети и замыкается накоротко (рис. 15.8).

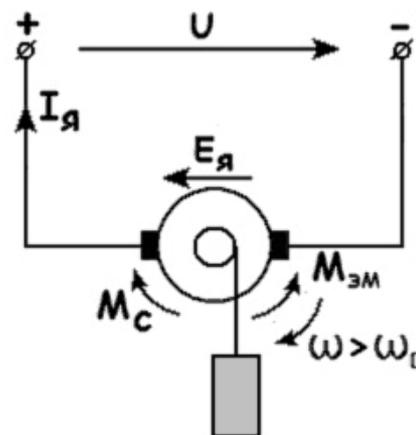


Рис. 15.7. Рекуперативное торможение

В этом случае ток якоря $I_{я} = \frac{-E_{я}}{R_{я}}$ меняет свою величину и направление. Меняет направление и электромагнитный момент, под действием которого якорь тормозится.

Тормозные режимы машины постоянного тока можно показать на механической характеристике (рис. 15.9). Во всех установившихся режимах электромагнитный момент должен быть равен моменту сопротивления на валу и направлен в обратную сторону.

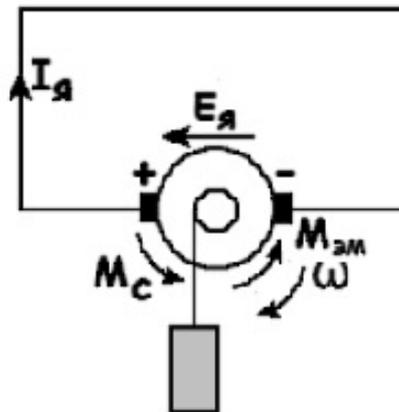


Рис. 15.8. Динамическое торможение

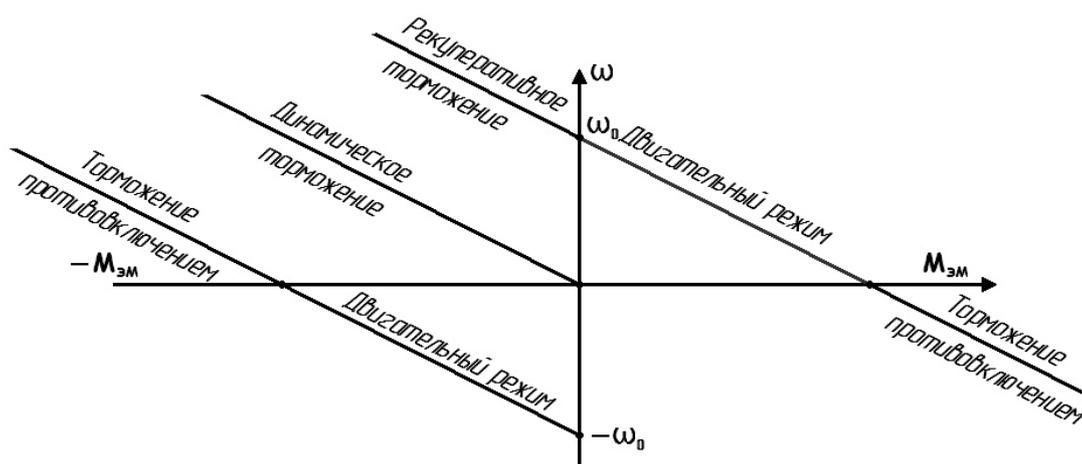


Рис. 15.9. Механические характеристики машин в двигательном и тормозных режимах

15.4.2. Асинхронные двигатели

Реверсирование асинхронного двигателя можно осуществить изменением направления вращения магнитного поля, что достигается, если поменять местами любые две фазы питающего напряжения.

Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с помощью реверсивного магнитного пускателя показана на рис. 15.10.

Подготовка схемы к работе осуществляется включением силового автоматического воздушного выключателя QF и автомата SF в цепи управления.

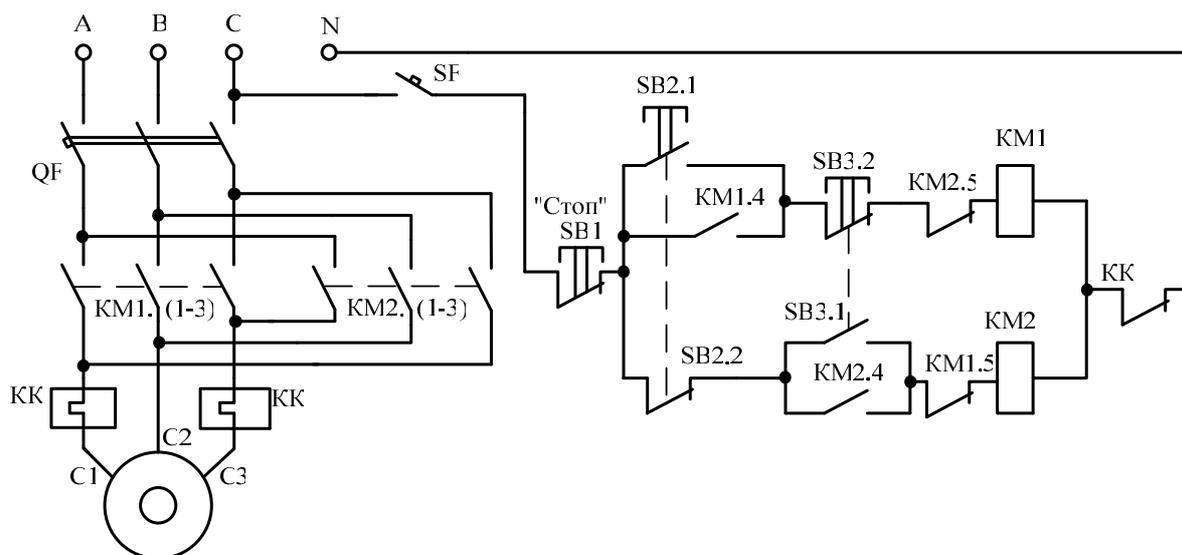


Рис. 15.10. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем

При нажатии на кнопку SB2 («вперед») получает питание катушка контактора KM1, после срабатывания которого замыкаются три силовых контакта KM1.(1 – 3), питающих электродвигатель. Кроме того, замыкается контакт KM1.4, устанавливая обмотку KM1 на самопитание.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо нажать на кнопку SB3 («назад»). Получает питание катушка контактора KM2 через контакты SB1, SB2.2, замкнувшиеся контакты SB3.1 и KM1.5 и контакт теплового реле КК. Замыкаются силовые контакты KM2.(1 – 3) и фаза А будет подключена не к клемме C1, а к клемме C3, а фаза С с клеммы C3 переходит на клемму C1.

Переход к противоположному направлению вращения при нажатии кнопки связан с обесточиванием катушки контактора предыдущего направления вращения за счет размыкающих контактов SB2.2 и SB3.2. Кроме того, в схему включена дополнительная блокировка от одновременного срабатывания контакторов с помощью контактов KM2.5 и KM1.5. В противном случае при одновременном срабатывании контакторов произошло бы короткое замыкание между фазами А и С.

Выключение двигателя осуществляется нажатием на кнопку SB1 «стоп», контакт которой обесточивает ту или иную катушку. Контакторы отключаются, и двигатель останавливается также при срабатывании защиты – теплового реле.

При *торможении противовключением* меняют местами две любые фазы обмотки статора. При этом изменяется направление вращения поля и вращающего момента. На рис. 15.11, а показана механическая характеристика, располагающаяся в 2-м и 3-м квадрантах.

Если двигательный режим соответствовал рабочей точке A на механической характеристике, то в момент переключения двигатель переходит на новую характеристику (точка B при той же частоте вращения), момент становится отрицательным (тормозным), под действием которого двигатель быстро останавливается (точка C). В этот момент двигатель следует отключить от сети, иначе он будет разворачиваться в обратном направлении. Следует помнить, что при противовключении значительно возрастает ток, превышающий даже пусковой.

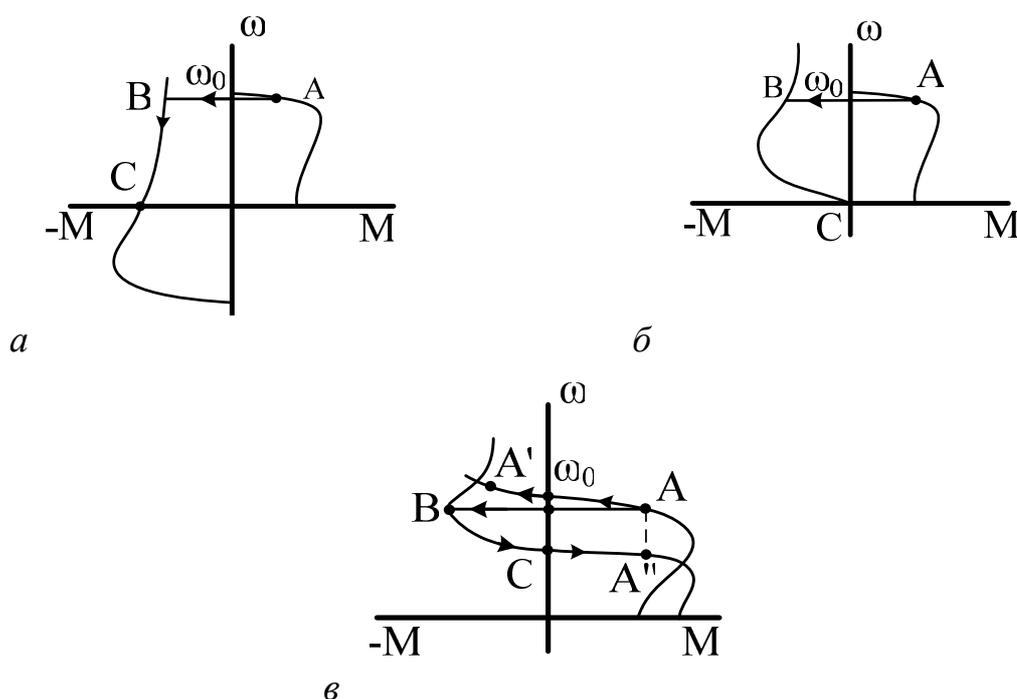


Рис. 15.11. Тормозные режимы асинхронного двигателя:
 a – торможение противовключением, $б$ – динамическое торможение,
 $в$ – рекуперативное торможение

Схема управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при торможении противовключением представлена на рис. 15.12.

Управляющим элементом схемы является реле контроля скорости РКС, которое механически связано с валом двигателя. Его контакт разомкнут при скорости привода, не превышающей 15 % номинальной скорости двигателя, при больших скоростях он замкнут.

Питание силовой части цепи подается с включением автомата QF , а цепи управления – автоматом SF .

Включение двигателя осуществляется магнитным пускателем, который состоит из контактора $KM1$, кнопочной станции $SB1$ и $SB2$ и теплово-

Механическая характеристика асинхронной машины при динамическом торможении (см. рис. 15.11, б) располагается во 2-м квадранте и проходит через начало координат, т.к. при скорости, равной 0, тормозной момент отсутствует. Как видно из рисунка, в момент переключения тормозной момент достаточно велик (точка В), но при уменьшении скорости он вначале увеличивается, а затем уменьшается. Это недостаток динамического торможения.

В схеме нереверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при динамическом торможении кроме контактора КМ1, входящего в комплект магнитного пускателя, предусмотрен контактор КМ2, который на время торможения подключает обмотки статора к источнику постоянного тока (рис. 15.13)

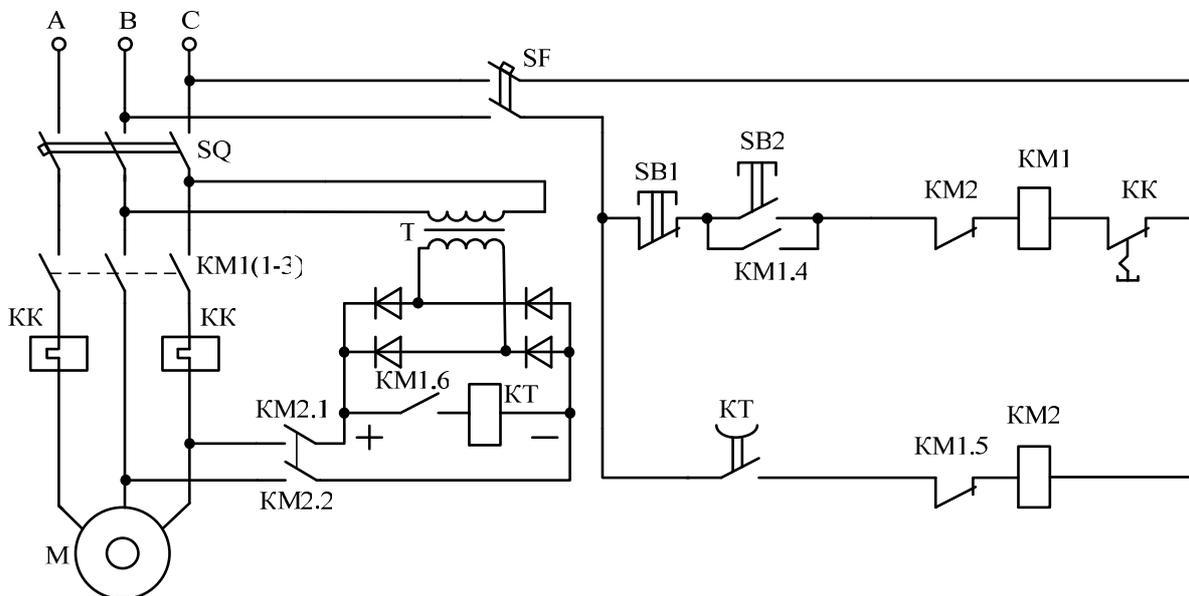


Рис. 15.13 Схема нереверсивного управления асинхронным двигателем при динамическом торможении

Запуск двигателя осуществляется, как обычно, магнитным пускателем. При этом кроме силовых контактов КМ1.(1 – 3) замыкается контакт КМ1.6, срабатывает реле времени КТ и замыкает свой контакт, подготавливая включение контактора КМ2, который будет обесточен во время работы двигателя разомкнутым контактом КМ1.5.

При выключении двигателя замыкается контакт КМ1.5, срабатывает контактор торможения КМ2, т.к. контакт КТ на время торможения будет еще замкнут несмотря на отключение катушки реле времени разомкнутым контактом КМ1.6. При этом напряжение вторичной обмотки трансформатора Т после мостовой схемы выпрямления через си-

ловые контакты КМ2.1 и КМ2.2 контактора подается на обмотки статора электродвигателя, и ротор, вращаясь в неподвижном магнитном поле, быстро тормозится. В конце торможения после размыкания контакта КТ обесточивается обмотка контактора КМ2, и с размыканием контактов КМ2.1 и КМ2.2 прекращается подача постоянного тока к обмоткам статора двигателя. Динамическое торможение часто используется для быстрой остановки вращающихся частей металлорежущих станков в электроприводах главного движения.

Генераторное торможение с отдачей энергии в сеть возникает при вращении двигателя со скоростью, превышающую синхронную ω_0 . Например, при движении электропоезда под уклон скорость возрастает, и когда она становится больше синхронной, рабочая точка А (см. рис. 15.11, в) переходит во 2-й квадрат, и момент становится отрицательным, т.е. тормозным. При этом фаза тока изменяется, и двигатель становится генератором, в котором механическая энергия преобразуется в электрическую и возвращается в сеть.

Генераторное торможение также возникает в многоскоростных двигателях при переключении пар полюсов на меньшую скорость. При таком переключении двигатель, работающий в режиме А, переходит в тормозной, генераторный режим (точка В) с отдачей энергии в сеть (участок ВС) и при дальнейшем снижении скорости вновь переходит на двигательный режим (участок СА"). Новый установившейся режим А" соответствует прежнему моменту сопротивления двигателя на валу.

Схема управления трехфазным двухскоростным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, которая предусматривает возможность переключения фаз обмотки статора с треугольника на двойную звезду и обратно, показана на рис. 15.14.

При включенных автоматах QF и SF при нажатии на кнопку SB2 получает питание катушка контактора КМ1. Контактор срабатывает, замыкает три силовых контакта КМ1.(1 – 3) и обмотки двигателя будут соединены треугольником. Если нажать кнопку SB3, то отключается контактор КМ1 и включается КМ2, который своими силовыми контактами КМ2.(1 – 5) переключает обмотки статора асинхронного двигателя с треугольника на двойную звезду. При этом число пар полюсов уменьшается вдвое, и двигатель приобретает удвоенную частоту вращения. Если снова нажать кнопку SB2, то при переходе на меньшую скорость вначале создается режим генераторного торможения, позволяющий быстро перейти на новый режим с меньшей частотой вращения.

В схеме предусмотрена двойная защита, которая не позволяет одновременно включать два контактора. Этому способствуют и дополнительные контакты SB2.2 и SB3.2 пусковых кнопок, и размыкающие контакты KM1.5 и KM2.7 соответствующих контакторов.

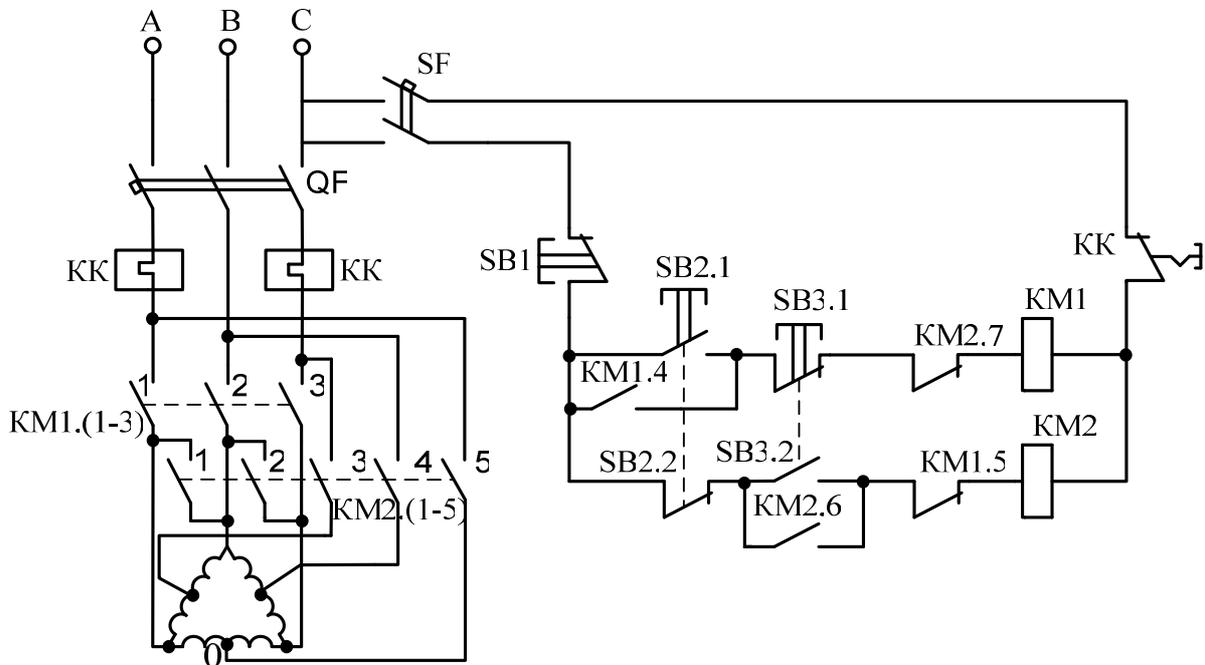


Рис. 15.14 Схема управления трехфазным двухскоростным асинхронным двигателем

15.5. Динамика электропривода

При анализе механических процессов электропривода во время переходных режимов (при пуске, торможении, изменении нагрузки, регулировании скорости) используют основное уравнение движения электропривода:

$$M_{ep} - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

откуда время переходного процесса, при котором частота вращения вала двигателя изменяется от ω_1 до ω_2 :

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J}{M_{ep} - M_c} d\omega,$$

где J – момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

Для решения этого интеграла необходимо знать аналитические зависимости $M_{ep} = f_1(\omega)$ – механическую характеристику двигателя и $M_c = f_2(\omega)$ – механическую характеристику рабочего механизма.

В частном случае, если $M_{вр}$ и $M_c = \text{const}$, то время переходного процесса при изменении частоты вращения вала двигателя от ω_1 до ω_2 :

$$t = \frac{J}{M_{вр} - M_c} (\omega_2 - \omega_1).$$

Если при известных механических характеристиках двигателя и рабочей машины интеграл не решается в аналитической форме, задачу решают графоаналитическим методом. По заданным графически механическим характеристикам двигателя и рабочей машины определяют установившуюся частоту вращения вала двигателя ω_4 (рис. 15.15, а).

Затем строят совместную механическую характеристику $\omega = f(M_{вр} - M_c)$ (рис. 15.15, б), которую разбивают на несколько участков. В нашем примере 4 участка ($0 - \omega_1$; $\omega_1 - \omega_2$; $\omega_2 - \omega_3$; $\omega_3 - \omega_4$). В пределах каждого участка определяют средний момент (M_1, M_2, M_3 и M_4). Таким образом, совместную механическую характеристику заменяют ступенчатым графиком, в котором на каждом участке момент не изменяется. Чем больше участков, тем точнее результат. После чего определяют время разгона двигателя на каждом участке, и суммируют результат: $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$, где

$$t_1 = \frac{J}{M_1} (\omega_1 - 0); t_2 = \frac{J}{M_2} (\omega_2 - \omega_1); t_3 = \frac{J}{M_3} (\omega_3 - \omega_2); t_4 = \frac{J}{M_4} (\omega_{уст} - \omega_3).$$

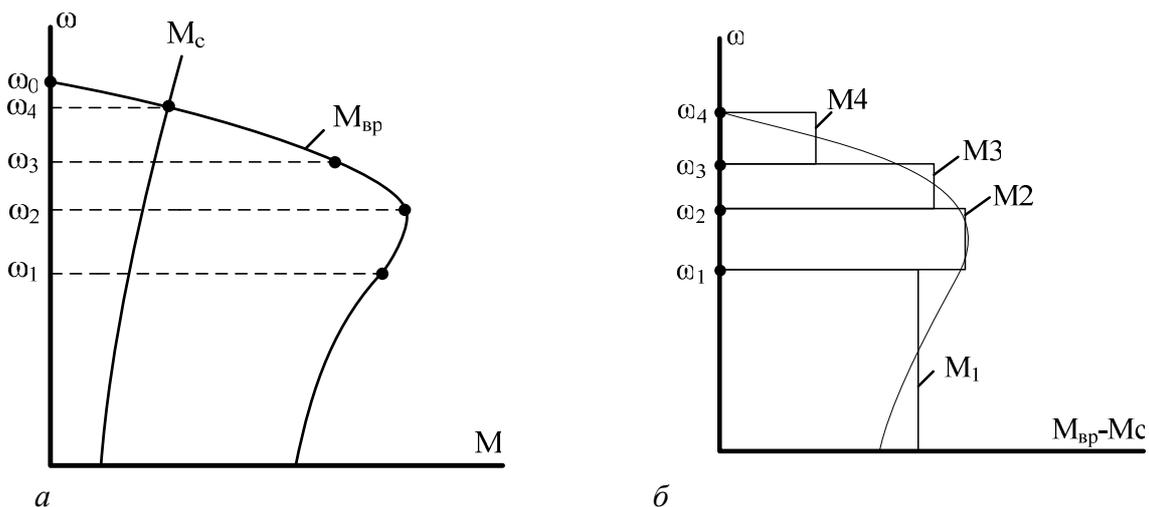


Рис. 15.15 Механические характеристики:
а – двигателя и рабочей машины, б – совместная (суммарная)

Аналогично определяют время остановки (время выбега) двигателя, например, под действием постоянной силы трения без нагрузки:

$$t_{ост} = \frac{J}{-M_{тр}}(0 - \omega_{уст}) = \frac{J}{M_{тр}} \cdot \omega_{уст}.$$

15.6. Определение момента инерции привода

В простейшем случае, когда все части рабочей машины вращаются с частотой вращения вала двигателя ω_0 , например, вентилятор, эквивалентный момент инерции равен арифметической сумме моментов, инерции вращающихся частей двигателя (ротора) и рабочей машины. При наличии нескольких звеньев рабочей машины, имеющими моменты инерции $J_1, J_2 \dots J_n$, вращающимися с различными скоростями $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_n$ и поступательно движущихся масс $m_1, m_2 \dots m_k$ со скоростями $v_1, v_2 \dots v_k$ результирующий, или эквивалентный момент, инерции всех движущихся частей электропривода, приведенный к частоте двигателя, определяется на основании равенства кинетических энергий:

$$J_{эkv} \frac{\omega_0^2}{2} = J_{дв} \frac{\omega_0^2}{2} + I_1 \frac{\omega_1^2}{2} + I_2 \frac{\omega_2^2}{2} + \dots + I_n \frac{\omega_n^2}{2} + \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_k v_k^2}{2},$$

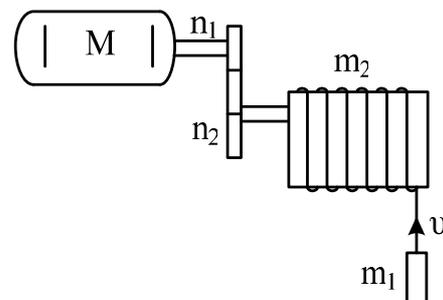
откуда

$$J_{эkv} = J_{дв} + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_0} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_0} \right)^2 + \frac{m_1 v_1^2}{\omega_0^2} + \frac{m_2 v_2^2}{\omega_0^2} + \dots + \frac{m_k v_k^2}{\omega_0^2}.$$

Напомним, что момент инерции сплошного цилиндра $J = \frac{1}{8} m d^2$, где m – масса цилиндра, d – его диаметр, момент инерции полного тонкостенного цилиндра $J = \frac{1}{4} m d^2$.

Пример

Определить момент инерции привода, поднимающего груз массой $m_1 = 400$ кг с помощью троса, намотанного на полый барабан диаметром $d = 0,5$ м и массой $m_2 = 10$ кг. Частота вращения ротора $n_1 = 1000$ об/мин. Его момент инерции $J_1 = 0,155$ кгм². Передаточное отношение зубчатой пары $i = 5$. Моментом инерции шестерен пренебречь.



Решение:

Эквивалентный момент инерции привода, приведенный к валу электродвигателя

$$J_{\text{экв}} = J_1 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \frac{m_1 V^2}{\omega_1^2} = 0,155 + 0,625 \cdot \left(\frac{21}{105} \right)^2 + \frac{400 \cdot 5,25^2}{105^2} = 1,18 \text{ кгм}^2,$$

где угловая частота вращения вала двигателя

$$\omega_1 = 2\pi \frac{n}{60} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1000}{60} = 105 \text{ с}^{-1},$$

угловая частота вращения барабана

$$\omega_2 = \frac{\omega_1}{i} = \frac{105}{5} = 21 \text{ с}^{-1},$$

скорость перемещения груза

$$V = \omega_2 \cdot \frac{d}{2} = 21 \cdot \frac{0,5}{2} = 5,25 \text{ м/с}.$$

Момент инерции барабана

$$J_2 = \frac{1}{4} m_2 d^2 = \frac{1}{4} \cdot 10 \cdot 0,5^2 = 0,625 \text{ кгм}^2.$$

15.7. Выбор типа двигателя

Двигатель любого привода должен отличаться надежностью в эксплуатации, небольшими габаритами и массой, простотой управления, минимальной стоимостью и другими технико-экономическими показателями. Такими требованиями в большой степени отвечает асинхронный короткозамкнутый двигатель. Его основным недостатком является постоянная скорость вращения. Регулирование скорости привода с использованием асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно осуществлять с помощью различного рода механических преобразователей движения (редукторы, ременные и зубчатые передачи, вариаторы и др. устройства).

Для многоскоростных приводов следует проанализировать возможность использования трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Ступенчатое регулирование скорости двигателя обеспечивается изменением числа пар полюсов за счет различных переключений обмоток статора, позволяющих получать две, три, четыре различных скорости ротора.

Если электропривод требует плавное изменение скорости в небольшом диапазоне, используют трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором, а при широком диапазоне регулирования – двигатели постоянного тока.

На выбор двигателя для электропривода может оказать влияние наличие той или иной сети, ее номинальное напряжение, частота вращения энергетического машинного устройства, среда, в которой работает привод (наличие пыли, влаги, едких паров, высокой температуры и др. факторы).

В связи с этим следует применять открытые, защищенные или закрытые двигатели.

По форме исполнения двигателя в большинстве случаев применяют двигатели с горизонтальным валом с лапами для его крепления. Реже используют фланцевые двигатели, у которых на одном из щитов, где крепятся подшипники, имеется фланец для крепления к рабочей машине.

15.8. Нагревание и охлаждение двигателей

Нагревание электрических машин происходит за счет электрических потерь ΔP :

$$\Delta P = \frac{P}{\eta} - P,$$

где P – механическая мощность на валу;
 η – коэффициент полезного действия.

Допустимая электрическая нагрузка электродвигателя определяется допустимой температурой нагрева $T_{дон}$ наиболее чувствительного к температуре элемента – изоляции. Для изоляции класса А $T_{дон} = 105$ °С, В – 130 °С, Н – 180 °С. Чаще для двигателей нормируют превышение температуры двигателя T по отношению к температуре окружающей среды $T_{окр}$, которая принимается равной 35 °С: $T = T_{дон} - T_{окр}$.

Для приближенного анализа нагрева электродвигателя воспользуемся простейшей моделью нагрева однородного тела. За время dt температура двигателя увеличилась dT . При этом потери электрической энергии составили $\Delta P dt$. Часть этой энергии идет на нагрев тела cdT (c – теплоемкость двигателя), а часть энергии $kSTdt$ рассеивается в пространстве. Здесь k – коэффициент теплоотдачи, S – площадь поверхности тела. Уравнение нагрева модели электрического двигателя:

$$\Delta P dt = cdT + kSTdt \quad \text{или} \quad \frac{dT}{dt} + \frac{kS}{c} T = \frac{\Delta P}{c}.$$

Это линейное дифференциальное уравнение первого порядка имеет решение в виде

$$T = T_{уст} \left(1 - e^{-t/\tau} \right),$$

где установившаяся температура $T_{уст} = \frac{\Delta P}{kS}$ определяется из уравнения при $\frac{dT}{dt} = 0$, а постоянная времени нагрева $\tau = \frac{c}{kS}$.

Как показывает решение дифференциального уравнения, температура перегрева двигателя над окружающей средой нарастает по экспоненциальному закону и практически устанавливается постоянной за время $t = (3 - 5)\tau$.

Установившаяся температура тем меньше, чем меньше потери ΔP в двигателе, чем больше коэффициент теплоотдачи k и площадь поверхности двигателя S . Уменьшить потери в двигателе и повысить его КПД можно, если использовать высококачественную сталь или уменьшить воздушный зазор между статором и ротором. Коэффициент теплоотдачи увеличивают за счет искусственного охлаждения, например, с помощью вентилятора, посаженного на вал ротора. Для увеличения площади поверхности двигателя его статор делают ребристым.

Существуют таблицы предельных допустимых превышений температур различных частей электрических машин для различных классов изоляции. Например, обмотки электрических машин переменного тока допускают перегрев в 50 – 60 °С при изоляции класса А и 105 – 125 °С при изоляции класса Н.

15.9. Выбор мощности двигателя

Различают три основных режима работы электродвигателей: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Продолжительный режим S1 соответствует длительной неизменной во времени нагрузке, при которой температура двигателя достигает установившегося значения.

Кратковременный режим S2 характерен тем, что относительно небольшое время работы t_p , при котором температура двигателя не достигает установившегося значения, чередуется с остановкой, длительность которой t_0 достаточна для охлаждения двигателя до температуры окружающей среды. Для этого режима предусмотрены стандартные длительности периода:

$$T = t_p + t_0 = 10, 30, 60, 90 \text{ мин.}$$

Повторно-кратковременный режим S3 отличается от кратковременного тем, что период цикла не превышает 10 мин, и за это время двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды и нагреться до

установившегося значения. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100 \%,$$

стандартные значения которых составляют 15, 25, 40 и 60 %.

При выборе мощности двигателя для длительного режима, если мощность рабочего механизма $P_{рм}$ постоянна, то требуемая мощность двигателя

$$P_{\partial} = \frac{P_{рм}}{\eta_{рм}},$$

где $\eta_{рм}$ – кпд рабочего механизма.

Если мощность рабочего механизма за время цикла меняется, то определяют среднее значение мощности рабочего механизма $P'_{рм}$ и принимают мощность рабочего механизма с небольшим запасом $P_{рм} = (1,1-1,3)P'_{рм}$, а затем мощность самого двигателя $P_{\partial} = \frac{P_{эм}}{\eta_{рм}}$.

Требуемую мощность двигателя округляют в сторону больших значений до стандартной мощности. Для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии 4А шкала номинальных мощностей: 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400 кВт.

Если задана нагрузочная диаграмма рабочего механизма, то расчет несколько усложняется и выполняется методом средних потерь, который основан на сравнении мощности средних потерь за время цикла с мощностью потерь при номинальной нагрузке выбранного двигателя.

При повторно-кратковременном режиме определяется мощность двигателя $P'_{\partialв}$ как и для продолжительного режима за период работы t_p , затем определяется действительное значение ПВ. Если расчетное ПВ отличается от стандартного значения, то уточняют мощность двигателя $P_{\partialв}$, выбрав ближайшее стандартное значение $ПВ_0$ по формуле

$$P_{\partialв} = P'_{\partialв} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_0}}.$$

При выборе мощности двигателя, работающего в кратковременном режиме, определяющим фактором являются перегрузочная способность и пусковой момент. По этим показателям проверяется выбор двигателя и при работе в повторно-кратковременном режиме.

15.10. Системы регулируемого электропривода

15.10.1. Оценка качества регулирования

Электропривод служит для сообщения движения рабочему органу производственного механизма. Для правильного хода технологического процесса возникает необходимость регулирования скорости движения рабочего органа. Например, необходимо изменять частоту вращения шпинделя токарного станка в зависимости от диаметра обрабатываемой детали, характера обработки (черновое или чистовое точение), материала детали и резца и др.

Для оценки свойств регулируемого электропривода вводят ряд показателей. Основным из них является *диапазон регулирования*, который определяется отношением максимальной к минимальной частоте вращения двигателя:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}.$$

Верхний предел ω_{\max} ограничен или механической прочностью ротора или коммутационной способностью коллектора. Нижний предел при номинальной нагрузке соответствует такой частоте, при которой двойное увеличение нагрузки вызывает полную остановку двигателя. Нижний предел ограничивается необходимой точностью поддержания заданной частоты при возможных колебаниях момента нагрузки на валу двигателя. Очевидно, эта точность будет определяться *жесткостью* механической характеристики. Жесткую механическую характеристику можно получить с помощью замкнутой системы регулирования.

В *разомкнутой системе* регулирования частота вращения двигателя не корректируется, например, при изменении нагрузки или изменении сопротивлений обмоток при нагревании и т.д. Поэтому в таких системах точность поддержания заданной частоты и диапазон регулирования ограничен.

В *замкнутой системе* частоту вращения поддерживают в заданных пределах с помощью обратных связей ОС. При этом может быть достигнута высокая точность регулирования. Для поддержания частоты вращения двигателя с высокой степенью точности применяются: положительная ОС по току, отрицательная ОС по напряжению и отрицательная ОС по скорости. Принцип построения замкнутой системы регулирования показан на примере системы генератор-двигатель (система Г-Д).

Кроме того, важными показателями качества регулирования являются: плавность регулирования, экономичность, стабильность работы на заданной скорости и др.

15.10.2. Система генератор-двигатель

В этой системе двигатель постоянного тока M питается не от сети постоянного тока, а генератором G постоянного тока, напряжение, на зажимах которого регулируется в широких пределах изменением тока в обмотке возбуждения LG (рис. 15.16).

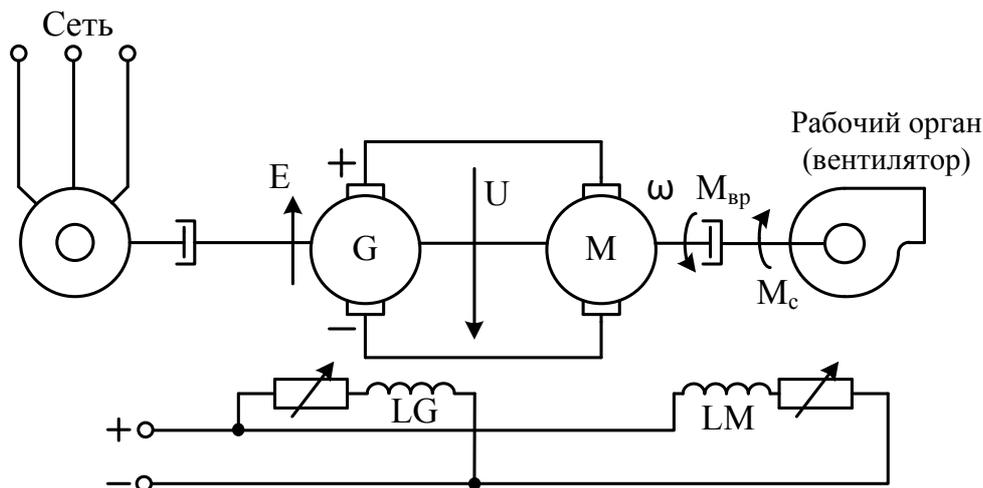


Рис. 15.16. Разомкнутая система Г-Д регулируемого электропривода

Частота вращения двигателя ω регулируется изменением напряжения U на его зажимах, которое в свою очередь регулируется магнитным потоком, создаваемым током в обмотке возбуждения LG .

Диапазон регулирования в системе Г-Д не превышает 5:1, но его можно расширить, если регулировать ток в обмотке возбуждения LM двигателя.

Основным недостатком системы Г-Д является трехкратное преобразование энергии. Асинхронный двигатель электрическую энергию сети преобразует в механическую, генератор G механическую энергию – в электрическую, а двигатель M электрическую энергию – вновь в механическую. В результате получается низкий КПД, высокая стоимость оборудования, а большое число электрических машин требует больших габаритов для их установки.

К преимуществам системы Г-Д относятся плавность регулирования в широких пределах и экономичность в тормозных режимах.

Для расширения диапазона регулирования при высокой точности необходимо увеличить жесткость механических характеристик электропривода. Эта задача решается в замкнутых системах регулирования (рис. 15.17).

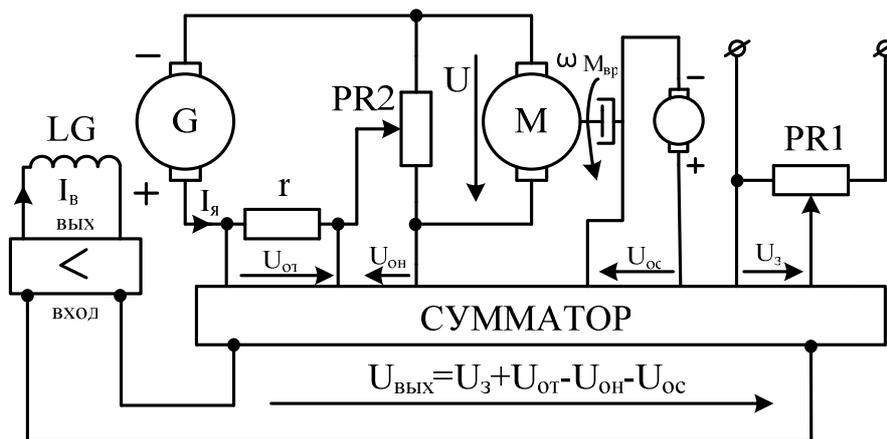


Рис. 15.17. Замкнутая система Г-Д

На упрощенной схеме не показан асинхронный двигатель, вращающий якорь генератора, обмотка возбуждения двигателя и рабочий орган исполнительного механизма.

Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется изменением напряжения U на его зажимах за счет изменения ЭДС генератора G с помощью регулировки тока I_g в цепи возбуждения генератора. Ток возбуждения изменяется в зависимости от выходного напряжения сумматора, которое подается на обмотку LG через усилитель. На вход сумматора подается задающее напряжение U_3 от потенциометра $RP1$, задающего частоту вращения двигателя. Кроме задающего напряжения на вход сумматора подаются еще три напряжения, осуществляющие обратные связи по току $U_{от}$, напряжению $U_{он}$ и скорости $U_{ос}$. Напряжение $U_{от}$, снимаемое с резистора r с небольшим сопротивлением, пропорционально току якоря $U_{от} = rI_я$ и совпадает по направлению с задающим напряжением, т.е. осуществляет положительную обратную связь по току. Напряжение $U_{он}$, снимаемого с потенциометра $RP2$, пропорционально напряжению U на якоре двигателя. По направлению оно противоположно задающему напряжению и осуществляет отрицательную обратную связь по напряжению. Напряжение $U_{ос}$, снимаемого с тахогенератора, пропорционально частоте вращения. Оно осуществляет отрицательную обратную связь по скорости.

Замкнутая система с обратными связями позволяет поддерживать заданную потенциометром $RP1$ скорость вращения даже при малых оборотах двигателя и тем самым значительно расширить диапазон регулирования.

Действительно, при увеличении нагрузки на валу двигателя скорость вращения падает, но это приведет к возрастанию тока якоря $I_я = \frac{U - E_я}{r_я}$, так как ЭДС якоря $E_я = k\Phi\omega$ уменьшается. Кроме того, снижается и на-

пряжение на зажимах якоря $U = E_{\text{я}} - r_{\text{я}} I_{\text{я}}$ за счет возрастания тока. В результате выходное напряжение сумматора $U_{\text{вых}} = U_{\text{з}} + U_{\text{от}} - U_{\text{он}} - U_{\text{ос}}$ возрастет и за счет увеличения $U_{\text{от}}$ и за счет уменьшения $U_{\text{он}}$ и $U_{\text{ос}}$. Это приведет к увеличению напряжения на обмотке возбуждения LG и соответственно току возбуждения. Увеличение магнитного потока в обмотке возбуждения генератора приводит к увеличению его ЭДС, следовательно, напряжение на зажимах якоря двигателя увеличивается, частота вращения двигателя возрастает почти до прежней величины.

Замкнутые системы регулирования широко используются в электроприводах, обеспечивая поддержание заданной скорости независимо от причин ее отклонения. Понятно, что в замкнутой системе регулирования некоторые типы обратных связей могут отсутствовать.

15.10.3. Система магнитный усилитель-двигатель МУ-Д

Принцип работы магнитного усилителя изложен в § 3.13. Регулирование частоты вращения приводного двигателя в системе МУ-Д осуществляется изменением напряжения на его зажимах. Для этого рабочую обмотку МУ включают последовательно с двигателем. Если увеличить ток в обмотке управления, магнитная система становится более насыщенной; индуктивность, индуктивное сопротивление и падение напряжения рабочей обмотки уменьшаются, что ведет к росту напряжения на двигателе и возрастанию частоты вращения. При уменьшении управляющего тока напряжение на двигателе падает, частота вращения уменьшается.

Таким образом, рабочая обмотка МУ играет роль балластного сопротивления, которое включается последовательно с двигателем, но в отличие от него в МУ регулируется не активное сопротивление, которое поглощает значительную часть электрической энергии, а реактивное, индуктивное сопротивление рабочей обмотки, активная мощность которой практически равна нулю.

Магнитный усилитель кроме основной обмотки управления может иметь несколько дополнительных обмоток управления для создания обратных связей по току, напряжению и скорости.

Система МУ-Д применяется в электроприводах мощностью до 10 кВт и обеспечивает регулирование угловой скорости в диапазоне 1:10.

Достоинствами привода с магнитным усилителем являются его высокая эксплуатационная надежность и высокий КПД. К недостаткам относятся его инерционность, ограниченное быстродействие.

15.10.4. Система электромашинный усилитель-двигатель ЭМУ-Д

ЭМУ представляет собой двухкаскадный генератор постоянного тока G , который приводится во вращение первичным двигателем (чаще всего асинхронным M). ЭМУ имеет две пары щеток, одна из которых закорочена, а с другой пары снимается напряжение, величина которого регулируется током в обмотке возбуждения i_y , являющейся обмоткой управления ОУ (рис. 15.18).

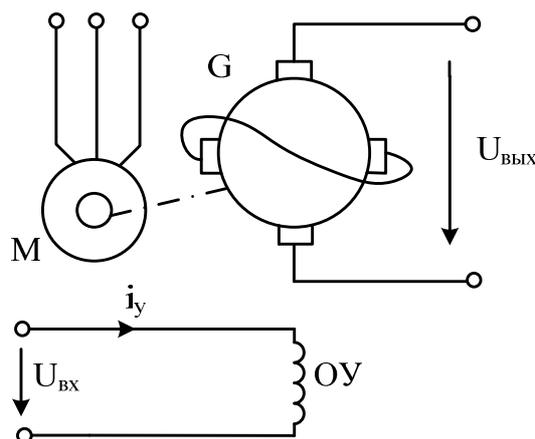


Рис. 15.18. Электромашинный усилитель

Коэффициент усиления ЭМУ по мощности может достигать 10 000. Обычно входная мощность не превышает 1 Вт и может быть легко получена, например, от электронных схем управления. Выходная мощность не превышает 11 кВт.

Как правило, ЭМУ имеет несколько обмоток управления для возможности управления выходной мощностью от различных физических факторов: момента нагрузки, скорости и т.д. Эти параметры с помощью датчиков преобразуются в изменение тока или напряжения и подаются на входы обмоток управления ЭМУ.

ЭМУ используются в качестве генераторов для исполнительных двигателей небольшой мощности, например, для двигателей привода подач в металлорежущих станках или в качестве возбуждателей для генераторов постоянного тока в мощных приводах, например, системы Г-Д.

В системах с ЭМУ используются все виды обратных связей, которые могут обеспечить диапазон регулирования до 2000:1. Благодаря высокому коэффициенту усиления ЭМУ позволяет управлять приводами большой мощности с помощью малогабаритной, дешевой и легкой аппаратуры при высоком быстродействии системы.

15.10.5. Система управляемый вентильный преобразователь-двигатель УВП-Д

Электрическая энергия генерируется и распределяется в основном в виде энергии переменного тока промышленной частоты. Поэтому для питания различных электродвигателей широкое применение получили УВП, которые не только преобразуют переменный ток в постоянный и обратно, но и регулируют величину напряжения.

В качестве управляемых вентилей широко используются тиристоры. На рис. 15.19 представлена силовая часть простейшей схемы тиристорного привода постоянного тока.

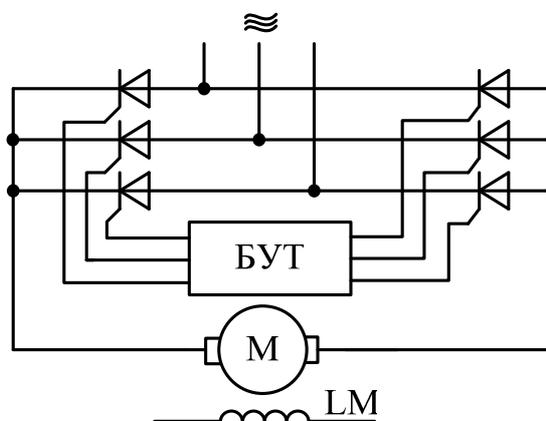


Рис. 15.19. Тиристорный привод постоянного тока

В этой схеме питание якоря двигателя постоянного тока осуществляется от сети трехфазного тока через выпрямитель, собранный на тиристорах по мостовой схеме. Величина выпрямленного напряжения регулируется изменением момента включения (отпирания) тиристоров с помощью блока управления тиристорами БУТ. Трехфазная сеть согласует фазы импульсов управления с анодным напряжением тиристоров.

В тиристорных приводах используют все виды обратных связей. Тиристорный привод отличается малыми габаритами, весом, относительно большим диапазоном регулирования, но сравнительно дорог.

12.10.6. Система импульсный регулятор напряжения-двигатель ИРН-Д

Регулирование напряжения на зажимах двигателя можно осуществить импульсным методом, когда двигатель периодически подключается к источнику питания и отключается от него. При этом в тот отрезок времени, когда двигатель подключен к источнику питания, происходит передача

энергии от источника к электроприводу, которая через вал двигателя передается производственному механизму, а часть ее запасается в виде кинетической энергии. В период отключения электропривод продолжает работать за счет запасенной энергии. Принцип системы ИРН-Д показан на рис. 15.20.

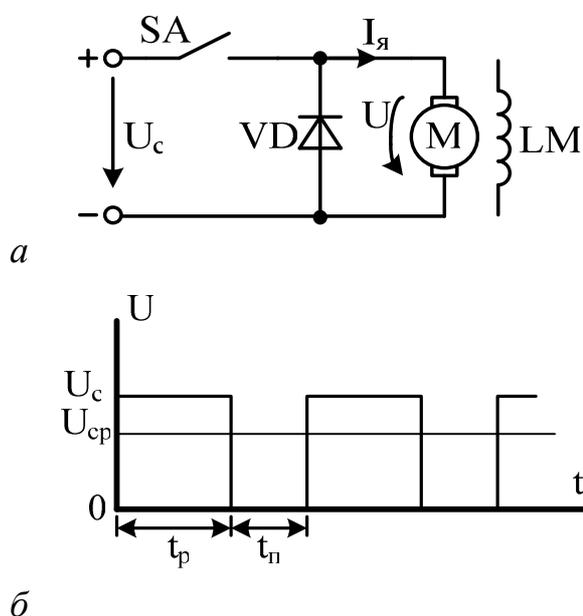


Рис. 15.20. Система импульсный регулятор напряжения-двигатель:
а – принципиальная схема, *б* – диаграмма напряжения на якоре двигателя

Диод VD, включенный параллельно двигателю, необходим для того, чтобы в период размыкания ключа SA ток якоря $I_{я}$, который из-за явления электромагнитной индукции не может мгновенно измениться до нуля, замыкается через диод. В противном случае на зажимах ключа S возникает высокое напряжение, вызывающее электрическую дугу и выход из строя ключа.

Отношение времени включенного состояния ключа t_p к периоду цикла

$$T = t_p + t_n,$$

где t_n – время паузы (ключ разомкнут), называется скважностью γ :

$$\gamma = \frac{t_p}{t_p + t_n}.$$

Таким образом, среднее напряжение U на двигателе и его частоту вращения можно регулировать скважностью γ различными способами. При широтно-импульсном регулировании (ШИР) период коммутации остается неизменным, а изменяется время замкнутого состояния ключа.

Понятно, что ключ S может быть выполнен только с помощью электронных приборов. При этом можно использовать либо транзистор в режиме ключа, либо ключ, выполненный на тиристорах. Широкое распространение получил транзисторный ключ, одна из схем которого показана на рис. 15.21.

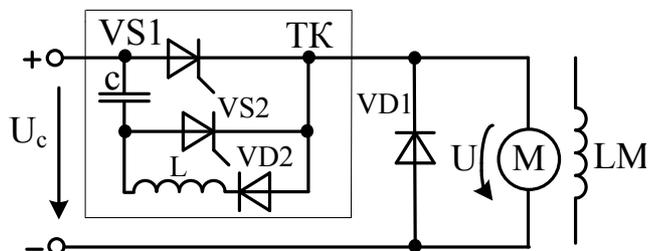


Рис. 15.21. Схема регулирования напряжения на двигателе с помощью тиристорного ключа (силовая часть)

Роль коммутирующего органа выполняет триодный тиристор $VS1$, который периодически включается и выключается с помощью блока управления (на схеме не показан) и схемы, состоящей из вспомогательного тиристора $VS2$, диода $VD2$ и колебательного контура LC .

Тиристорный ключ работает следующим образом. При подаче отпирающего импульса на тиристор $VS2$ конденсатор C заряжается от источника через $VS2$ и якорь двигателя с плюсом на верхней обкладке. В конце зарядки тиристор запирается. При подаче отпирающего импульса на управляющий электрод тиристора $VS1$ он включается, и все напряжение сети подается на обмотку якоря двигателя. При этом конденсатор C быстро разряжается через цепь $VS1$ - $VD2$ - L и даже перезаряжается благодаря колебательному контуру LC с плюсом на нижней обкладке конденсатора. Обратная перезарядка в контуре LC не происходит благодаря односторонней проводимости диода $VD2$. Чтобы закончить рабочий период t_p подается отпирающий импульс на $VS2$. В этот момент конденсатор C мгновенно разряжается через открытые тиристоры $VS2$ и $VS1$. Встречный разрядный ток запирает тиристор $VS1$, двигатель отключается от сети, а конденсатор C снова заряжается. Следующий отпирающий импульс, подаваемый на тиристор $VS1$, вновь подключает двигатель к источнику тока и процесс повторяется.

Система ИРН-Д отличается простотой реализации и надежностью в работе. К недостаткам следует отнести пульсации тока якоря, что приводит к дополнительному нагреву двигателя.

15.10.7. Система преобразователь частоты-двигатель ПЧ-Д

Применение частотного регулирования скорости вращения двигателя значительно расширяет возможности использования самого простого, надежного и дешевого асинхронного двигателя в различных электроприводах.

В этой системе питание асинхронных электродвигателей осуществляется не от общей сети напряжением U_c и частотой тока f_c , а от преобразователя частоты, на выходе которого при изменении частоты f_1 необходимо соответственно менять и напряжение U_1 (рис. 15.22, а).

Действительно, согласно формуле

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot k \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \equiv f \cdot \Phi_m,$$

если в процессе регулирования частоты f напряжение питания U_1 оставить неизменным, то при уменьшении частоты f магнитный поток Φ_m возрастет. Так как амплитудное значение магнитного потока выбирается на линейной части характеристики $\Phi_m = f(I_{1xx} w_1)$ вблизи участка насыщения, то переход рабочей точки в область насыщения связано с резким увеличением тока холостого хода I_{1xx} и перегреву двигателя. Кроме того, форма тока будет отлична от синусоиды, что также связано с дополнительными потерями.

Если частоту f увеличить, то при $U_1 = \text{const}$ магнитный поток двигателя уменьшится, и для создания прежнего вращающего момента двигатель будет потреблять больший ток, т.е. увеличивается токовая нагрузка при недоиспользованной магнитной системе, что также связано с дополнительными потерями в обмотках и перегреву двигателя.

Таким образом, для наилучшего использования асинхронного двигателя при регулировании частоты магнитный поток должен оставаться неизменным, а напряжение сети следует изменять пропорционально изменению частоты переменного тока. Поэтому преобразователь частоты состоит из трех основных узлов (рис. 15.22, б).

Преобразователь П1, представляющий собой управляемый выпрямитель (преобразует энергию переменного тока в электрическую энергию постоянного тока $f = 0$ и напряжения $U_0 = \text{var}$), преобразователь П2, представляющий собой инвертор (преобразует энергию постоянного тока в энергию переменного тока переменной частоты $f_1 = \text{var}$ и напряжения $U_1 = \text{var}$), и блок управления БУ с двумя каналами (служит для отдельного регулирования напряжения и частоты).

Изменение частоты источника питания позволяет регулировать скорость асинхронного двигателя как вниз от основной скорости в диапазоне

(15 – 20):1, так и вверх от основной скорости не более чем в 1,5 – 2 раза. Таким образом, частотное регулирование скорости позволяет осуществить регулирование скорости в диапазоне (20 – 30):1.

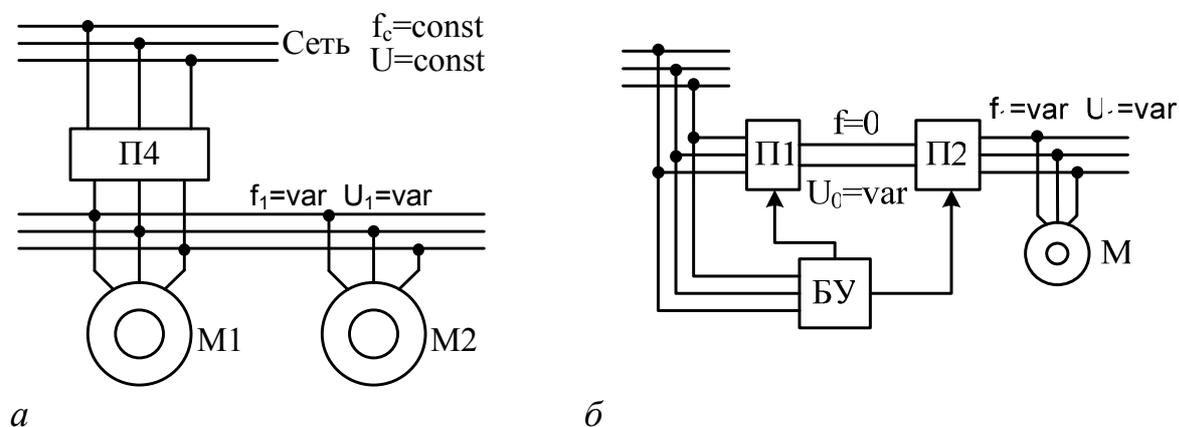


Рис. 15.22. Структурная схема системы преобразователь частоты-двигатель:
а – общая, б – развернутая

Регулирование скорости асинхронного двигателя путем изменения напряжения и частоты является наиболее интересным и перспективным способом регулирования, т.к. позволяет при плавном регулировании угловой скорости получить жесткие механические характеристики. К недостаткам способа следует отнести сложность по схемному исполнению и высокую стоимость преобразователя частоты.

Контрольные вопросы и задачи

Задача 1

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения должен приводить в движение рабочую машину с моментом сопротивления 5 Нм и угловой скоростью 800 об/мин. Известны паспортные данные двигателя $P_n = 1,5$ кВт, $U = 220$ В, $n_n = 1600$ об/мин., $I = 8$ А. Какое сопротивление необходимо включить в цепь якоря, чтобы обеспечить заданный режим?

Расчетные формулы: $P_n = \omega M$, где $\omega = \frac{\pi n}{30}$; $M = k\Phi I_a$; $E = k\Phi\omega$;

$$U = E - (r_a + r_{доб})I_a.$$

План решения

Вначале можно определить: номинальный момент на валу двигателя, произведение $k\Phi$, ЭДС в номинальном режиме и сопротивление обмотки

якоря. Затем для заданного режима определяют ток якоря, ЭДС и по закону Кирхгофа искомое сопротивление.

Решение:

1. Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_n = P_n / \omega_n = P_n / \pi n / 30 = 1500 / \pi \cdot 1800 / 30 = 1500 / 168 = 9,55 \text{ Нм};$$

2. Произведение $k\Phi = M_n / I_n = 9,55 / 8 = 1,19 \text{ Вс}$.

3. ЭДС обмотки якоря в номинальном режиме

$$E_n = k\Phi \omega_n = 1,19 \cdot 168 = 200 \text{ В}.$$

4. Сопротивление обмотки якоря:

$$r_{я} = (U - E_n) / I_n = (220 - 200) / 8 = 2,5 \text{ Ом}.$$

5. ЭДС обмотки якоря в заданном режиме:

$$E = k\Phi \omega = 1,19 \cdot 83,8 = 99,7 \text{ В},$$

$$\text{где } \omega = \pi \cdot n / 30 = 3,14 \cdot 800 / 30 = 83,8 \text{ рад/с}.$$

6. Ток якоря в заданном режиме:

$$I_{я} = M / k\Phi = 5 / 1,19 = 4,2 \text{ А}.$$

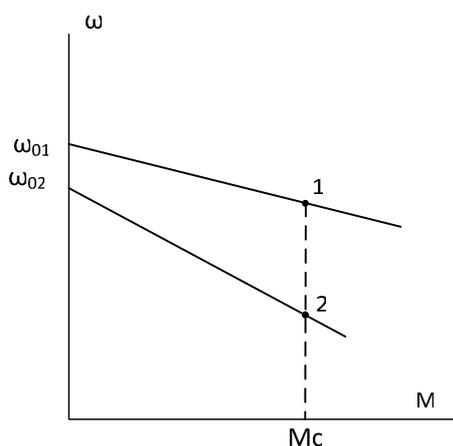
7. Сопротивление цепи якоря:

$$r_{я} + r_{доб.} = (U - E) / I_{я} = (220 - 99,7) / 4,2 = 28,6 \text{ Ом}.$$

8. Добавочное сопротивление:

$$r_{доб.} = (r_{я} + r_{доб.}) - r_{я} = 28,6 - 2,5 = 26,1 \text{ Ом}.$$

Задача 2



На рис. показаны механические характеристики двух различных двигателей постоянного тока, валы которых жестко и соосно соединены между собой. Какую угловую скорость будет развивать этот агрегат в режиме холостого хода и под нагрузкой M_c , если:

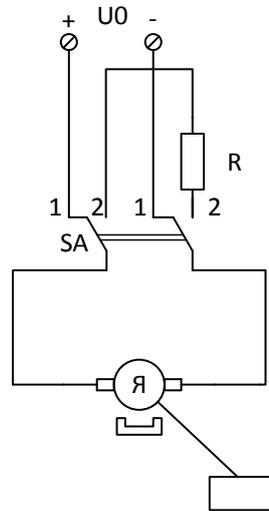
- а) включенные в отдельности, они развивают однонаправленный момент;
- б) включенные встречно?

Задачу решить графически и показать на механических характеристиках все четыре скорости.

Задача 3

Двигатель постоянного тока поднимает груз. Если переключателем SA отключить электродвигатель от сети и замкнуть обмотку якоря на сопротивление R , то под действием веса груз начнет опускаться. Как

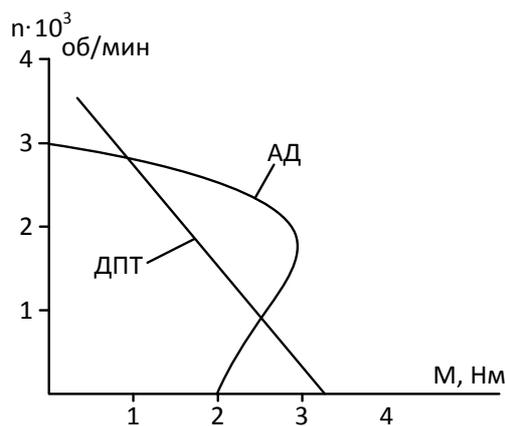
следует изменить сопротивление R , чтобы спуск груза происходил с возможно меньшей скоростью? Пояснить с помощью механических характеристик.



Задача 4

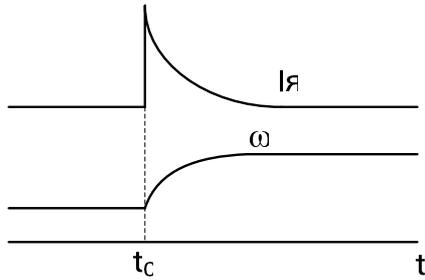
Механическая нагрузка, момент сопротивления которой равен 3 Нм, согласно приводится во вращение двигателем постоянного тока и асинхронным двигателем, жестко и соосно связанными одним валом.

Определить графически установившуюся скорость привода и объяснить режим работы каждого двигателя, если номинальная нагрузка составляет 1,5 Нм.



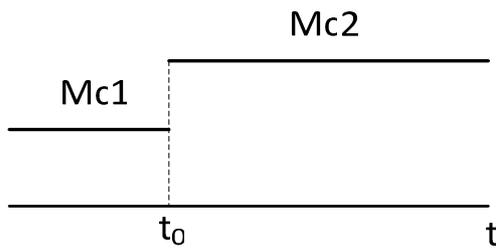
Задача 5

Почему механическая характеристика двигателя постоянного тока и асинхронного является «падающей», что казалось бы противоречит здравому смыслу, т.е. с увеличением электромагнитного вращающего момента скорость двигателя не увеличивается, а уменьшается?



Задача 6

По графику тока и частоты вращения двигателя объяснить, какие изменения произошли в схеме питания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в момент времени t_0 .



Задача 7

Как будут изменяться ток якоря и частота вращения двигателя постоянного тока параллельного возбуждения в новом установившемся режиме, если в момент времени t_0 скачкообразно увеличили момент сопротивления на его валу? Показать график переходного процесса этих параметров.

Задача 8

Почему при уменьшении магнитного потока двигателя постоянного тока параллельного возбуждения частота вращения может увеличиться, уменьшиться или даже остаться неизменной? Объяснить с помощью механической характеристики.

Задача 9

Какие изменения произошли в схеме питания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (назвать четыре возможные причины), если уменьшилась частота вращения?

Задача 10

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения при номинальном токе 10 А развивает угловую скорость $n_n = 1000$ об/мин. Если последовательно с его сопротивлением $(r_{\text{я}} + r_{\text{б}}) = 2$ Ом включить добавочное сопротивление 4 Ом, то при номинальной нагрузке он вращается с частотой 800 об/мин. Определить величину добавочного сопротивления, чтобы при номинальном моменте на валу двигатель вращался с частотой 600 об/мин? С какой частотой он будет вращаться при этом добавочном сопротивлении, если снизить механическую нагрузку, при которой амперметр показал 5 А?

Ответ: 3 Ом, 1700 об/мин.

План решения

Если записать уравнение электромеханической характеристики $\eta = \frac{U - (r_{\text{я}} + r_{\text{с}} + r_{\text{дооб}})I_{\text{я}}}{c\Phi}$ и подставить числовые значения двух режимов, соответствующих $r_{\text{дооб}} = 0$ и $r_{\text{дооб}} = 4$ Ом, то решая два уравнения с двумя неизвестными можно определить U и $c\Phi$. Составляя третье уравнение для режима $n = 600$ об/мин., определяют $r_{\text{дооб}} = 8$ Ом.

При уменьшении нагрузки и соответственно тока в 2 раза легко определить частоту вращения двигателя, если учесть, что $c\Phi$ также уменьшится в 2 раза, поскольку магнитный поток Φ пропорционален току в обмотке возбуждения.

Задача 11

Определить пусковое сопротивление для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, при котором пусковой ток $I_n = 2,5 \cdot I_n$, и также определить пусковой момент. Паспортные данные двигателя: $P_n = 0,95$ кВт, $U_n = 220$ В, $\eta = 900$ об/мин, $I_n = 5$ А.

Общее сопротивление обмотки якоря и обмотки возбуждения $r_{\text{я}} + r_{\text{в}} = 8$ Ом. Зависимость магнитного потока от тока якоря изображена на рис.

Ответ: 9,6 Ом; 37,8 Нм.

План решения

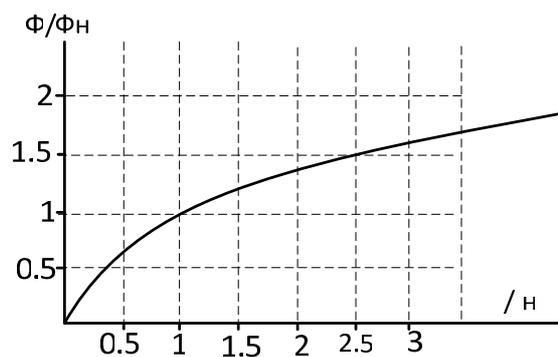
Пусковое сопротивление можно определить из формулы

$$I_{\text{пуск}} = U / (r_{\text{я}} + r_{\text{в}}) = 2,5 I_n.$$

Затем определяют номинальный момент $M_n = P_n / \omega_n$ и величину $k\Phi_n = M_n / I_n$.

При пуске магнитный поток $\Phi_{\text{пуск}} = 1,5 \cdot \Phi_n$ (по графику) и пусковой момент

$$M_{\text{пуск}} = k\Phi_{\text{пуск}} I_{\text{пуск}}, \quad I_{\text{пуск}} = k\Phi_n I_{\text{пуск}}.$$



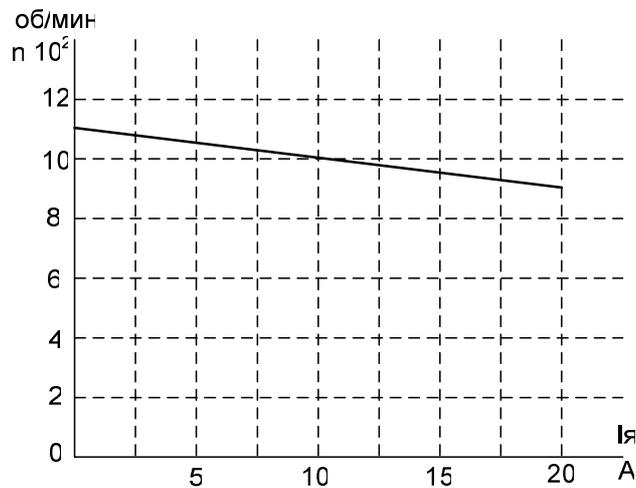
Задача 12

Определить пусковое сопротивление $r_{\text{пуск}}$ для ограничения пускового тока до 20 А двигателя постоянного тока независимого возбуждения, естественная электромеханическая характеристика которого показана на рис. Сопротивление обмотки якоря $r_{\text{я}} = 1$ Ом.

Ответ: 4,5 Ом.

Дополнительная задача

Определить ток в ОЯ в первый момент при изменении полярности источника питания в двух случаях: 1) без включения $r_{\text{доб}}$ в цепь якоря; 2) с включением $r_{\text{доб}} = 4,5$ Ом в цепь якоря.



План решения

Записать уравнение естественной электромеханической характеристики $n = \frac{1}{c\Phi}(U - r_{\text{я}}I_{\text{я}})$ для двух режимов, например, $I_{\text{я}} = 0$ (холостой ход) и режим, соответствующий $I_{\text{я}} = 10$ А. Получится два уравнения с двумя неизвестными: U и $c\Phi$. Определив напряжение сети U , находят пусковое сопротивление по закону Ома $I_{\text{я пуск}} = U/(r_{\text{я}} + r_{\text{пуск}})$.

$$U = 110 \text{ В}, c\Phi = 0,1, r_{\text{пуск}} = \frac{U}{I_{\text{я}}} - r_{\text{я}} = \frac{110}{20} - 1 = 4,5 \text{ Ом.}$$

Определим длину нихромовой проволоки сечением 1мм^2 для получения этого сопротивления: $l = \frac{r_{\text{пуск}}S}{\rho} = \frac{4,5 \cdot 1}{1,1} = 4,1 \text{ м.}$

Задача 13

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения в режиме холостого хода вращается с чистотой 1500 об/мин, а в номинальном режи-

ме, поднимая груз, – 1400 об/мин. Какое сопротивление необходимо включить в цепь якоря, чтобы: а) прекратился подъем груза и двигатель остановился; б) двигатель перешел на тормозной режим и груз опускался бы при частоте вращения 200 об/мин. Сопротивление ОЯ $r_{я} = 1$ Ом.

Ответ: 14 Ом; 16 Ом.

План решения

Записать уравнение электромеханической характеристики $n = n_0 - \frac{(r_{я} + r_{доб})I_{я}}{сФ}$, подставить в него числовые значения 2-х режимов (номинального без $r_{доб}$ и режима, при котором $n = 0$) и по двум уравнениям определить две неизвестные величины – $I_{я}/сФ$ и $r_{я} + r_{доб}$. Аналогично определяют сопротивление, при котором двигатель работает в тормозном режиме при спуске груза. При $n = 1400$ и $r_{доб} = 0$ $I_{я}/сФ = 100$, при $n = 0$ и $(1 + r_{доб}) = 15$ $r_{доб} = 14$ Ом, при $n = -200$ и $(1 + r_{доб}) = 17$ $r_{доб} = 16$ Ом.

Задача 14

Какую частоту вращения развивает двигатель постоянного тока смешанного возбуждения, номинальное напряжение и ток которого соответственно равны 220 В и 5 А с добавочным сопротивлением 6 Ом в цепи якоря при токовой нагрузке 2,5 А? Суммарное сопротивление обмотки якоря и последовательной обмотки возбуждения 2 Ом. Естественная электромеханическая характеристика двигателя показана на рисунке. Какую часть магнитного потока создает параллельная и последовательная обмотки возбуждения в номинальном режиме? Определить момент и мощность на валу двигателя в номинальном режиме.

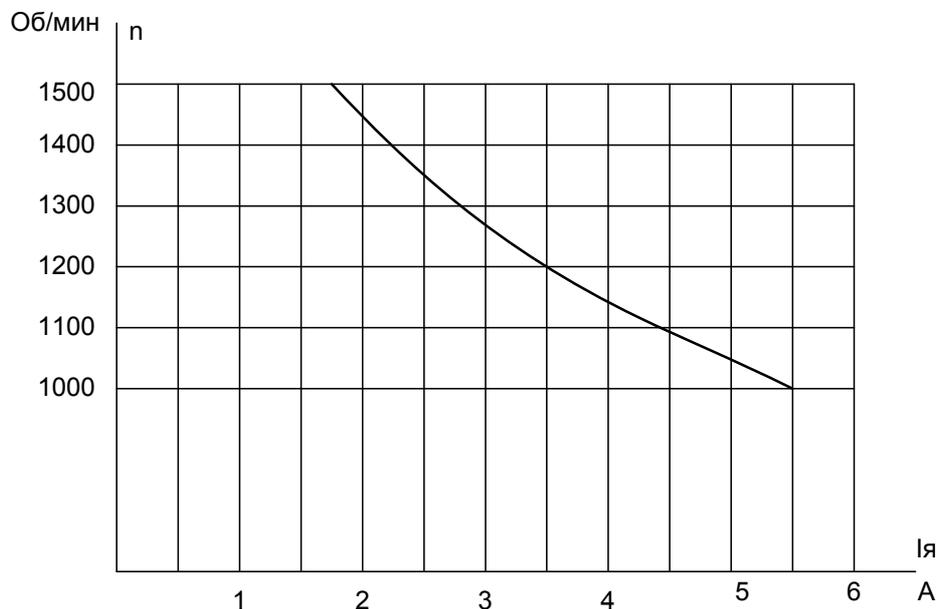
Ответ: 1258 об/мин; 0,59; 0,41; 9,55 Нм; 1050 Вт.

План решения

По естественной электромеханической характеристике $n = \frac{U - (r_{я} + r_{bc})I_{я}}{сФ_n}$ можно определить $сФ_n$ в номинальном режиме и $сФ$ в режиме, соответствующему току 2,5 А. Такое же $сФ$ будет иметь место и при включении добавочного сопротивления. Следовательно, по искусственной электромеханической характеристике можно определить частоту вращения двигателя.

Общий магнитный поток складывается из потока Φ_1 , создаваемого параллельной обмоткой возбуждения (он не зависит от нагрузки) и пото-

ком последовательной обмотки возбуждения (он пропорционален току нагрузки), т.е. $c\Phi = c_1\Phi_1 + c_2I_{ян}$ и $c\Phi = c_1\Phi_1 + c_2I_я$ (в нашем примере $I_я = 0,5I_{ян}$).



Решая два уравнения с двумя неизвестными, определяют $c_1\Phi_1$ и $c_2I_{ян}$. Следовательно, параллельная обмотка возбуждения создает $c_1\Phi_1 / c_1\Phi_n$ часть магнитного потока, а остальную часть $c_2 I_{ян} / c_1\Phi_n$ создает последовательная обмотка возбуждения в номинальном режиме. При любой другой нагрузке $I_я < I_{ян}$ последовательная обмотка возбуждения будет играть меньшую роль в создании магнитного потока.

Чтобы определить момент на валу двигателя в номинальном режиме $M_n = \kappa\Phi_n I_n$, необходимо определить $\kappa\Phi_n$ по электромеханической характеристике, в которой ω_n необходимо измерять в рад/с. Номинальная мощность $P_n = \omega_n M_n$.

Задача 15

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения П 31 имеет следующие номинальные данные: $P_n = 1,5$ кВт, $I_n = 8,7$ А, $r_я = 2,45$ Ом, сопротивления последовательной и параллельной обмоток возбуждения соответственно $r_a = 0,212$ Ом, $r_b = 470$ Ом.

Определить общие потери в двигателе и в отдельности потери в цепи возбуждения, якоря и механические. Определить сопротивление регулирующего реостата в цепи возбуждения, позволяющее повысить частоту

вращения двигателя в два раза. Как следует уменьшить момент нагрузки, чтобы при ослаблении магнитного потока ток якоря не превышал номинального значения? Кривая намагничивания для двигателя в относительных единицах показана на рис.

Решение:

1. Номинальный ток в цепи возбуждения:

$$I_{вн} = U / r_{\text{в}} = 220 / 470 = 0,47 \text{ А.}$$

2. Номинальный ток обмотки якоря:

$$I_{ян} = I_{\text{н}} - I_{вн} = 8,7 - 0,47 = 8,23 \text{ А.}$$

3. Потери мощности в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{\text{в}} = r_{\text{в}} I_{вн}^2 = 470 \cdot 0,47^2 = 103 \text{ Вт.}$$

4. Потери мощности в цепи якоря:

$$\Delta P_{\text{я}} = r_{\text{ця}} I_{ян}^2 = 2,662 \cdot 8,23^2 = 180 \text{ Вт,}$$

где сопротивление цепи якоря $r_{\text{ця}} = r_{\text{я}} + r_{\text{д}} = 2,45 + 0,212 = 2,662 \text{ Ом.}$

5. Электрическая мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме:

$$P_{\text{эн}} = UI_{\text{н}} = 220 \cdot 8,7 = 1914 \text{ Вт.}$$

6. Общие потери в двигателе в номинальном режиме:

$$\Delta P = P_{\text{эн}} - P_{\text{н}} = 1914 - 1500 = 414 \text{ Вт.}$$

7. Механические потери в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P - \Delta P_{\text{в}} - \Delta P_{\text{я}} = 414 - 103 - 180 = 131 \text{ Вт.}$$

8. Электродвижущая сила якоря в номинальном режиме:

$$E_{\text{н}} = U - r_{\text{ця}} I_{ян} = 220 - 2,662 \cdot 8,23 = 198,1 \text{ В.}$$

9. Номинальная частота вращения якоря:

$$\omega_{\text{н}} = \pi n_{\text{н}} / 30 = 3,14 \cdot 1500 / 30 = 157 \text{ с}^{-1}.$$

10. Произведение конструктивной постоянной двигателя на номинальный магнитный поток:

$$k\Phi_{\text{н}} = E_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 198,1 / 157 = 1,26 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

11. Механический момент двигателя в номинальном режиме:

$$M_{\text{мн}} = k\Phi_{\text{н}} \cdot I_{ян} = 1,26 \cdot 8,23 = 10,37 \text{ Нм.}$$

12. Момент на валу двигателя в номинальном режиме:

$$M_{\text{н}} = P_{\text{н}} / \omega_{\text{н}} = 1500 / 157 = 9,554 \text{ Нм.}$$

13. Момент трения в номинальном режиме, обусловленный механическими потерями:

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{мн}} - M_{\text{н}} = 10,37 - 9,554 = 0,816 \text{ Нм.}$$

14. Если момент на валу, а, следовательно, механический момент должен оставаться неизменным, а частоту вращения необходимо увеличить в два раза $\omega = 2\omega_n = 2 \cdot 157 = 314$ фад/с, то требуемое при этом произведение $\kappa\Phi$ можно определить по механической характеристике двигателя $\omega = U / \kappa\Phi - r_{ц\grave{a}} M_{мн} / (\kappa\Phi)^2$ ($314 = 220 / \kappa\Phi - 2,662 \cdot 10,37 / (\kappa\Phi)^2$). Решая квадратное уравнение, получим, что

$$\kappa\Phi_1 = 0,5365 \text{ В} \cdot \text{с} \text{ и } \kappa\Phi_2 = 0,164 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

15. Магнитный поток $\kappa\Phi_1$ составляет $\kappa\Phi_1 / \kappa\Phi_n = 0,5365 / 1,26 = 0,426$ части номинального магнитного потока. По универсальной кривой намагничивания определяем требуемый при этом ток возбуждения:

$$I_{\epsilon} = 0,21 I_{\epsilon н} = 0,21 \cdot 0,47 = 0,1 \text{ А}.$$

16. Регулировочное сопротивление в цепи возбуждения:

$$r_{рег} = U / I_{\epsilon} - r_{\epsilon} = 220 / 0,1 - 470 = 1730 \text{ Ом}.$$

17. Ток якоря при ослабленном магнитном потоке по электромеханической характеристике:

$$I_{я} = (U - \omega \cdot \kappa\Phi) / r_{ц\grave{a}} = (220 - 314 \cdot 0,5365) / 2,662 = 19,36 \text{ А}.$$

Таким образом, для повышения скорости двигателя до 3000 об/мин при сохранении при этом номинальной механической нагрузки необходимо ослабить магнитный поток в $\kappa\Phi_n / \kappa\Phi_1 = 1,26 / 0,5365 = 2,35$ раз за счет введения в цепь возбуждения регулировочного реостата. Но при этом резко возрастает ток якоря (в $I_{я} / I_{я н} = 19,36 / 8,23 = 2,35$ раз), что вызовет перегрев двигателя, что опасно для целостности его изоляции.

18. Чтобы двигатель не перегревался, потребляемый ток якоря не должен превышать номинальное значение. При этом механический момент двигателя должен быть равен:

$$M_m = \kappa\Phi_1 I_{я н} = 0,5365 \cdot 8,23 = 4,416 \text{ Нм}.$$

19. Момент на валу двигателя:

$$M = M_m - M_{ТР} = 4,416 - 0,816 = 3,6 \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ что составляет}$$

$$M / M_m = 3,6 / 9,554 = 0,377 \text{ номинального момента,}$$

т.е. момент нагрузки следует уменьшить в 2,65 раза.

20. Мощность на валу двигателя также уменьшится:

$$P = \omega M = 314 \cdot 3,6 = 1131 \text{ Вт},$$

что в $P_n / P = 1500 / 1131 = 1,34$ раза меньше номинального значения.

Задача 16

На сколько процентов по мощности загружен асинхронный двигатель, потребляющий ток $I = 2,4$ А. Паспортные данные двигателя:

$P_n = 1,1$ кВт; $n_n = 1400$ об / мин; $\cos \varphi_n = 0,8$; Δ / Y 220 / 380 В. Напряжение сети $U = 380$ В. Зависимость кпд двигателя от мощности на валу определяется эмпирической формулой

$$\eta = \sqrt{0,6P / P_n}.$$

План решения

Вначале определяют номинальный ток двигателя и его реактивную составляющую $I_n \cdot \sin \varphi_n$. Реактивная составляющая практически не изменяется с изменением нагрузки. Поэтому можно определить активную составляющую реальной нагрузки:

$$I \cos \varphi = \sqrt{I^2 - (I_n \sin \varphi)^2}.$$

Реальную мощность на валу определяют по формуле

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \cdot \eta$$

Решение:

1. Номинальный ток электродвигателя:

$$I_n = P_n / \sqrt{3} \cdot U \cos \varphi_n \cdot \eta_n = 1100 / \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8 \cdot 0,775 = 2,7 \text{ А},$$

где $\eta_n = \sqrt{0,6P_n / P_n} = 0,775$.

2. Реактивная составляющая номинального тока:

$$I_n \sin \varphi = I_n \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 2,7 \sqrt{1 - 0,8^2} = 1,62 \text{ А}.$$

3. Активная составляющая реального тока:

$$I \cos \varphi = \sqrt{I^2 - (I_n \sin \varphi)^2} = \sqrt{2,4^2 - 1,62^2} = 1,77 \text{ А}.$$

4. Реальная мощность на валу двигателя:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \cdot \eta = \sqrt{3}UI \cos \varphi \cdot \sqrt{0,6P / P_n} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 1,77 \cdot \sqrt{0,6P / 1100}.$$

Решая данное уравнение, получим: $P = 740$ Вт.

5. Коэффициент загрузки двигателя:

$$K_3 = P / P_n = 740 / 1100 = 0,673.$$

Двигатель загружен на 67,3 %.

Задача 17

Определить момент нагрузки, мощность на валу асинхронного двигателя и потребляемый ток, если частота вращения его $n = 1455$ об/мин. Паспортные данные двигателя:

$$P_n = 1,1 \text{ кВт}; n_n = 1425 \text{ об / мин}; \cos \varphi_n = 0,8;$$

$$\text{напряжение } \Delta / Y \text{ 220 / 380 В}; M_{\text{макс}} / M_{\text{ном}} = 2,0.$$

Зависимость КПД от мощности на валу двигателя определяется эмпирической формулой

$$\eta = \sqrt{P / 1,5 \cdot P_n}.$$

Напряжение сети 380 В.

Ответ: 4,62 Н·м, 704 Вт, 2,25 А.

План решения

Вначале необходимо определить номинальное, реальное и критическое скольжения, номинальный и максимальный моменты, а затем по формуле Клосса определить реальный момент нагрузки и по нему мощность на валу двигателя.

Затем определяют номинальный ток, потребляемый двигателем, из формулы $P_n = \sqrt{3}UI_n \cos \varphi_n \cdot \eta_n$, его реактивную составляющую $I \sin \varphi$ реального тока. При этом P и η должны соответствовать реальному режиму. Реактивная составляющая реального тока практически не изменяется и равна ранее найденной реактивной составляющей номинального тока. Тогда реальный ток можно определить по теореме Пифагора, складывая геометрически его активную и реактивную составляющие.

Решение

1. Номинальное скольжение:

$$S_n = (n_0 - n_n) / n_0 = (1500 - 1425) / 1500 = 0,05.$$

2. Скольжение при реальной нагрузке:

$$S = (n_0 - n) / n_0 = (1500 - 1455) / 1500 = 0,03.$$

3. Критическое скольжение:

$$S_{кр} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,05(2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,1866,$$

где $\lambda = M_{макс} / M_{ном} = 2$ – перегрузочная способность асинхронного двигателя.

4. Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_n = 1100 / 149 = 7,37 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\omega_n = \pi \cdot n_n / 30 = 3,14 \cdot 1425 / 30 = 149 \text{ рад/с}$.

5. Максимальный момент электродвигателя:

$$M_{макс} = \lambda M_{ном} = 2 \cdot 7,37 = 14,74 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Момент, развиваемый двигателем при реальной нагрузке:

$$M = \frac{2M_{макс}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S} = \frac{2 \cdot 14,74}{0,03 / 0,1866 + 0,1866 / 0,03} = 4,62 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Мощность на валу при реальной нагрузке:

$$P = \omega M = \pi \cdot n \cdot M / 30 = 3,14 \cdot 1455 \cdot 4,62 / 30 = 704 \text{ Вт.}$$

8. Коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме:

$$\eta_n = \sqrt{P_n / 1,5P_n} = \sqrt{1100 / 1,5 \cdot 1100} = 0,8165.$$

9. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме:

$$I_n = P_n / \sqrt{3}U \cos \varphi_n \cdot \eta_n = 1100 / \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8 \cdot 0,8165 = 2,56 \text{ А.}$$

10. Реактивная составляющая тока номинального режима:

$$I_p = I_n \sin \varphi = I_n \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} = 2,56 \sqrt{1 - 0,8^2} = 1,535 \text{ А.}$$

11. Коэффициент полезного действия двигателя при реальной нагрузке:

$$\eta = \sqrt{P / 1,5P_n} = \sqrt{704 / 1,5 \cdot 1100} = 0,653.$$

12. Активная составляющая тока при реальной нагрузке:

$$I_a = I \cos \varphi = P / \sqrt{3}U \cdot \eta = 704 / \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,653 = 1,638 \text{ А.}$$

13. Так как реактивная составляющая тока практически не зависит от нагрузки, то реальный ток, потребляемый двигателем:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{1,638^2 + 1,535^2} = 2,25 \text{ А.}$$

Следует обратить внимание на то, что хотя двигатель загружен всего на 64 % ($K_3 = P/P_n = 704/1100 = 0,64$), ток, потребляемый двигателем, уменьшился только на 12 % ($(I_n - I) = (2,56 - 2,25) / 2,56 = 0,12$) по отношению к номинальному. Это объясняется тем, что двигатель потребляет значительный реактивный ток, практически равный току холостого хода, что влечет за собой и уменьшение коэффициента мощности и кпд. Реактивный ток можно уменьшить, например, за счет использования высококачественной стали или уменьшением воздушного зазора, что не всегда возможно технически.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ЭЛЕКТРОНИКЕ

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами выпрямителей однофазного переменного напряжения, а также сглаживающих фильтров.

Основные теоретические положения

Выпрямителем называется устройство, преобразующее любое переменное напряжение (синусоидальное или несинусоидальное) в постоянное (выпрямленное) напряжение, а среднее значение (постоянная составляющая) этого напряжения используется потребителем постоянного тока.

Наличие переменных составляющих (пульсаций) в результате преобразования неизбежно. Различными мерами пульсации могут быть уменьшены до сколь угодно малых значений. Одним из способов уменьшения пульсаций является применение фильтров выпрямленного напряжения, которые подключаются между выходом выпрямителя и нагрузкой. Дальнейшее улучшение качества преобразования может осуществляться в схеме стабилизатора напряжения. Рассматриваемые в работе схемы выпрямителей и фильтров служат основой построения большинства источников питания, подключаемых к однофазным силовым электрическим сетям, и используемых в самых различных областях техники. Они обеспечивают постоянным напряжением питания электромашинные приводы механизмов, технологические процессы, электронные устройства. Знание свойств источников питания необходимо инженеру для грамотной их эксплуатации.

Устройство и принцип действия однофазных и трехфазных схем выпрямления переменного напряжения и схем сглаживающих фильтров приведены в данном УМК, раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 58 – 80. с.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-1А/1 предназначен для исследования схем однофазных выпрямителей и различных схем сглаживающих фильтров. Этот стенд позволяет провести исследование следующих схем выпрямления:

- схема однополупериодного выпрямителя (панель 1);
- схема двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой (панель 2);
- схема двухполупериодного мостового выпрямителя (панель 3);
- схема выпрямителя с удвоением напряжения (панель 4).

К каждой из перечисленных схем выпрямления могут быть подключены различные сглаживающие фильтры типов С, RC (панель 5) или LC (панель 6).

Необходимая схема собирается путем установки на лицевой панели стенда соответствующих съемных панелей и переводом тумблеров SA2 – SA7 в требуемое положение.

Для выполнения измерений на лицевой панели стенда размещены два вольтметра и миллиамперметр магнитоэлектрической системы. Характерные контрольные точки исследуемых схем выведены на лицевую панель с помощью контактных гнезд.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикатор «Вкл» – для контроля включения;
- тумблер SA2 – для последовательного включения диодов однополупериодного выпрямителя при исследовании влияния внутреннего сопротивления диода на характеристики выпрямителя;
- тумблер SA3 – для подключения различных конденсаторов емкостного фильтра;
- тумблер SA4 – для подключения активной нагрузки к различным схемам выпрямления;
- тумблер SA6 – для подключения различных емкостей в фильтрах RC или LC типа;
- ручка R_H – для изменения активного сопротивления нагрузки;
- ручка R_ϕ – для изменения активного сопротивления в RC-фильтре;
- гнезда 1 – 20 – для измерения напряжений и просмотра осциллограмм в характерных точках исследуемых схем;

- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на вторичной обмотке трансформатора;
- вольтметр PV2 – для измерения напряжения в характерных точках схемы;
- миллиамперметр РА – для измерения величины среднего выпрямленного тока.

Питание стенда осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В с помощью специального шнура с вилкой.

Вид съемных панелей для различных схем выпрямителей и фильтров приведен на рис. 1.1 – рис. 1.6.

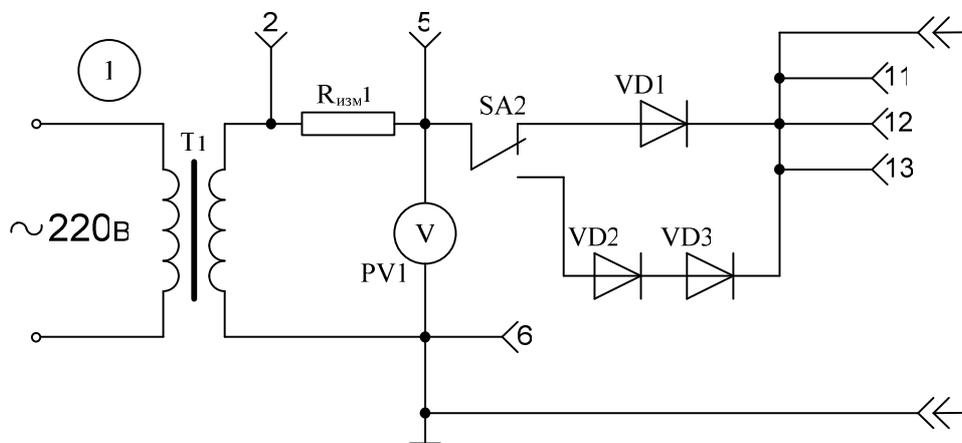


Рис. 1.1. Схема исследования однополупериодного выпрямителя (панель 1)

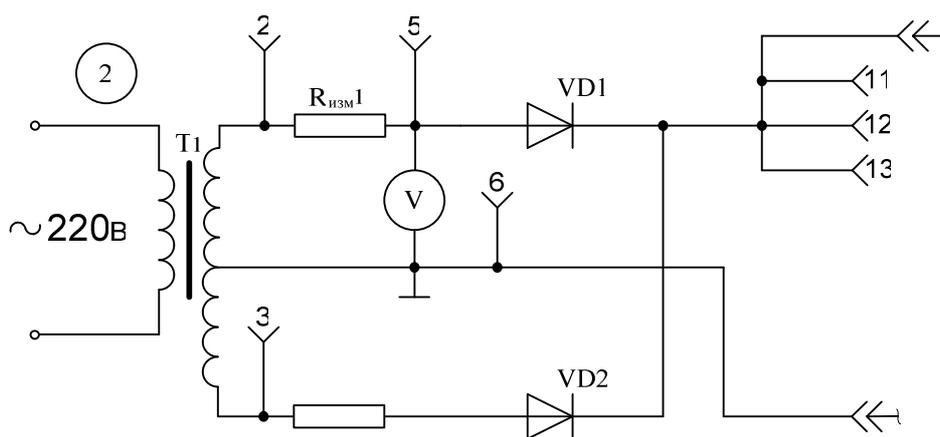


Рис. 1.2. Схема исследования двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой (панель 2)

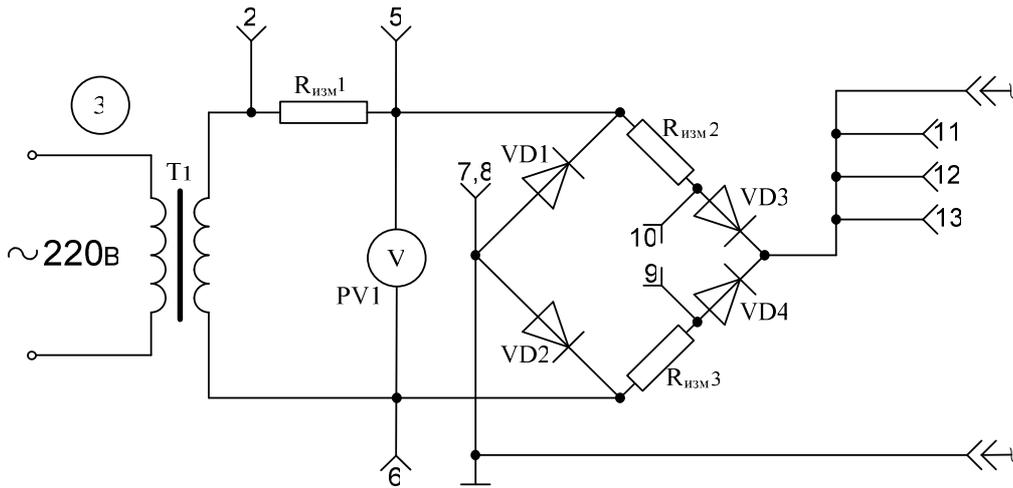


Рис. 1.3. Схема исследования двухполупериодного мостового выпрямителя (панель 3)

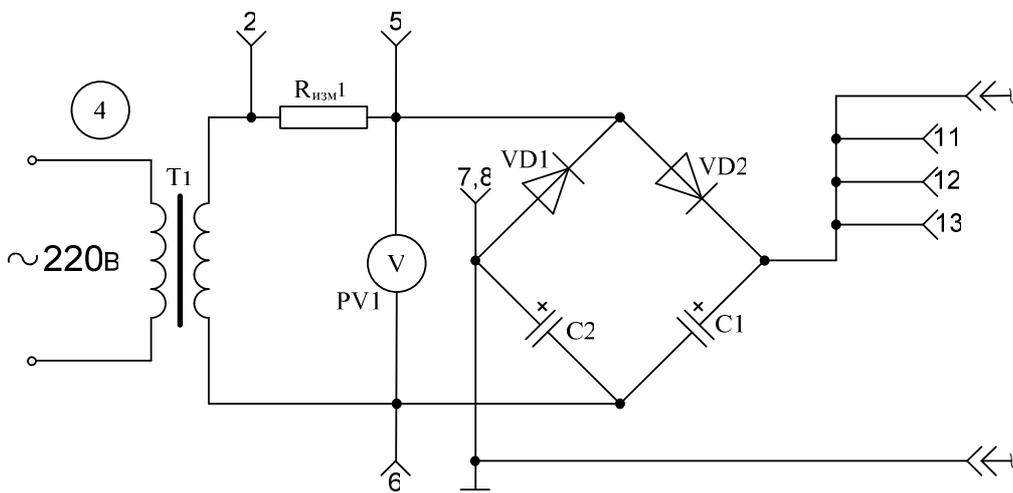


Рис. 1.4. Схема исследования выпрямителя с удвоением напряжения (панель 4)

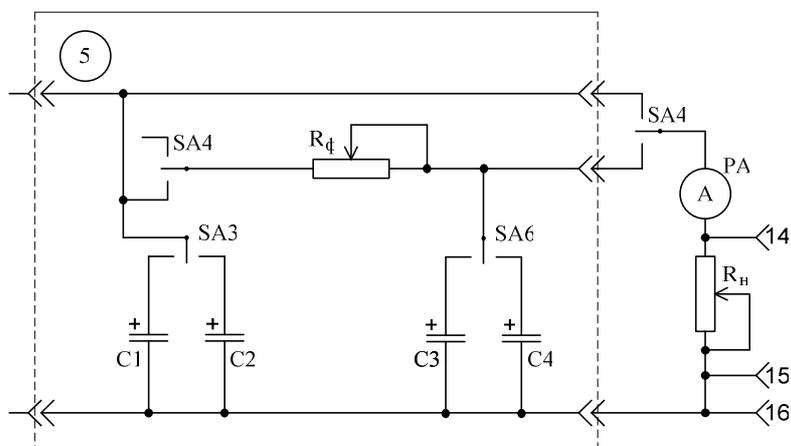


Рис. 1.5. Схема исследования сглаживающих фильтров С и RC типа (панель 5)

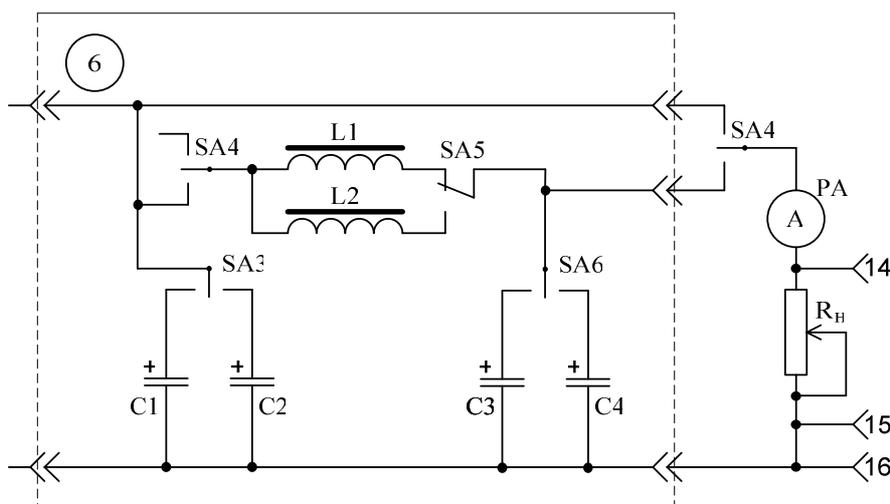


Рис. 1.6. Схема исследования сглаживающих фильтров С и LC типа (панель б)

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомьтесь со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя (сглаживающий фильтр отключен) экспериментально снять внешнюю характеристику выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$. Измерения занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

$U_{HCP}, В$							
$I_{HCP}, мА$	0						

2.4. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя в режиме холостого хода (сглаживающий фильтр и нагрузка R_H отключены) вычислить значение коэффициентов $K_1 = U_{HCP}/U_{2m}$ и $K_2 = U_{HCP}/U_2$, где U_{2m} – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора, т.е. на входе выпрямителя, а U_2 – действующее значение того же напряжения.

2.5. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя с подключенной заданной схемой сглаживающего фильтра экспериментально снять внешнюю характеристику выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$. Измерения занести в табл. 1.2 (форма – см. табл. 1.1).

2.6. Построить графики внешних характеристик выпрямителя $U_{HCP}=f(I_{HCP})$. без сглаживающего фильтра и с фильтром в одной системе координат, что облегчает их сравнение.

2.7. Экспериментально определить коэффициент пульсаций исследуемой схемы выпрямителя (сглаживающий фильтр отключен) при токе в нагрузке $I_{HCP} = 20$ мА.

Коэффициент пульсаций K_n является показателем качества выпрямленного напряжения. Коэффициент пульсаций – это отношение амплитуды первой гармоники напряжения U_{1m} выпрямленной функции в разложении Фурье к среднему выпрямленному напряжению U_{HCP} , т.е. U_{1m}/U_{HCP} .

2.8. Экспериментально определить коэффициент пульсаций исследуемой схемы выпрямителя с подключенной заданной схемой сглаживающего фильтра при токе в нагрузке $I_{HCP} = 20$ мА.

2.9. Вычислить коэффициент сглаживания S исследуемого сглаживающего фильтра при токе в нагрузке $I_{HCP} = 20$ мА.

Коэффициент сглаживания фильтра S оценивает степень подавления пульсаций сглаживающим фильтром. Количественно коэффициент сглаживания фильтра S равен отношению коэффициента пульсаций на входе фильтра $K_{n.вх}$ к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра $K_{n.вых}$.

$$S = \frac{K_{n.вх.ф}}{K_{n.вых.ф}},$$

где $K_{n.вх}$ – коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя при отключенном сглаживающем фильтре;

$K_{n.вых}$ – коэффициент пульсаций на выходе сглаживающего фильтра, подключенного к выпрямителю.

2.10. Для заданного варианта исследуемой схемы и сглаживающего фильтра экспериментально снять зависимость коэффициента сглаживания фильтра от величины тока нагрузки $S = f(I_{HCP})$. Измерения занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

$S(I_{HCP})$								
I_{HCP} , мА	0							

2.11. Построить график зависимости $S = f(I_{HCP})$. Пояснить причины поведения зависимости $S = f(I_{HCP})$ при изменении тока I_{HCP} .

2.12. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя (сглаживающий фильтр отключен) при подключенной нагрузке ($I_{HCP} = 20$ мА) с помощью осциллографа исследовать формы напряжения:

- на входе выпрямителя (на вторичной обмотке трансформатора);
- на выходе выпрямителя.

2.13. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя с подключенной заданной схемой сглаживающего фильтра при подключенной нагрузке ($I_{HCP} = 20$ мА) с помощью осциллографа исследовать форму напряжения на выходе фильтра (на нагрузке R_H).

2.14. Зарисовать исследованные формы напряжений в виде графиков один под другим по вертикали (в виде временных диаграмм), выдерживая одинаковым масштаб по оси времени (горизонтальная ось).

Примечание. Варианты заданий для выполнения лабораторной работы приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Варианты заданий

Выпрямитель \ Фильтр		Схема сглаживающего фильтра				
		Емкостной фильтр C	Γ -образный RC -фильтр	Π -образный CRC -фильтр	Γ -образный LC -фильтр	Π -образный CLC -фильтр
Схема выпрямителя	Одно- полупериодный выпрямитель	1	2	3	4	5
	Двух- полупериодный выпрямитель с нулевой точкой	6	7	8	9	10
	Двух- полупериодный мосто- вой выпрямитель	11	12	13	14	15

3. Методические указания к проведению работы

3.1. В соответствии с полученным вариантом задания изучить принцип действия исследуемой схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра (см. раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 58 – 64, 68 – 69).

3.2. При снятии внешних характеристик выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$ для измерения среднего тока нагрузки I_{HCP} использовать встроенный в стенд миллиамперметр РА, а для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать внешний вольтметр или мультиметр.

3.3. При вычислении коэффициентов K_1 и K_2 действующее значение напряжения U_2 на входе выпрямителя измерить с помощью встроенного вольтметра PV1, а амплитудное значение этого напряжения вычислить в виде $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_2$. Для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать внешний вольтметр или мультиметр.

3.4. При определении коэффициента пульсаций в контролируемой точке K_n необходимо с помощью осциллографа измерить размах пульсаций в этой точке схемы. Для этого переключить вход осциллографа в состояние «~» – только переменное, далее переключателем усиления по вертикали максимально увеличить измеряемые пульсации в пределах измерительной сетки экрана. После этого измерить размах пульсаций в делениях измерительной сетки экрана, и полученное значение умножить на масштабный коэффициент, на который указывает указатель переключателя усиления по вертикали в В/дел. Полученное значение размаха напряжения примерно равно $2U_{1m}$. Поэтому U_{1m} приблизительно равно половине измеренного с помощью осциллографа размаха напряжения.

Величина U_{HCP} измеряется с помощью внешнего вольтметра, подключенного к нагрузке, также как и при снятии внешних характеристик.

Далее коэффициент пульсаций K_n вычисляется по формуле

$$K_n = U_{1m} / U_{HCP}.$$

3.5. При определении коэффициента сглаживания пульсаций S сглаживающего и фильтра необходимо в соответствии с п. 4.3 измерить коэффициенты пульсаций на входе и выходе $K_{n.вых}$ сглаживающего фильтра.

Для измерения коэффициента пульсаций $K_{n.вых}$ из схемы следует исключить сглаживающий фильтр, оставив только сам выпрямитель и нагрузку R_H , в противном случае сглаживающий фильтр исказит измерение, и оно будет соответствовать внутренней точке фильтра.

Коэффициент пульсаций $K_{n.вых}$ измеряется непосредственно на нагрузке R_H при подключенной схеме сглаживающего фильтра.

Коэффициент сглаживания S вычисляется по формуле

$$S = \frac{K_{п.вх.ф}}{K_{п.вых.ф}}$$

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы данных по снятым характеристикам и расчету коэффициентов $K_1 = U_{HCP}/U_{2m}$, $K_2 = U_{HCP}/U_2$, коэффициентов пульсаций K_n и коэффициентов сглаживания S сглаживающего фильтра, зарисовки осциллограмм. Внешние характеристики построить в единых осях координат. Дать сравнительную оценку значений напряжения в режиме холостого хода и наклона внешних характеристик.

Контрольные вопросы

1. Изобразите вольтамперную характеристику диода и покажите их основные параметры.
2. Объясните принцип действия исследованных схем выпрямителя и сглаживающего фильтра.
3. Изобразите осциллограмму выходного напряжения выпрямителя при условии, что один из диодов (по заданию преподавателя) исследуемой схемы выгорел до обрыва.
4. Назовите различия в обозначениях $I(t)$, I , I_m , I_{CP} , U , U_m . Значения каких из этих величин измерялись в лабораторной работе?
5. Какие измерительные приборы использовались для анализа и измерений при выполнении лабораторной работы?
6. На графиках напряжения на нагрузке $U_H(t)$ для рассмотренных схем выпрямления покажите U_m и U_{HCP} . Какова их количественная связь?
7. Что такое коэффициент пульсаций K_n ? Его определение, и как он измеряется и вычисляется?
8. Что такое коэффициент сглаживания пульсаций S , его определение, к чему он относится, как он измеряется и вычисляется?
9. Назовите определение внешней характеристики выпрямителя. Объясните характер и взаимное расположение полученных в опытах внешних характеристик.

10. Какие виды сглаживающих фильтров находят наибольшее применение? Какая схема наиболее эффективна?

11. Назовите примеры применения выпрямителей по Вашей специальности.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами трехфазных выпрямителей переменного напряжения.

Основные теоретические положения

Выпрямителем называется устройство, преобразующее любое переменное напряжение (синусоидальное или несинусоидальное) в постоянное (выпрямленное) напряжение, а среднее значение (постоянная составляющая) этого напряжения используется потребителем постоянного тока.

Рассматриваемые в работе схемы трехфазных выпрямителей служат основой построения большинства достаточно мощных источников питания, подключаемых к трехфазным силовым электрическим промышленным сетям и используемых в самых различных областях техники. Они обеспечивают постоянным напряжением питания электромашинные приводы постоянного тока различных механизмов, технологические процессы и др. Знание свойств источников питания необходимо инженеру для грамотной их эксплуатации.

Устройство и принцип действия трехфазных схем выпрямления переменного напряжения приведены в данном УМК, раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 64 – 67.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-5А предназначен для исследования схем трехфазных выпрямителей без сглаживающих фильтров. Этот стенд позволяет провести исследование следующих схем выпрямления:

- схема трехфазного выпрямителя с нулевой точкой (панель 1);
- схема трехфазного мостового выпрямителя (Ларионова) (панель 2).

Необходимая схема собирается путем установки на лицевой панели стенда соответствующих съемных панелей и переводом тумблеров S1 – S4 в требуемое положение.

Для выполнения измерений на лицевой панели стенда размещены два вольтметра, два амперметра и два миллиамперметра. Характерные контрольные точки исследуемых схем выведены на лицевую панель с помощью контактных гнезд.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикаторы А, В и С – для контроля включения напряжения фаз трехфазного напряжения, соответственно А, В и С;
- амперметр I_1 – для измерения переменного тока в фазе первичной обмотки трехфазного трансформатора;
- вольтметр U_2 – для измерения фазного или линейного переменного напряжения на вторичных обмотках трехфазного трансформатора;
- амперметр I_2 – для измерения тока во вторичной обмотке трехфазного трансформатора;
- амперметр I_A – для измерения среднего постоянного тока в цепи выпрямительного диода;
- вольтметр U_d – для измерения среднего постоянного выпрямленного напряжения на нагрузке;
- амперметр I_d – для измерения среднего выпрямленного постоянного тока в цепи нагрузки;
- тумблеры S1.1, S1.2 и S1.3 – для включения и отключения индуктивностей L_A , L_B и L_C в цепи вторичных обмоток соответственно фаз А, В и С трехфазного трансформатора;
- тумблер S2 – для подключения вольтметра U_2 к фазному или линейному вторичному напряжению трехфазного трансформатора;
- тумблер S3 – для подключения и отключения индуктивности L_d в цепи активной нагрузки;
- тумблер S4 – для подключения активной нагрузки к выходу выпрямителя;
- переключатель R_H – для изменения величины активного сопротивления нагрузки;
- гнезда 1 – 12 – для измерения напряжений внешними вольтметрами и просмотра осциллограмм в характерных точках исследуемых схем.

Питание стенда осуществляется от сети трехфазного переменного тока напряжением 380/220 В с помощью специального шнура с трехфазной вилкой.

Вид съемных панелей для различных схем выпрямителей приведен на рис. 2.1 и 2.2.

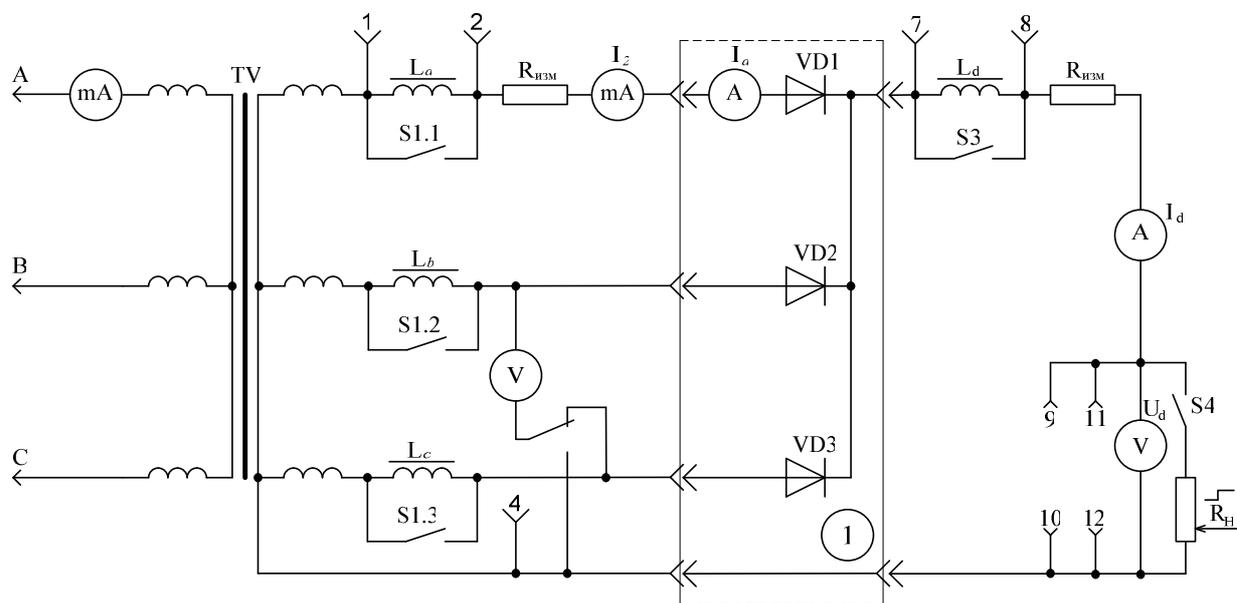


Рис. 2.1. Схема исследования трехфазного выпрямителя с нулевой точкой (панель 1)

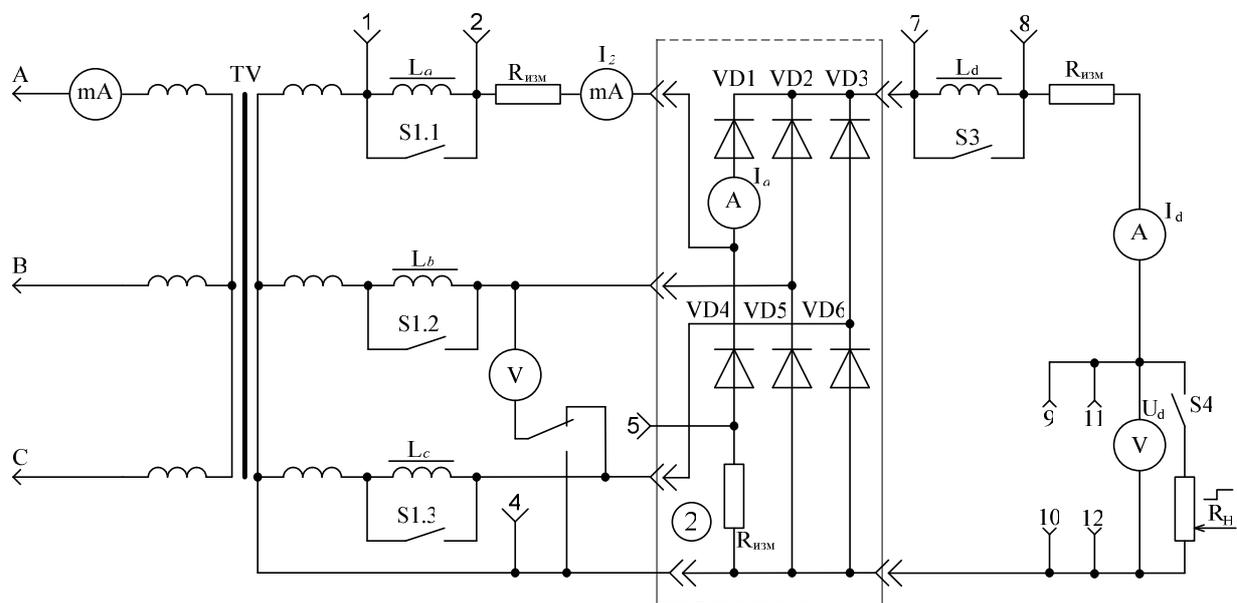


Рис. 2.2. Схема исследования трехфазного мостового выпрямителя Ларионова (панель 2)

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя экспериментально снять внешнюю характеристику выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$. Измерения занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

U_{HCP} , В				
I_{HCP} , мА	0			

2.4. Построить график внешней характеристики выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$.

2.5. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя в режиме холостого хода (нагрузка R_H отключена, тумблер S4 переключить в состояние «выкл») вычислить значение коэффициентов $K_1 = U_{HCP}/U_{2m}$ и $K_2 = U_{HCP}/U_2$, где U_{2m} – амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора, т.е. на входе выпрямителя, а U_2 – действующее значение того же напряжения.

2.6. Экспериментально определить коэффициент пульсаций K_n исследуемой схемы выпрямителя при токе в нагрузке $I_{HCP} = 20$ мА.

Коэффициент пульсаций K_n является показателем качества выпрямленного напряжения. Коэффициент пульсаций – это отношение амплитуды первой гармоники напряжения U_{1m} выпрямленной функции в разложении Фурье к среднему выпрямленному напряжению U_{HCP} , т.е. $K_n = U_{1m}/U_{HCP}$.

2.7. Исследовать зависимость коэффициента пульсаций K_n от тока нагрузки I_{HCP} $K_n = f(I_{HCP})$, при изменении R_H в пределах $2R_H$, R_H , $R_H/2$. Измерения занести в табл. 2.2.

2.8. Построить график зависимости коэффициента пульсаций выпрямителя K_n от тока нагрузки $K_n = f(I_{HCP})$.

Таблица 2.2

Величина R_H	$2R_H$	R_H	$R_H/2$
I_{HCP} , мА			
K_n			

2.9. Для заданного варианта исследуемой схемы выпрямителя при подключенной нагрузке ($I_{HCP} = 20$ мА) с помощью осциллографа исследовать формы напряжения:

- на входе выпрямителя (на вторичной обмотке трансформатора);
- на выходе выпрямителя.

2.10. Зарисовать исследованные формы напряжений в виде графиков один под другим по вертикали (в виде временных диаграмм), выдерживая одинаковым масштаб по оси времени (горизонтальная ось).

Примечание. Варианты заданий для выполнения лабораторной работы приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Варианты заданий

Выпрямитель		Нагрузка	Вид нагрузки	
			Активная нагрузка R_H	Активно-индуктивная нагрузка $L_D R_H$
Схема выпрямителя	Трехфазный выпрямитель с нулевой точкой		1	2
	Трехфазный мостовой выпрямитель Ларионова		3	4

3. Методические указания к проведению работы

3.1. В соответствии с полученным вариантом задания изучить принцип действия исследуемой схемы выпрямителя (см. раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 64 – 67).

3.2. При снятии внешних характеристик выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$ для измерения среднего тока нагрузки I_{HCP} использовать встроенный в стенд миллиамперметр РА, а для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать встроенный в стенд вольтметр U_d .

Для изменения тока нагрузки I_{HCP} использовать переключатель R_H , имеющий три состояния: $2R_H$, R_H , $R_H/2$. Для получения $R_H = \infty$ следует тумблер S4 переключить в состояние «выкл».

3.3. При вычислении коэффициентов K_1 и K_2 действующее значение напряжения U_2 на входе выпрямителя измерить с помощью встроенного вольтметра PV1, а амплитудное значение этого напряжения вычислить в виде $U_{1m} = \sqrt{2} \cdot U_2$. Для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать встроенный вольтметр U_d .

3.4. При определении коэффициента пульсаций в контролируемой точке K_n необходимо с помощью осциллографа измерить размах пульсаций в этой точке схемы. Для этого переключить вход осциллографа в состояние «~» (только переменное), далее переключателем усиления по вертикали максимально увеличить измеряемые пульсации в пределах измерительной сетки экрана. После этого измерить размах пульсаций в делениях измерительной сетки экрана и полученное значение умножить на масштабный коэффициент, на который указывает указатель переключателя усиления по вертикали в В/дел. Полученное значение размаха напряжения примерно равно $2U_{1m}$. Поэтому U_{1m} приблизительно равно половине измеренного с помощью осциллографа размаха напряжения.

Величина $U_{НСП}$ измеряется с помощью встроенного вольтметра U_d , подключенного к нагрузке, также как и при снятии внешних характеристик.

Далее коэффициент пульсаций K_n вычисляется по формуле

$$K_n = U_{1m} / U_{НСП}.$$

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе отчета указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы данных по снятым характеристикам и результаты расчета коэффициентов $K_1 = U_{НСП} / U_{2m}$, $K_2 = U_{НСП} / U_2$, коэффициентов пульсаций K_n , зарисовки осциллограмм. Внешнюю характеристику и зависимость коэффициента пульсаций от нагрузки построить в виде графиков. Пояснить причины поведения полученных графических зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия исследуемой трехфазной схемы выпрямления, ее основные свойства и характеристики.
2. Назовите основное применение исследуемой трехфазной схемы выпрямления.
3. Какова максимальная величина обратного напряжения, приложенного к диоду в исследуемой схеме трехфазного выпрямителя?
4. Какие приборы использовались для анализа и измерений при выполнении лабораторной работы?

5. На графике напряжения на нагрузке $U_H(t)^0$ для исследуемой схемы выпрямления покажите U_m и U_{HCP} . Какова их количественная связь?
6. Назовите определение внешней характеристики выпрямителя. Объясните причины поведения графика, полученной в опытах внешней характеристики.
7. Каков характер и уровень пульсаций напряжения на нагрузке для исследуемой схемы трехфазного выпрямителя?
8. Перечислите основные типовые схемы трехфазных выпрямителей.
9. Дайте сравнительную оценку свойств и применения трехфазных выпрямителей.
10. Изобразите график (осциллограмму) выпрямленного напряжения на нагрузке при обрыве одного из диодов (по заданию преподавателя) в исследуемой схеме трехфазного выпрямителя.
11. Исходя из каких условий осуществляется выбор диодов для исследуемой схемы трехфазного выпрямителя?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА ТИРИСТОРАХ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами однофазного регулируемого выпрямителя на тиристорах.

Основные теоретические положения

Выпрямителем называется устройство, преобразующее любое переменное напряжение (синусоидальное или несинусоидальное) в постоянное (выпрямленное) напряжение, а среднее значение (постоянная составляющая) этого напряжения используется потребителем постоянного тока.

Рассматриваемая в работе схема регулируемого выпрямителя на тиристорах служит основой построения большинства регулируемых источников питания с использованием ключевых элементов, подключаемых к однофазным силовым электрическим сетям и используемых в самых различных областях техники. Они обеспечивают постоянным напряжением питания устройства, которые требуют для своей работы в различных ре-

жимах изменение напряжения питания в широких пределах. Знание свойств таких источников питания необходимо инженеру для грамотной их эксплуатации.

Устройство и принцип действия однофазных регулируемых выпрямителей на тиристорах описано в данном УМК, раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 75 – 78.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-16 предназначен для исследования схем однофазных регулируемых выпрямителей на тиристорах. Этот стенд содержит:

- управляемый выпрямитель на тиристорах VS1 и VS2, построенный по схеме двухполупериодного выпрямления с нулевой точкой;
- систему импульсно-фазового управления тиристорами (СИФУ), состоящую из статического фазовращателя (R_ϕ, C_1); ограничительных диодов VD1, VD2, VD3, VD4; двух усилителей-формирователей на транзисторах VT1, VT2 и двух дифференцирующих цепей (R_5, C_2), и (R_6, C_3);
- нагрузочные цепи, которые могут состоять или из активного сопротивления (R_n) или активно-индуктивного сопротивления (R_n, L_n);
- амперметр РА – для измерения значения среднего выпрямленного тока в нагрузке;
- вольтметр PV – для измерения значения среднего выпрямленного напряжения на нагрузке.

Характерные контрольные точки исследуемых схем выведены на лицевую панель с помощью контактных гнезд.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикатор «Вкл» – для контроля включения;
- переключатель S1 – для переключения вида нагрузки;
- ручка R_n – для плавного изменения величины активного сопротивления нагрузки;
- ручка R_ϕ – для дискретного изменения величины угла сдвига фазы фазовращателя;
- гнезда 1 – 16 – для измерения напряжений и просмотра осциллограмм в характерных точках исследуемых схем;
- вольтметр PV1 – для измерения напряжения на вторичной обмотке.

Питание стенда осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В с помощью специального шнура с вилкой.

Схема системы импульсно-фазового управления тиристорами (СИФУ) приведена на рис. 3.1.

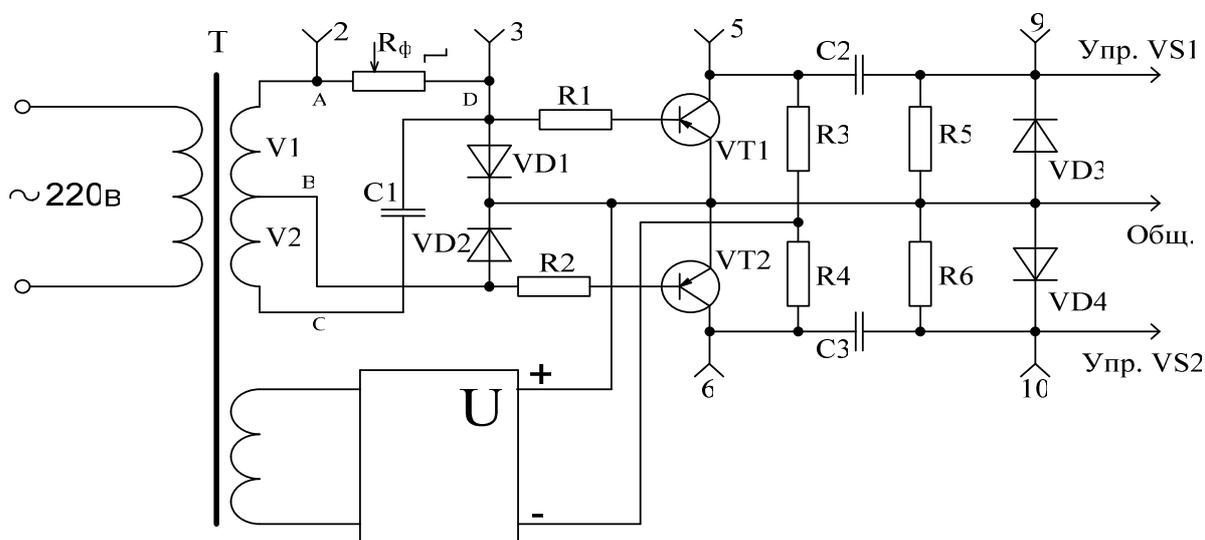


Рис. 3.1. Схема системы импульсно-фазового управления тиристорами (СИФУ)

Статический фазовращатель системы импульсно-фазового управления построен в виде мостовой схемы, два плеча которой составляют обмотки V_1 и V_2 трансформатора T_1 , а два других плеча состоят из активного сопротивления R_ϕ и емкости C_1 .

Статический фазовращатель работает следующим образом.

При изменении величины сопротивления R_ϕ изменяется сдвиг по фазе между напряжением U_{CA} и током I_ϕ через последовательно включенные R_ϕ и C_1 . В результате изменяется сдвиг по фазе между напряжением U_{CA} и U_{BD} . Векторная диаграмма, поясняющая принцип работы фазовращателя приведена на рис. 3.2.

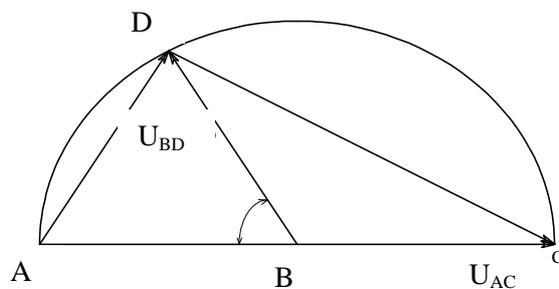


Рис. 3.2. Векторная диаграмма схемы фазовращателя γ

Выходное синусоидальное напряжение U_{BD} от фазовращателя поочередно воздействует на входы усилителей-формирователей на транзисторах VT1 и VT2. Так, положительная полуволна синусоидального напряжения U_{BD} воздействует только на транзистор VT2, т.к. диод VD1 шунтирует вход транзистора VT1, а отрицательная полуволна синусоидального напряжения U_{BD} воздействует только на транзистор VT1, т.к. диод VD2 шунтирует вход транзистора VT2. Транзисторы VT1 и VT2 работают в ключевом режиме (открыто-закрыто). В результате на коллекторах транзисторов VT1 и VT2 формируются напряжения прямоугольной формы.

Дифференцирующие цепочки R5-C2 и R6-C3 дифференцируют положительные фронты импульсов напряжения, формируемых транзисторами VT1 и VT2, и управляют включением тиристоров VS1 и VS2. Дифференцирование отрицательных фронтов импульсов транзисторов шунтируется диодами VD3 и VD4.

В итоге напряжение управления тиристорами VS1 и VS2 отстает по фазе от анодного напряжения тиристора. В результате тиристор остается закрытым с момента подачи положительного анодного напряжения до момента подачи управляющего импульса (раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 75 – 78).

На рис. 3.3 приведена исследуемая принципиальная электрическая схема однофазного регулируемого выпрямителя на тиристорах.

Со вторичных обмоток II и III трансформатора T1 относительно нулевой точки снимаются два противофазных напряжения. В тот полупериод, когда в этих обмотках трансформируется положительная полуволна синусоидального напряжения (плюс – вверху, минус – внизу), потенциал анода тиристора VS1 выше, чем потенциал его катода, и, следовательно, тиристор VS1 может пропустить ток через нагрузку выпрямителя R_H при поступлении на управляющий вход VS1 импульса управления от схемы СИФУ (с коллектора VT2). Тиристор VS2 в этот полупериод закрыт, т.к. в течение всего полупериода потенциал анода VS2 ниже, чем потенциал его катода.

В следующий полупериод полярность напряжения во вторичных обмотках II и III трансформатора T1 изменится на противоположную, и тиристор VS1 весь полупериод будет закрыт, а тиристор VS2 с приходом управляющего импульса от СИФУ (с коллектора VT1) откроется и пропустит ток через нагрузку выпрямителя R_H .

Таким образом, подавая на управляющие электроды тиристорov импульсы управления от СИФУ с регулируемой задержкой во времени относительно начала полупериода синусоидального напряжения, можно регу-

лировать среднее значение тока и напряжения в цепи нагрузки выпрямителя R_H . Общий вид осциллограммы выпрямленного напряжения $U_d = f(t)$ приведен на рис. 3.4.

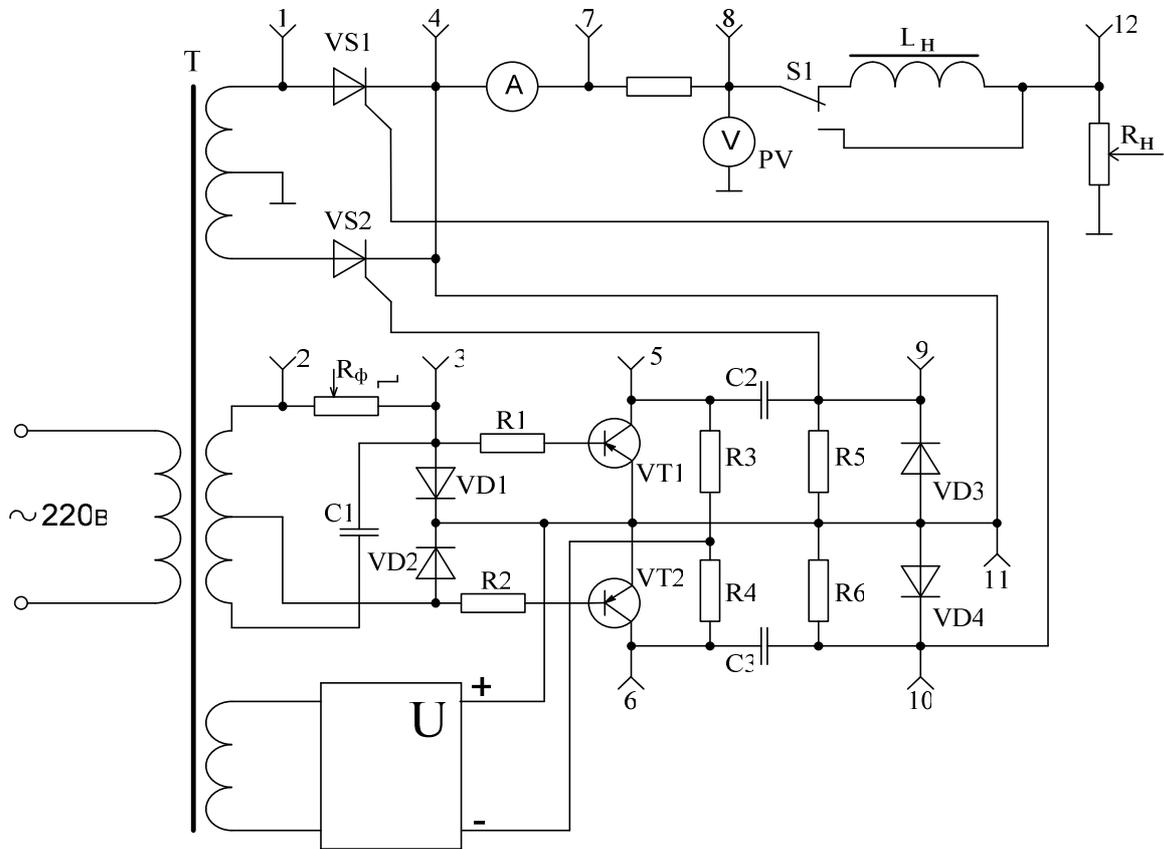


Рис. 3.3. Схема однофазного регулируемого выпрямителя на тиристорах

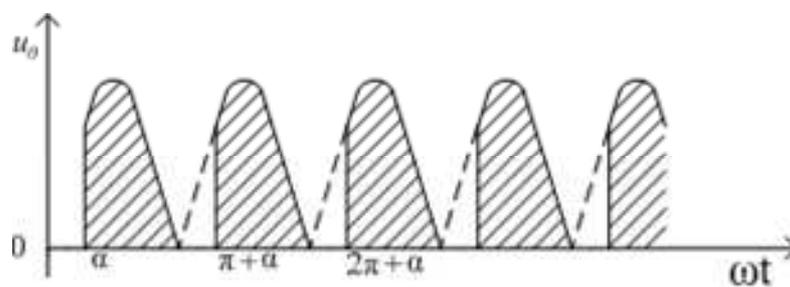


Рис. 3.4. Осциллограмма выпрямленного напряжения регулируемого выпрямителя для произвольного γ

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомьтесь со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучите назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Исследовать влияние угла включения тиристоров α на форму напряжения на нагрузке $U_H(t)$ и зарисовать осциллограмму $U_H(t)$ при фиксированных значениях α (положениях переключателя R_ϕ), заданных преподавателем.

Зарисовать исследованные формы напряжений в виде графиков один под другим по вертикали (в виде временных диаграмм), выдерживая одинаковым масштаб по оси времени (горизонтальная ось).

2.4. Снять и построить регулировочную характеристику $U_{HCP} = f(\alpha)$ при $R_H = \text{const}$. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$U_{HCP}, \text{В}$							
$\alpha, \text{град}$							

2.5. Снять и построить семейство внешних характеристик управляемого выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$ для $\alpha_i = \text{const}$, заданных в п. 2.3. Данные измерений для каждого значения α_i занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

α_1		α_2		α_3	
I_{HCP}	U_{HCP}	I_{HCP}	U_{HCP}	I_{HCP}	U_{HCP}

Все внешние характеристики должны быть построены в общих осях координат.

2.6. По результатам измерений в п. 2.5 теоретически рассчитать значения $\alpha_i = \text{const}$ для положений переключателя R_ϕ , заданных в п. 2.3, и сравнить их с измеренными значениями.

3. Методические указания к проведению работы

3.1. Изучить принцип действия исследуемой схемы управляемого выпрямителя (раздел 12 «Вторичные источники питания», с. 75 – 78).

3.2. Для выполнения п. 2.3 необходимо:

– подключить лабораторный стенд и включить схему управляемого выпрямителя;

- установить значение R_H , при котором ток нагрузки будет максимальным;
- подключить осциллограф к резистору R_H (гнезда 12, 12);
- установить ручкой R_ϕ различные значения α (три – четыре значения по указанию преподавателя) и для каждого значения зарисовать осциллограмму $U_H(t)$ в одном масштабе времени, расположив все осциллограммы, одна под другой. Значение α отсчитывать по калибровочной сетке на экране осциллографа, используя в качестве базы длительность полупериода выпрямляемого напряжения частотой 50 Гц.

3.3. При снятии регулировочной характеристики $U_{HCP} = f(\alpha)$ при $R_H = \text{const}$ (п. 2.4) необходимо:

- установить значение R_H , при котором ток нагрузки будет максимальным;
- подключить осциллограф к резистору R_H (гнезда 12, 12);
- для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать встроенный в стенд вольтметр PV;
- ручкой R_ϕ дискретно изменять значения α в порядке возрастания (положения 1 – 7) и для каждого значения α измерить U_{HCP} . Результаты измерений занести в табл. 3.1. Значение α отсчитывать по калибровочной сетке на экране осциллографа, используя в качестве базы длительность полупериода выпрямляемого напряжения частотой 50 Гц;
- по данным измерений построить регулировочную характеристику.

3.4. При снятии внешних характеристик выпрямителя $U_{HCP} = f(I_{HCP})$ (п. 2.5) для измерения среднего тока нагрузки I_{HCP} использовать встроенный в стенд амперметр РА, а для измерения среднего выпрямленного напряжения U_{HCP} следует использовать встроенный в стенд вольтметр PV.

Для изменения тока нагрузки I_{HCP} использовать ручку « R_H », она обеспечивает плавную регулировку тока нагрузки I_{HCP} .

3.5. Для расчета значений α по измеренной величине U_{HCP} следует использовать выражение

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_{HCP}}{U_{2m}} \cdot \pi - 1\right).$$

Амплитудное значение напряжения U_{2m} измерить с помощью осциллографа.

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы данных по снятым характеристикам, результаты расчета значений α по измеренным значениям U_{HCP} и зарисовки осциллограмм. Регулировочную и внешние характеристики построить в виде графиков. Пояснить причины поведения полученных графических зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия исследуемой схемы управляемого выпрямителя, ее основные свойства.
2. Изобразите вольт-амперную характеристику управляемого тиристора (тринистора) и поясните его свойства.
3. В каких пределах может регулироваться выходное напряжение исследуемого управляемого выпрямителя?
4. Какие приборы использовались для анализа и измерений при выполнении лабораторной работы?
5. Поясните принцип действия статического фазовращателя RC-типа.
6. Дайте определение внешней характеристики выпрямителя. Объясните причины поведения графика полученной в опытах внешней характеристики.
7. Что такое регулировочная характеристика? Поясните характер поведения графика полученной в опытах регулировочной характеристики.
8. Изобразите график (осциллограмму) выпрямленного напряжения на нагрузке управляемого выпрямителя, если схема управления обеспечивает момент включения тиристора при значении $\alpha = \pi/2$.
9. Исходя из каких условий осуществляется выбор тиристорov для исследуемой схемы управляемого выпрямителя?
10. Каким образом в исследуемой схеме управляемого выпрямителя формируются управляющие импульсы для управления тиристорами?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами типовых схем электронных усилителей на биполярных и полевых транзисторах.

Основные теоретические положения

Электронным усилителем называют устройство, позволяющее повысить мощность входного электрического сигнала за счет энергии источника питания усилителя с помощью усилительных элементов (транзисторов, операционных усилителей и т.п.) при заданном уровне искажений.

Электронные усилители являются одними из наиболее важных и широко используемых устройств в системах передачи и обработки различной информации, представленной с помощью электрических сигналов. Высокая чувствительность, быстродействие, компактность, экономичность электронных усилителей обусловили их широкое применение в измерительной технике, электро- и радиосвязи, автоматике, вычислительной технике и т.п.

В настоящее время основным элементом электронного усилительного устройства является транзистор.

Транзистором называют полупроводниковый прибор, в котором изменение входного электрического сигнала приводит к изменению сопротивления выходной цепи транзистора (транзистор – дословно «преобразователь сопротивления»). Это свойство транзистора может быть использовано для различных преобразований электрических сигналов (усиление, генерирование, преобразователей формы и т.д.) в электронных стабилизаторах, переключателях и т.п. Существует большое разнообразие транзисторов, отличающихся принципом действия, назначением, мощностью, частотными свойствами и другими признаками.

В данной работе исследуются усилительные каскады на биполярном транзисторе типа $p-n-p$, имеющем два $p-n$ -перехода, или на полевом транзисторе с управляющим переходом n -типа, в зависимости от задания.

Устройство, принцип действия, свойства и характеристики одиночных усилительных каскадов на биполярных и полевых транзисторах описано в данном УМК, раздел 13 «Усилители электрических сигналов», с. 81 – 95.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-4А предназначен для исследования типовых схем усилительных каскадов на транзисторах. Выбор исследуемой схемы производится путем установки соответствующих съемных панелей. Стенд позволяет выполнить исследование следующих типовых усилительных каскадов:

- усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим эмиттером (панель 1);
- усилительный каскад на биполярном транзисторе с общим коллектором (панель 2);

- усилительный каскад на полевом транзисторе с общим истоком (панель 6);
- усилительный каскад на полевом транзисторе с общим стоком (панель 7).

Внешний вид используемых съемных панелей приведен на рис. 3.1 – 3.4.

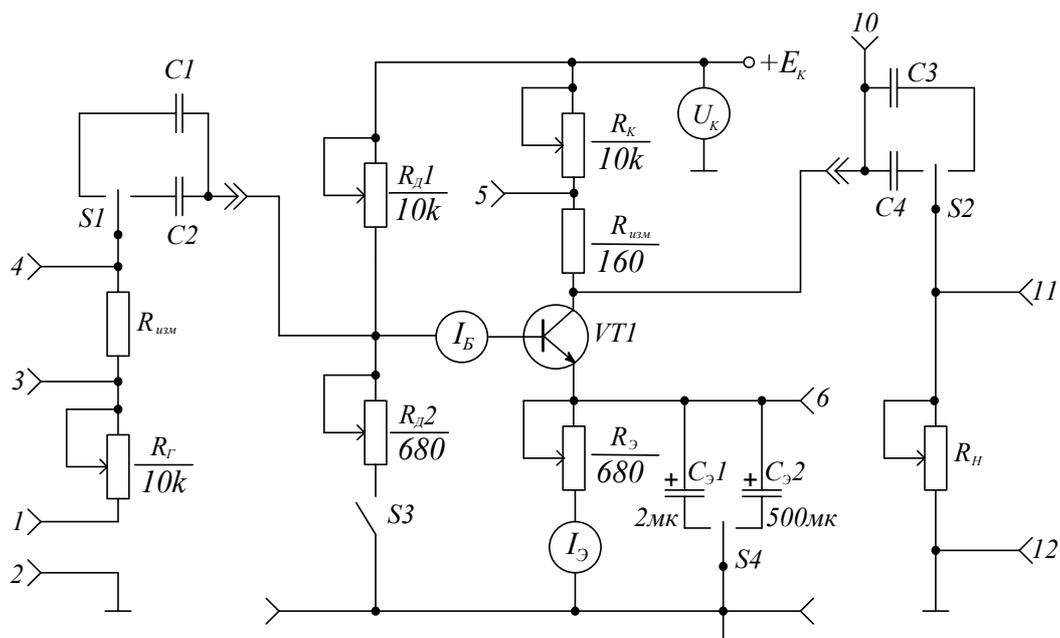


Рис. 3.1

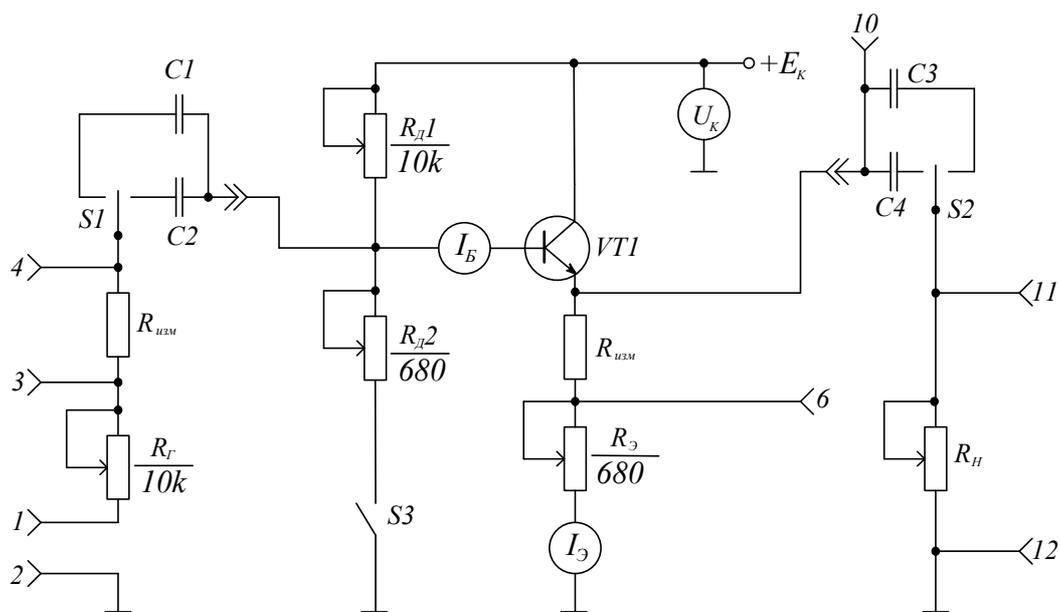


Рис. 3.2

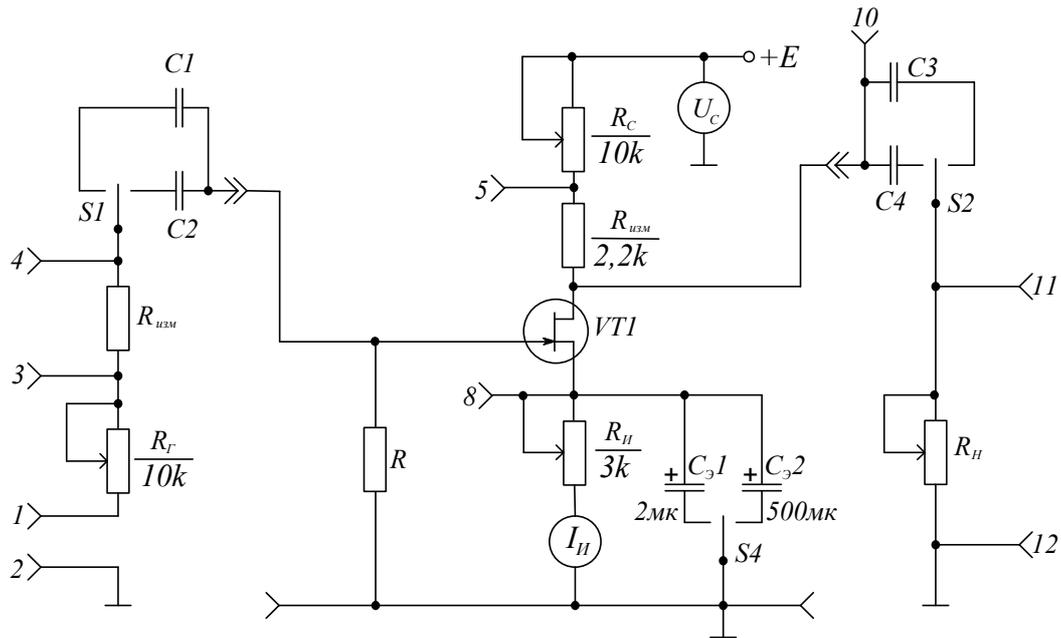


Рис. 3.3

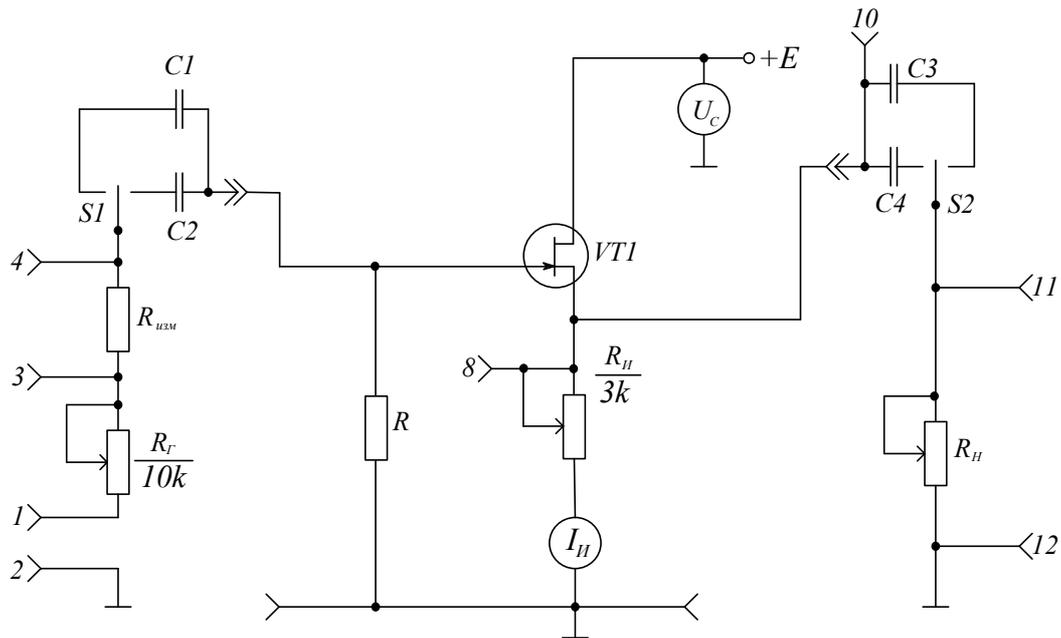


Рис. 3.4

Кроме съемных панелей в состав стенда входят:

- генератор синусоидальных колебаний в диапазоне 20 – 20 000 Гц с тремя поддиапазонами: 20 – 200 Гц; 200 – 2000 Гц; 2000 – 20000 Гц;
- аттенюатор, позволяющий изменять (ослаблять) уровень сигнала генератора в 10 и 100 раз с плавной регулировкой на каждом из трех пределов;

– блок питания, позволяющий устанавливать напряжение питания E_C в пределах (0 – 12) В и E_K в пределах (0 – 24) В;

– резистор нагрузки R_H усилительного каскада с плавной регулировкой величины сопротивления.

Необходимая схема собирается путем установки на лицевой панели стенда соответствующих съемных панелей и переводом тумблеров S1 – S4 в требуемое положение.

Для выполнения измерений на лицевой панели стенда размещены вольтметр и три миллиамперметра магнитоэлектрической системы. Характерные контрольные точки исследуемых схем выведены на лицевую панель с помощью контактных гнезд.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикатор «Вкл» – для контроля включения;
- переключатель «Частота, кГц» – для переключения поддиапазонов частот генератора от 0,2 кГц до 20 кГц;
- ручка «Выход» – для изменения величины выходного напряжения генератора;
- гнезда 1:1, 1:10, 1:100 – для ступенчатого деления величины выходного напряжения генератора;
- ручка R_L – для плавного изменения величины выходного сопротивления генератора;
- тумблер S1 с положениями C1 и C2 – для подачи входного сигнала на вход исследуемой схемы через соответствующую емкость;
- гнезда 1, 2 и «⊥» – для подключения на вход усилителя сигнала от внешнего генератора;
- гнезда 3 и 4 – для просмотра осциллограмм входного тока;
- миллиамперметр I_B – для измерения постоянного тока базы;
- миллиамперметр I_E с кнопкой «x5/x1» – для измерения тока в цепи эмиттера (кнопка изменяет шкалу прибора – в нажатом положении «x1» показания соответствуют значениям, указанным на шкале прибора);
- миллиамперметр I_H с кнопкой «x5/x1» – для измерения тока в цепи истока (кнопка изменяет шкалу прибора, как указано выше);
- ручки $R_{Д1}$, $R_{Д2}$, $R_Э$, R_K - R_C , R_H и E_K - E_C – для регулировки соответствующих параметров в исследуемых схемах усилительных каскадов;
- тумблер S2 – для подключения нагрузки через один из разделительных конденсаторов C3 или C4;

- тумблер S3 – для изменения схемы входного делителя напряжения в исследуемых каскадах;
- гнезда 5 – 12 – для измерения напряжения и просмотра осциллограмм токов и напряжений в характерных точках схем усилителей;
- тумблер E_C-E_K – для переключения режимов работы источника питания.

Питание стенда осуществляется от сети переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц с помощью специального шнура с вилкой.

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Установить на стенд съемную панель с заданной для исследования схемой усилительного каскада, проводниками подключить сигнал генератора ко входу и нагрузку к выходу усилителя, подключить осциллограф, включить стенд и выполнить настройку работы усилителя.

2.4. Исследовать влияние величины входного напряжения $U_{вх}$ на величину и форму напряжения на нагрузке усилителя U_H при постоянной частоте f_c входного сигнала и построить амплитудную характеристику $U_H = f(U_{вх})$. Результаты измерений занести в табл. 4.1, 4.2.

Таблица 4.1

Для усилительных каскадов с ОЭ и ОИ

$U_{вх}$, мВ	U_H , В
0	
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	

Таблица 4.2

Для усилительных каскадов с ОК и ОС

U_{ex} , мВ	U_H , В
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

2.5. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику исследуемого усилителя (АЧХ) $K = f(f_T)$, где K – коэффициент усиления по напряжению. $K = U_H / U_{ex}$. Результаты измерений занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

f_T , Гц	U_{ex} , мВ, В	U_H , В	K
20			
100			
500			
1 000			
10 000			
20 000			

2.6. Снять и построить фазочастотную характеристику исследуемого усилителя (ФЧХ) $\varphi = f(f_T)$, где φ – сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями усилителя. Результаты измерений занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

f_T , Гц	φ , рад (град)
20	
100	
500	
1 000	
10 000	
20 000	

2.7. По полученным экспериментальным данным и характеристикам определить:

– коэффициенты усиления усилителя по току, напряжению и мощности;

- входное сопротивление усилителя;
- нижнюю частоту рабочего частотного диапазона усилителя.

2.8. Снять осциллограммы напряжений в характерных точках схемы усилителя.

Таблица 4.5

Варианты заданий

№ варианта	Схема усилительного каскада
1	Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ
2	Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОК
3	Усилитель на полевом транзисторе по схеме с ОИ
4	Усилитель на полевом транзисторе по схеме с ОС

3. Методические указания к проведению работы

3.1. В соответствии с полученным вариантом задания изучить принцип действия исследуемой схемы усилительного каскада (см. раздел 13 «Усилители электрических сигналов», с. 81 – 95).

3.2. Для снятия амплитудной характеристики усилителя $U_n = f(U_{ex})$ использовать двухлучевой осциллограф, один канал которого подключить к входным гнездам усилителя, а второй – к контактным гнездам нагрузки. Отсчет амплитуд входного и выходного напряжения усилителя производить по экранной сетке с учетом положений масштабных переключателей по обоим каналам. Измерение токов I_B , I_E , I_H производить с помощью встроенных в стенд миллиамперметров.

3.3. Для снятия амплитудно-частотной характеристики усилителя (АЧХ) $K = f(f_T)$ также следует использовать двухлучевой осциллограф, один канал которого подключить к входным гнездам усилителя, а второй – к контактным гнездам нагрузки. Отсчет амплитуд входного и выходного напряжения усилителя производить аналогично. Изменять частоту входного сигнала усилителя с помощью переключателя и ручки «Частота», амплитуду выходного сигнала – с помощью ручки «Выход». Измерять частоту входного сигнала – с помощью осциллографа, по экранной сетке, с учетом положения переключателя «Развертка». Амплитудно-частотную характеристику рекомендуется строить в логарифмическом масштабе. При этом коэффициент усиления по напряжению в (дБ): $K_U = 20 \lg(U_{ВЫХ}/U_H)$.

3.4. Для снятия фазочастотной характеристики усилителя (ФЧХ) $\varphi = f(f_T)$ также следует использовать двухлучевой осциллограф, один канал которого подключить к входным гнездам усилителя, а второй – к контактным гнездам нагрузки. Осциллограф перевести в режим измерения фазы.

Изменять частоту входного сигнала усилителя аналогично п. 3.3. При построении ФЧХ следует учитывать, что при изменении частоты от нижней границы $f_{Н.ГР}$ до верхней границы $f_{В.ГР}$ угол сдвига по фазе может меняться для каскадов усиления с ОЭ и ОИ в пределах $\varphi = -\pi \pm \pi/2$, а для каскадов усиления с ОК и ОС в пределах $\varphi = \pm \pi/2$.

3.5. Коэффициенты усиления по напряжению K_U , току K_I и мощности K_P в относительных единицах рассчитываются по формулам:

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}; K_I = I_{ВЫХ} / I_{ВХ}; K_P = P_{ВЫХ} / P_{ВХ}.$$

Однако более удобно указанные коэффициенты определять в децибеллах в следующем виде:

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \lg(U_{ВЫХ}/U_{ВХ});$$

$$K_I(\text{дБ}) = 20 \lg(I_{ВЫХ}/I_{ВХ});$$

$$K_P(\text{дБ}) = 20 \lg(P_{ВЫХ}/P_{ВХ}).$$

3.6. Входное сопротивление усилителя рассчитывается по формуле

$$R_{ВХ} = U_{ВХ} / I_{ВХ}.$$

Определение входного сопротивления следует выполнять для каскадов усиления только на биполярных транзисторах. Для усилителей на полевых транзисторах $R_{ВХ} > 10^9$.

3.7. Для определения нижней частоты рабочего частотного диапазона усилителя нужно на графике АЧХ провести горизонтальную прямую на уровне

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \cdot \lg \left[\frac{U_{ВЫХ}}{\sqrt{2} \cdot U_{ВХ}} \right].$$

Точка пересечения этой прямой с графиком АЧХ и определит искомую частоту.

3.8. Для снятия осциллограмм напряжений в характерных точках схемы (по заданию преподавателя) необходимо с помощью ручек «Синхр.» и «Стаб.» осциллографа добиться неподвижного изображения на экране, а также при помощи делителей напряжения получить изображение достаточной величины (не менее половины размера экрана по вертикали).

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы данных по снятым характеристикам и расчету коэффициентов усиления, входных сопротивлений и определению нижней частоты рабочего частотного диапазона усилителя, зарисовки осциллограмм. Сформулировать основные свойства исследуемой схемы усилительного каскада.

Контрольные вопросы

1. Что называется электронным усилителем? Объяснить принцип действия усилителя.
2. Перечислить основные параметры и характеристики усилителя.
3. Объяснить назначение элементов, входящих в схему усилительного каскада на транзисторе.
4. Объяснить характер экспериментальных зависимостей и осциллограмм, полученных в работе.
5. Что такое коэффициент усиления усилителя и как он определяется?
6. Как осуществляется температурная стабилизация в усилителе?
7. Что такое полоса пропускания усилителя? Как ее определить?
8. Какими основными частотными характеристиками характеризуется усилитель?
9. Каково назначение конденсаторов связи в усилительных каскадах?
10. Почему наблюдается завал коэффициента усиления усилителя на низких и на высоких частотах?
11. Назовите возможные области применения электронных усилителей.
12. Назовите назначение используемых в работе электронных приборов.

Лабораторная работа № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ТИПОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами типовых устройств, построенных на основе операционных усилителей.

Основные теоретические положения

Операционные усилители относятся к категории усилителей постоянного тока. Они относятся к классу многофункциональных, или универсальных, т.к. с их помощью можно реализовать практически любой вид усиления электрического сигнала.

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель с входным дифференциальным каскадом, с очень высоким и стабильным коэффициентом усиления (от 1000 до 100 000 и более), широкой полосой пропускания (от 0 до 10...100 МГц), высоким входным сопротивлением ($R_{вх} > 10 \text{ кОм}$) и малым выходным сопротивлением ($R_{вых} < 100 \text{ Ом}$).

Применение ОУ позволяет за счет использования перечисленных свойств и различных звеньев обратной связи выполнять узлы и устройства электронной аппаратуры самого разнообразного назначения (различные типы усилителей, генераторы электрических сигналов различной формы, стабилизаторы напряжений, активные фильтры и много других электронных устройств). ОУ называются операционными потому, что с их помощью реализуются различные операции над входными напряжениями, такие как масштабирование (умножение на постоянный коэффициент), суммирование и вычитание, интегрирование и дифференцирование, и др.

ОУ в настоящее время выпускаются только в микроэлектронном (интегральном) исполнении и считаются базовым элементом современной микроэлектроники. ОУ обладают высокой надежностью и механической прочностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением.

В данной лабораторной работе исследуются свойства некоторых типовых устройств на основе операционных усилителей.

Устройство, принцип действия, свойства и характеристики основных типовых устройств, построенных на ОУ, описано в данном УМК, раздел 13 «Усилители электрических сигналов», с. 100 – 112.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-23 предназначен для исследования схем типовых устройств на ОУ. Выбор исследуемой схемы производится путем установки соответствующих съемных панелей. Стенд позволяет выполнить исследование следующих типовых устройств на ОУ:

- компаратора (панель 1.1);
- неинвертирующего усилителя (панель 1.2);
- инвертирующего усилителя (панель 1.3);
- инвертирующего сумматора (панель 3);
- генератора пилообразного напряжения (панель 5.1);
- интегратора (панель 5.2).

Внешний вид используемых съемных панелей приведен на рис. 5.1 – 5.6.

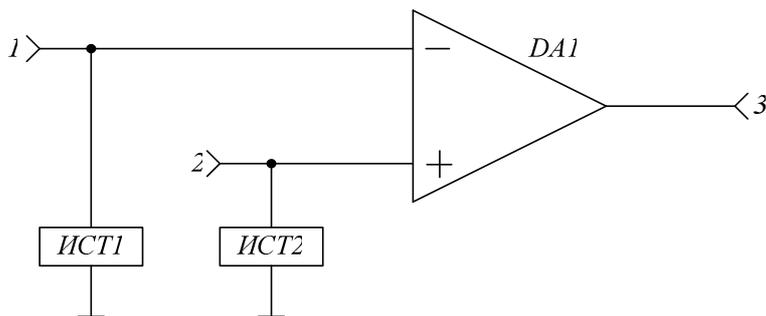


Рис. 5.1. Панель 1.1

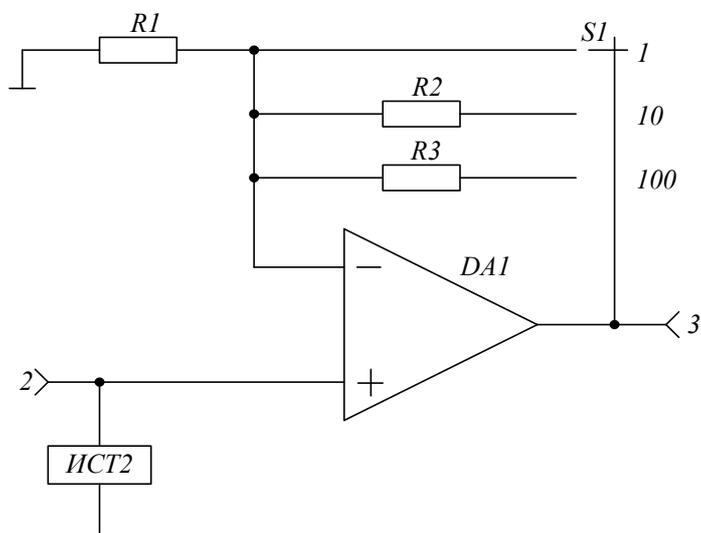


Рис. 5.2. Панель 1.2

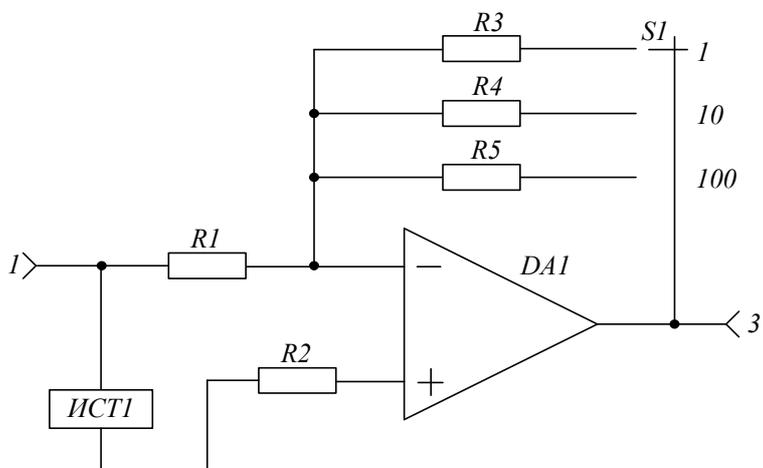


Рис. 5.3. Панель 1.3

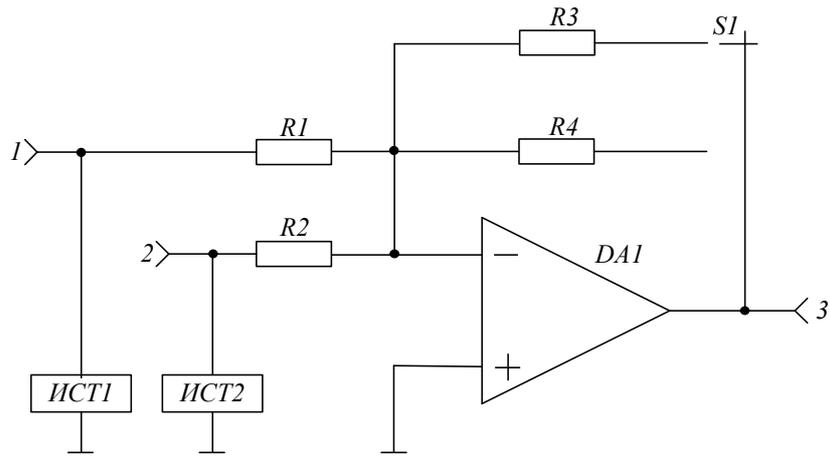


Рис. 5.4. Панель 3

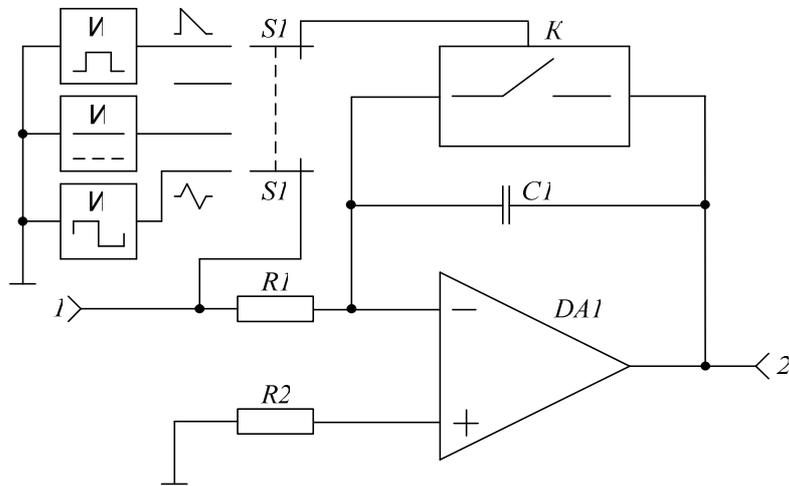


Рис. 5.5. Панель 5.1

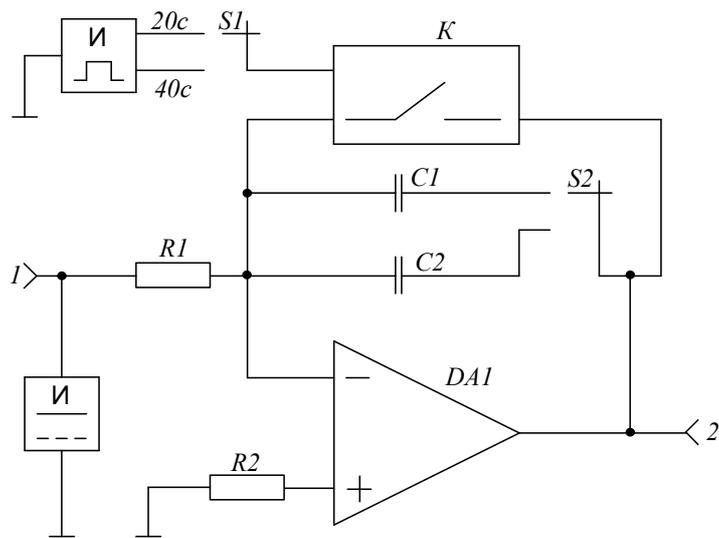


Рис. 5.6. Панель 5.2

Кроме съемных панелей в состав стенда входят:

- два источника сигналов ИСТ.1 и ИСТ.2 для формирования входных сигналов постоянного или переменного напряжения;
- вольтметр $U_{вх}$ для контроля входных напряжений;
- Вольтметр $U_{вых}$ для контроля выходных напряжений;
- Две пары светодиодов «-» и «+», дополняющих вольтметры $U_{вх}$ и $U_{вых}$ для индикации полярности соответственно входного и выходного напряжений;
- блоки 1, 2, 3, 4, 5 с переключателями и гнездами, предназначенные для коммутации исследуемых схем и отдельных элементов этих схем, а также для подключения внешних контролирующих устройств (перечисленные блоки подключаются при установке съемных панелей с номерами, соответствующими номерам этих блоков);
- цифровой счетчик импульсов для контроля длительности временных интервалов (один импульс соответствует интервалу времени длительностью 1 с).

Необходимая схема собирается путем установки на лицевой панели стенда соответствующих съемных панелей и переводом переключателей в блоках 1, 2, 3, 4, 5 в требуемое положение.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикатор «Вкл» – для контроля включения;
- переключатели ИСТ.1 и ИСТ.2 – для подключения вольтметра $U_{вх}$ к выходу одного из двух источников сигналов;
- переключатели «~», «=» в составе источников входных сигналов ИСТ.1 и ИСТ.2 – для выбора вида формируемых сигналов в виде переменного или постоянного напряжения;
- ручки управления источников входных сигналов – для установки величин формируемых напряжений.

Питание стенда осуществляется от сети переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц с помощью специального шнура с вилкой.

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей, и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Установить на стенд съемную панель с заданной для исследования схемой операционного усилителя, выполнить необходимые переключения в соответствующем номеру панели блоке, при необходимости подключить осциллограф.

2.4. Задавая на входы ОУ напряжения постоянного тока выполнить ряд измерений и определить передаточную функцию операционного усилителя в виде $U_{вых} = f(U_{вх1}, U_{вх2})$. Если исследуемая схема имеет один вход, то $U_{вых} = f(U_{вх1})$. Результаты измерений занести в табл. 5.1 – 5.4.

Таблица 5.1

Для ОУ с двумя входами

$U_{вх1}, В$	$U_{вх2}, В$	$U_{вых}, В$	Реализуемая функция

Таблица 5.2

Для ОУ с одним входом

$U_{вх1}, В$	$U_{вых}, В$	Реализуемая функция

Таблица 5.3

Для интегрирующего ОУ

$U_{вх1}, В = \text{const}$	$t, с$	$U_{вых}, В$	Коэффициент пропорциональности

Таблица 5.4

Для дифференцирующего ОУ

$U_{вх1}, В = \text{const}$	$U_{вых}, В$	$\Delta\phi, \text{град}$	Коэффициент пропорциональности

2.5. По виду схемы исследуемого ОУ определить его тип, передаточную функцию, выполнить теоретический расчет выходных напряжений для значений входных сигналов, для которых были выполнены измерения. Сравнить результаты расчета с измеренными данными.

2.6. Подать на вход ОУ сигнал переменного напряжения, и снять осциллограммы входных и выходных напряжений. Если ОУ имеет два входа, на второй вход ОУ подать входной сигнал постоянного напряжения, величина и полярность которого задается преподавателем.

Осциллограммы располагать одну под другой по вертикали в виде временных диаграмм.

Варианты заданий

Название схемы для исследования	Номер варианта задания								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Компаратор	•	•	•						
Неинвертирующий усилитель				•	•	•			
Инвертирующий усилитель							•	•	•
Инвертирующий сумматор	•			•			•		
Генератор пилообразного напряжения		•			•			•	
Интегратор			•			•			•

3. Методические указания к проведению работы

3.1. В соответствии с полученным вариантом задания изучить принцип действия исследуемой схемы на основе ОУ (см. раздел 13 «Усилители электрических сигналов», с. 100 – 112).

3.2. Для выполнения измерений с целью определения передаточной функции ОУ (п. 2.4) использовать встроенные источники напряжения ИСТ.1 и ИСТ.2 и встроенные вольтметры $U_{вх}$ и $U_{вых}$ для измерения напряжений на входе и выходе ОУ. Полярность этих напряжений определять по светодиодным индикаторам «-» и «+».

При исследовании интегрирующего ОУ напряжение $U_{вх1}$ измерять с помощью осциллографа, напряжение $U_{вых}$ измерять с помощью встроенного вольтметра $U_{вых}$, а время в секундах считывать с цифрового счетчика импульсов.

При исследовании дифференцирующего ОУ на вход подавать переменное напряжение, один канал двухлучевого осциллографа подключить ко входу ОУ, а второй – к выходу ОУ. Отсчет амплитуд входного и выходного напряжения ОУ производить по экранной сетке с учетом положений масштабных переключателей по обоим каналам. Сдвиг по фазе между входным и выходным напряжениями также определять по экранной сетке с учетом положения переключателя длительности развертки.

3.3. Для определения типа устройства по виду схемы выполнения теоретических расчетов (п. 2.5) необходимо сравнить исследуемую схему со схемами, приведенными в УМК (см. раздел 13 «Усилители электрических сигналов», с. 100 – 112), взяв оттуда соответствующие расчетные соотношения.

3.4. Для снятия осциллограмм входных и выходных напряжений (п. 2.6) использовать двухлучевой осциллограф, один канал которого подключить ко входу ОУ, другой – к выходу ОУ, и зарисовать полученное изображение, дополнив его обозначенными осями координат.

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы данных по снятым характеристикам и расчету коэффициентов передачи ОУ, записать функции исследуемой схемы ОУ в аналитической форме, зарисовки осциллограмм. Сформулировать основные свойства исследуемой схемы ОУ.

Контрольные вопросы

1. Понятие операционного усилителя (ОУ) и его назначение.
2. Внутренняя структура ОУ и понятие частотной коррекции ОУ.
3. Условные графические обозначения ОУ на схемах.
4. Объяснить характер экспериментальных зависимостей и осциллограмм, полученных в работе.
5. Докажите справедливость коэффициента передачи инвертирующего усилителя.
6. Докажите справедливость коэффициента передачи неинвертирующего усилителя.
7. Докажите справедливость коэффициента передачи инвертирующего сумматора.
8. Докажите справедливость коэффициента передачи интегратора.
9. Изобразите схему повторителя напряжения и докажите, что его коэффициент передачи равен единице.
10. Как получить гистерезисную характеристику у компаратора?
11. Назовите возможные области применения операционных усилителей.
12. За счет чего формируется пилообразное напряжение?
13. Понятие операционного усилителя (ОУ) и его назначение.
14. Внутренняя структура ОУ и понятие частотной коррекции ОУ.
15. Условные графические обозначения ОУ на схемах.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ТРИГГЕРОВ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой и свойствами типовых интегральных логических схем и триггеров.

Основные теоретические положения

Логические элементы (схемы) и триггеры являются типовыми устройствами дискретной (цифровой и импульсной) электроники. С их помощью может быть реализован широкий спектр цифровых устройств от элементарных схем до микропроцессоров и микроЭВМ.

Интегральные логические элементы и триггеры выпускаются в виде интегральных микросхем (ИМС) различных серий, которые отличаются величиной напряжения питания, быстродействием, мощностью.

Логические элементы используются для реализации различных логических операций любой сложности, а также для операции арифметического суммирования.

Триггеры используются для построения регистров и счетчиков импульсов, а также для построения управляющих устройств с памятью.

В данной лабораторной работе исследуются свойства основных типовых логических схем и триггеров в интегральном исполнении, используемых

Устройство, принцип действия, свойства и характеристики основных типовых логических схем и триггеров в интегральном исполнении описано в данном УМК, раздел 14 «Импульсные и цифровые устройства», с. 125 – 131.

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-21 предназначен для исследования типовых интегральных логических схем, триггеров и счетчиков импульсов. В данной лабораторной работе путем установки соответствующих съемных панелей стенд позволяет выполнить исследования следующих типовых интегральных элементов:

- логических элементов *И-НЕ*, *ИЛИ-НЕ* (панель 1);
- логических элементов *И*, *НЕ*, *ИЛИ* (панель 2);
- RS-триггера на логических элементах *И-НЕ* (панель 3);
- JK- и D-триггеров на ИМС типа К155ТВ1 и К155ТМ2 соответственно (панель 4);

Внешний вид используемых съемных панелей приведен на рис. 6.1 – 6.4.

В состав стенда входят:

- источник постоянного регулируемого напряжения U_{ex} , предназначенный для получения плавно регулируемого напряжения в пределах от 0 до +3 В;
- источник уровня «Уровень логический» – предназначен для формирования коротких одиночных импульсов положительной или отрицательной полярности;

- генератор одиночных импульсов «Импульс одиночный» – для формирования коротких одиночных импульсов положительной или отрицательной полярности;
- «Генератор импульсов» – формирует последовательности прямоугольных импульсов с фиксированными частотами: 1, 10 и 100 Гц, 1,10 и 100 кГц;
- устройства коммутации «Логика», «Триггеры», «Счетчики» – для переподключения входных и выходных цепей исследуемых схем к соответствующим гнездам;
- «Счетчик импульсов» с цифровым индикатором – для контроля числа входных импульсов, подаваемых на вход пересчетных схем;
- «Нагрузка» – является эквивалентом подключенных пяти, десяти и пятидесяти входов логических элементов соответственно.

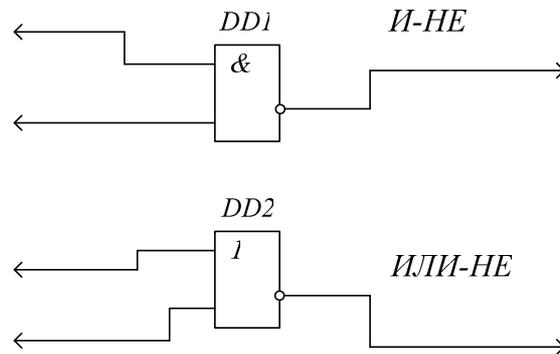


Рис. 6.1. Панель 1

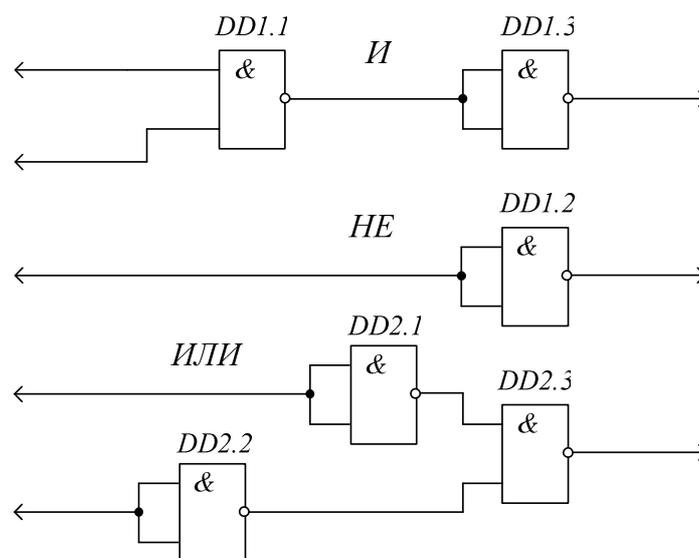


Рис. 6.2. Панель 2

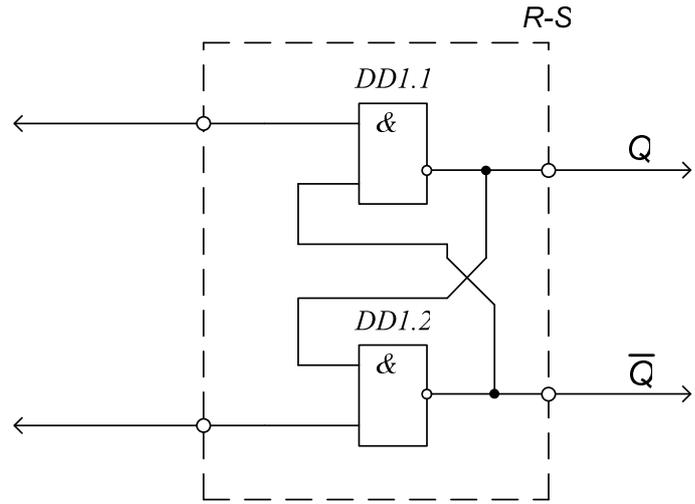


Рис. 6.3. Панель 3

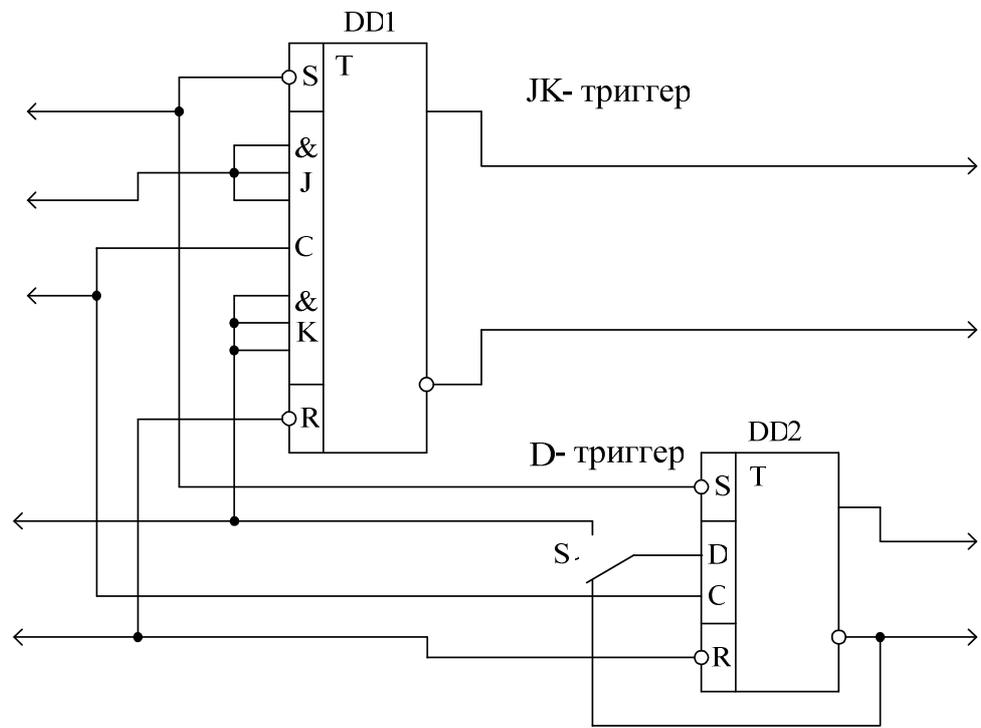


Рис. 6.4. Панель 4

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

- тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;
- индикатор «Вкл» – для контроля включения;
- вольтметр $U_{вх}$ предназначен для измерения величины входного напряжения, подаваемого на вход схемы;

- вольтметр $U_{вых}$ предназначен для измерения величины выходного напряжения, формируемого на выходе схемы;
- ручка $U_{вх}$ служит для установки величины входного напряжения, подаваемого на вход исследуемой схемы (контроль этого напряжения осуществляется по вольтметру $U_{вх}$);
- тумблеры «Уровень логический» служат для выбора логических уровней 0 или 1, подаваемых на входы логических схем;
- кнопка «Импульс одиночный» – при нажатии происходит формирование коротких одиночных импульсов вида: $\sqcap \sqcup$
- переключатели «Логика», «Триггеры», «Счетчик» обеспечивают коммутацию цепей исследуемых схем в соответствии с установленной съемной панелью;
- тумблером «Счет – Уст.0» осуществляется выбор режима работы цифрового индикатора «Счетчик импульсов»;
- лампы индикации 1 – 7 показывают номер подключенной съемной панели;
- светодиоды «Уровень логический», «Импульс одиночный» обеспечивают индикацию логической 1;
- гнезда $U_{вх}$ – с них снимается постоянное регулируемое напряжение от 0 до +3 В;
- гнезда «Уровень логический» – с них снимаются сигналы логических уровней 0 и 1;
- гнезда «Импульс одиночный $\sqcap \sqcup$ » – с них снимаются короткие импульсы положительной или отрицательной полярности для подачи на входы исследуемых схем;
- гнезда «Генератор импульсов» – с них снимаются последовательности прямоугольных импульсов фиксированных частот;
- гнезда «Вход» предназначены для подачи на них необходимых логических уровней или последовательностей импульсов;
- гнезда «Выход» предназначены для подключения приборов контроля или нагрузки;
- гнездо «Вход» счетчика импульсов служит для подачи на счетчик входных импульсов;
- гнезда «Нагрузка» служат для подключения к нагрузке выходных цепей исследуемых схем;
- гнезда « \perp » предназначены для подключения общего провода внешних контролирующих устройств.

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Установить на стенд съемную панель с заданным для исследования набором логических элементов, выполнить необходимые переключения в соответствующем номеру панели блоке.

2.4. Снять и построить передаточные характеристики исследуемых схем (элементов) в виде $U_{вых} = f(U_{вх})$, задавая $U_{вх}$ от источника постоянного регулируемого напряжения в пределах от 0 до +3 В. При этом, если схема (элемент) имеет два входа, то второй вход следует объединить с первым.

2.5. Экспериментально снять таблицы истинности исследуемых логических схем (элементов), задавая на входы (вход) различные комбинации логических уровней, и фиксируя выход. По виду таблицы истинности определить тип логической схемы, и записать алгебрологическое выражение для реализуемой логической функции: $Y = f(X_1, X_2)$ или $Y = f(X)$, если схема одноходовая.

Снять осциллограммы работы исследуемых логических схем (элементов).

2.6. Выполнить оценку нагрузочной способности исследуемых логических схем (элементов) путем подключения к выходу схемы (элемента) различных сопротивлений нагрузки, и определения их работоспособности.

2.7. Исследовать режимы работы и свойства RS-триггера на логических элементах И-НЕ. Определить условия его переключения, режим хранения информации, запрещенную комбинацию входных сигналов. Построить временную диаграмму переключений исследуемого RS-триггера из состояния 0 в состояние 1 с переводом в режим хранения, затем обратное переключение в состояние 0 и тоже с переводом в режим хранения.

2.8. Исследовать режимы работы и свойства D-триггера на ИМС К155ТМ2. Определить условия его переключения, перевода в режим хранения информации, запрещенную комбинацию входных сигналов. Построить временную диаграмму переключений исследуемого D-триггера из состояния 0 в состояние 1 с переводом в режим хранения, затем обратное переключение в состояние 0 и тоже с переводом в режим хранения с использованием входов только D и C.

Определить, при каких условиях D-триггер переходит в режим работы, соответствующий T-триггеру. Изобразить схему и построить временную диаграмму работы D-триггера в режиме T-триггера.

Оценить поведение D-триггера при одновременном воздействии входных сигналов на R и S входы, а также на D- и C-входы.

2.9. Исследовать режимы работы и свойства JK-триггера на ИМС K155ТВ1. Определить условия его переключения, перевода в режим хранения информации, запрещенную комбинацию входных сигналов. Построить временную диаграмму переключений исследуемого JK-триггера из состояния 0 в состояние 1 с переводом в режим хранения, затем обратное переключение в состояние 0 и тоже с переводом в режим хранения с использованием входов только D и C.

Определить, при каких условиях JK-триггер переходит в режим работы, соответствующий T-триггеру. Изобразить схему и построить временную диаграмму работы JK-триггера в режиме T-триггера.

Оценить поведение JK-триггера при одновременном воздействии входных сигналов на R и S входы, а также на D- и C-входы.

3. Методические указания к проведению работы

3.1. В соответствии с полученным вариантом задания изучить принцип действия исследуемых логических схем и триггеров (см. раздел 14 «Импульсные и цифровые устройства», с. 125 – 131).

3.2. Для исследования заданной схемы установить на стенд соответствующую съемную панель, с помощью соединительных проводов выполнить необходимые подключения, переключатели «Логика», «Триггеры», «Счетчик» установить в положение, соответствующее номеру съемной панели, включить стенд.

3.3. Для снятия передаточных характеристик входы исследуемой схемы (элемента) с помощью соединительных проводников необходимо соединить с источником постоянного регулируемого напряжения $U_{вх}$. Выход исследуемой схемы (элемента) также проводником подключить к вольтметру $U_{вых}$. Задавая напряжение $U_{вх}$ от 0 до +3 В с шагом 0,5 В, и затем наоборот (от +3 В до 0), снять зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ для всех исследуемых схем (элементов). Построить графики, определить и обозначить на графике уровни входных напряжений, при которых происходит переключение выходов схем.

3.4. Снятие таблиц истинности исследуемых схем (элементов) производится поочередно. Входы исследуемой схемы с помощью соединительных проводников необходимо соединить с источником сигнала «Уровень

логический». Выход исследуемой схемы (элемента) также проводником подключить к вольтметру $U_{вых}$. Подавая различные комбинации уровней 0 и 1 на входы схемы X_1 и X_2 , отмечать состояние выхода Y . При этом под уровнем 0 для ИМС серии К155 следует понимать напряжение $\leq 0,4$ В, а под уровнем 1 – напряжение $\geq 2,4$ В. Форма таблицы истинности для двухвходовой логической схемы имеет следующий вид (табл. 6.1):

Таблица 6.1

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Число столбцов таблицы истинности должно быть равно числу входов $X_i(n)$ исследуемой логической схемы, а число строк – 2^n .

Алгебροлогическое представление логических функций подробно описано в УМК (см. раздел 14 «Импульсные и цифровые устройства», с. 125 – 131).

Снять осциллограммы работы исследуемых логических схем (элементов) при подаче на один из входов последовательности прямоугольных импульсов от блока «Генератор импульсов». Использовать двухлучевой осциллограф.

3.5. Оценку нагрузочной способности исследуемых логических схем (элементов) производить при снятии осциллограмм путем подключения к выходу схемы переменного сопротивления нагрузки.

3.6. Для исследования RS-триггера R- и S-входы с помощью соединительных проводников соединить с гнездами «Уровень логический». Состояние выходов контролировать с помощью вольтметра $U_{вых}$. Составить таблицу режимов работы RS-триггера в виде (табл. 6.2):

Таблица 6.2

\bar{S}	\bar{R}	Q	\bar{Q}	Режим работы
0	1			
1	1			
1	0			
1	1			
0	0			

На основании полученной таблицы построить временную диаграмму переключений исследуемого RS-триггера из состояния 0 в состояние 1 с

переводом в режим хранения, затем обратное переключение в состояние 0 и тоже с переводом в режим хранения. Графики изменения во времени параметров \bar{S} , \bar{R} , Q и \bar{Q} располагать по вертикали друг под другом. Проверить построенную диаграмму путем переключения сигналов на входах R- и S-триггера и контролируя выходы триггера по вольтметру $U_{вых}$.

3.7. Для исследования D-триггера D-вход соединительным проводником соединить с гнездом «Уровень логический», а С-вход – с гнездом «Импульс одиночный». Состояние выходов контролировать с помощью вольтметра $U_{вых}$. Задавая на D-вход триггера логические уровни 0 и 1 и сопровождая их одиночным импульсом по С-входу (нажать кнопку), составить таблицу режимов работы D-триггера в следующем виде (табл. 6.3):

Таблица 6.3

D	C	Q	\bar{Q}	Режим работы
0	П			
1	П			
0	П			
1	П			

Из полученной таблицы определить условия переключения D-триггера при воздействии сигналов на D- и С-входы.

Построить временную диаграмму переключений исследуемого D-триггера из состояния 0 в состояние 1 и обратно в состояние 0 при использовании входов D и С. Графики изменения во времени параметров D , C , Q и \bar{Q} располагать по вертикали друг под другом. Проверить построенную диаграмму путем переключения сигналов на входах D- и С-триггера и контролируя выходы триггера по вольтметру $U_{вых}$.

Для перевода D-триггера в режим T-триггера необходимо соединить D-вход с инверсным выходом \bar{Q} . При подаче на С-вход одиночных импульсов или последовательности импульсов с гнезда «Генератор импульсов» контролировать выходы в первом случае вольтметром $U_{вых}$, во втором – осциллографом.

Подать сигналы на R- и S-входы и одновременно на D- и С-входы. Комбинацией сигналов R и S обеспечить переключение D-триггера в состояние 0, не меняя сигналы R и S попытаться переключить D-триггер в состояние 1, воздействуя на входы D и C . При этом контролировать состояния выходов D-триггера по вольтметру $U_{вых}$. Установить триггер сигналами R и S в состояние 1. Не меняя сигналы R и S попытаться переключить

чить D-триггер в состояние 0, воздействуя на входы D и C . Опять контролировать выходы. По результатам опыта сделать выводы.

3.7. Для исследования JK-триггера J- и K-входы соединительными проводниками соединить с гнездами «Уровень логический», а C-вход – с гнездом «Импульс одиночный». Состояние выходов контролировать с помощью вольтметра $U_{вых}$. Задавая на J- и K-входы триггера логические уровни 0 и 1 и сопровождая их одиночным импульсом по C-входу (нажать кнопку), составить таблицу режимов работы D-триггера в следующем виде (табл. 6.4):

Таблица 6.4

J	K	C	Q	\bar{Q}	Режим работы
0	0	П			
1	0	П			
0	0	П			
1	1	П			
1	1	П			

Из полученной таблицы определить условия переключения JK-триггера при воздействии сигналов на JK- и C-входы.

Построить временную диаграмму переключений исследуемого JK-триггера из состояния 0 в состояние 1 и обратно в состояние 0 при использовании входов J , K и C . Графики изменения во времени параметров J , K , C , Q и \bar{Q} располагать по вертикали друг под другом. Проверить построенную диаграмму путем переключения сигналов на входах J , K и C JK-триггера и контролируя выходы триггера по вольтметру $U_{вых}$.

Для перевода JK-триггера в режим T-триггера необходимо подать логические сигналы уровня 1 на J- и K-входы одновременно. При подаче на C-вход одиночных импульсов или последовательности импульсов с гнезда «Генератор импульсов» контролировать выходы в первом случае вольтметром $U_{вых}$, во втором – осциллографом.

Подать сигналы на R- и S-входы и одновременно на J-, K- и C-входы. Комбинацией сигналов R и S обеспечить переключение JK-триггера в состояние 0; не меняя сигналы R и S , попытаться переключить JK-триггер в состояние 1, воздействуя на входы J , K и C . При этом контролировать состояния выходов JK-триггера по вольтметру $U_{вых}$. Установить триггер сигналами R и S в состояние 1; не меняя сигналы R и S , попытаться переключить JK-триггер в состояние 0, воздействуя на входы J , K и C . Опять контролировать выходы. По результатам опыта сделать выводы.

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы истинности логических схем (элементов) и таблицы режимов работы триггеров, алгебрологические выражения логических функций, временные диаграммы переключения триггеров. Сформулировать основные свойства исследуемых логических схем и триггеров.

Контрольные вопросы

1. Понятие логических функций, способы их задания и применение.
2. Элементарные логические функции, их алгебрологические выражения и таблицы истинности?
3. Логические функции И-НЕ и ИЛИ-НЕ, формы их представления.
4. Основные законы алгебры логики.
5. Чему равно двойное отрицание?
6. Условные графические обозначения логических элементов.
7. Физическая форма представления логических сигналов.
8. Понятие триггера и его основные свойства.
9. RS-триггер на элементах И-НЕ, его свойства и режимы работы.
10. Интегральный D-триггер, его свойства и условия переключения.
11. Как включить D-триггер в режиме T-триггера.
12. Интегральный JK-триггер, его свойства и условия переключения.
13. Как включить JK-триггер в режиме T-триггера.
14. Применение RS-триггеров, D-триггеров и JK-триггеров.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЕТЧИКОВ ИМПУЛЬСОВ

Цель работы: изучить принцип действия и практически ознакомиться с назначением, работой, свойствами и применением счетчиков импульсов.

Основные теоретические положения.

Счетчик импульсов служит для подсчета импульсов, поступивших на его вход. Счетчики импульсов находят весьма широкое применение в циф-

ровых устройствах, в частности, в измерительных устройствах, микропроцессорах, микроЭВМ, и др.

По виду системы счисления счетчики бывают двоичные и двоично-десятичные. По направлению счета – реверсивные и нереверсивные. Существуют счетчики с параллельным занесением информации и без занесения информации. В настоящее время промышленностью выпускается большой ассортимент различных счетчиков-импульсов в виде интегральных микросхем различных серий. Зная схемотехнику их применения, можно построить любое пересчетное устройство, например, цифровые часы или делитель импульсов.

В данной лабораторной работе исследуются схема и свойства четырехразрядного двоичного счетчика на D-триггерах (ИМС К1555ТМ2) и четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на ИМС К1555ИЕ2.

Устройство, принцип действия, свойства и характеристики двоичных и двоично-десятичных счетчиков в интегральном исполнении описаны в данном УМК (см. раздел 14 «Импульсные и цифровые устройства», с. 131 – 138).

1. Описание лабораторного оборудования

Лабораторный стенд ЭС-21 предназначен для исследования типовых интегральных логических схем, триггеров и счетчиков импульсов. В данной лабораторной работе путем установки соответствующих съемных панелей стенд позволяет выполнить исследования следующих типовых счетчиков импульсов в интегральном исполнении:

- двоично-десятичного четырехразрядного счетчика на JK-триггерах ИМС К155ТВ1 (панель 5);
- двоичного четырехразрядного счетчика на D-триггерах ИМС К155ТМ2 (панель 6);
- двоично-десятичного четырехразрядного счетчика на ИМС К155ИЕ2 (панель 7).

Внешний вид используемых съемных панелей приведен на рис. 7.1 – 7.3.

В состав стенда входят:

- источник постоянного регулируемого напряжения U_{ex} , предназначенный для получения плавно регулируемого напряжения в пределах от 0 до +3 В;
- источник уровня «Уровень логический» – для формирования коротких одиночных импульсов положительной или отрицательной полярности;
- генератор одиночных импульсов «Импульс одиночный» – для формирования коротких одиночных импульсов положительной или отрицательной полярности;

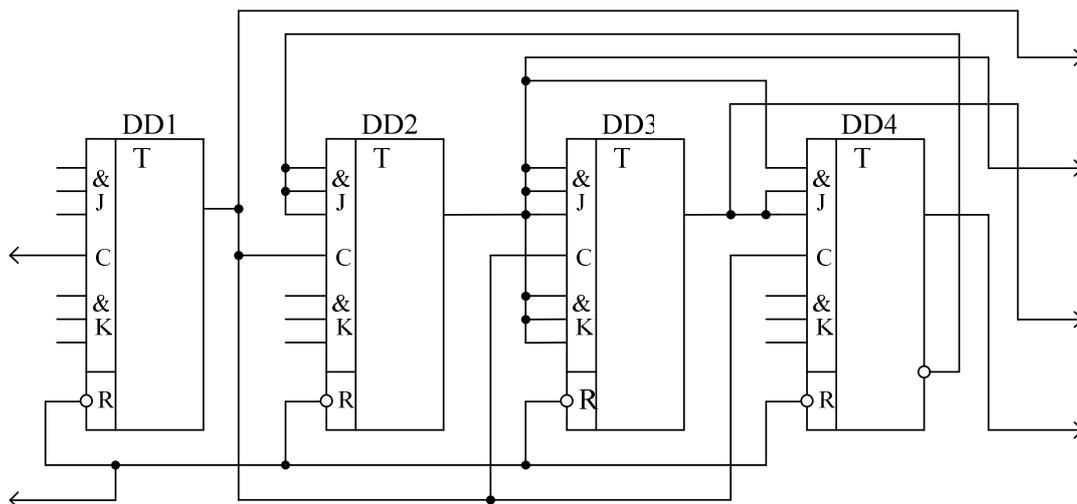


Рис. 7.1. Панель 5

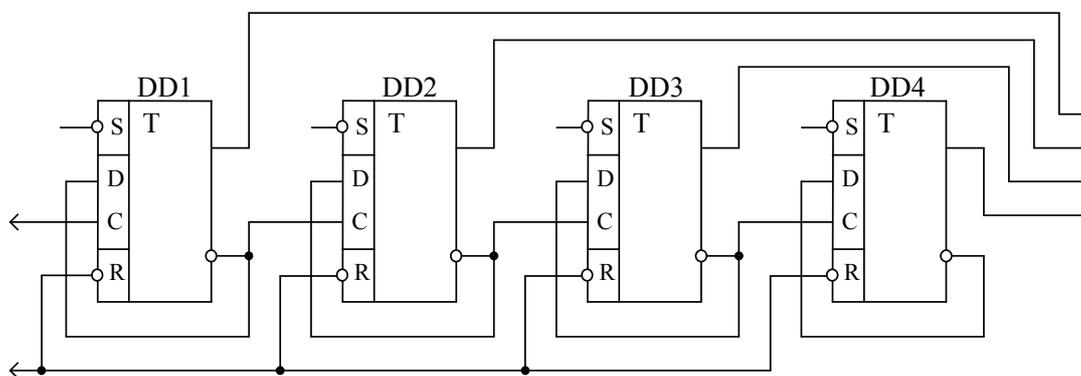


Рис. 7.2. Панель 6

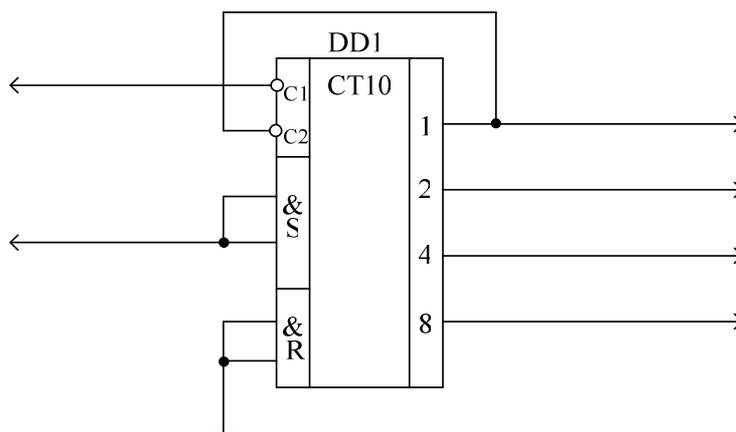


Рис. 7.3. Панель 7

– «Генератор импульсов» – формирует последовательности прямоугольных импульсов с фиксированными частотами: 1, 10 и 100 Гц, 1,10 и 100 кГц;

– устройства коммутации «Логика», «Триггеры», «Счетчики», предназначены для переподключения входных и выходных цепей исследуемых схем к соответствующим гнездам;

– «Счетчик импульсов» с цифровым индикатором предназначен для контроля числа входных импульсов, подаваемых на вход пересчетных схем;

– «Нагрузка» – является эквивалентом подключенных пяти, десяти и пятидесяти входов логических элементов соответственно.

Назначение необходимых органов управления и средств контроля:

– тумблер «Сеть» – для включения и выключения стенда;

– индикатор «Вкл» – для контроля включения;

– вольтметр $U_{вх}$ предназначен для измерения величины входного напряжения, подаваемого на вход схемы;

– вольтметр $U_{вых}$ предназначен для измерения величины выходного напряжения, формируемого на выходе схемы;

– ручка $U_{вх}$ служит для установки величины входного напряжения, подаваемого на вход исследуемой схемы (контроль этого напряжения осуществляется по вольтметру $U_{вх}$);

– тумблеры «Уровень логический» служат для выбора логических уровней 0 или 1, подаваемых на входы логических схем;

– кнопка «Импульс одиночный» – при нажатии происходит формирование коротких одиночных импульсов вида: \square \square

– переключатели «Логика», «Триггеры», «Счетчик» обеспечивают коммутацию цепей исследуемых схем в соответствии с установленной съемной панелью;

– тумблером «Счет – Уст.0» осуществляется выбор режима работы цифрового индикатора «Счетчик импульсов»;

– лампы индикации 1 – 7 показывают номер подключенной съемной панели;

– светодиоды «Уровень логический», «Импульс одиночный» обеспечивают индикацию логической 1;

– гнезда $U_{вх}$ – с них снимается постоянное регулируемое напряжение от 0 до +3 В;

– гнезда «Уровень логический» – с них снимаются сигналы логических уровней 0 и 1;

– гнезда «Импульс одиночный \square \square » – с них снимаются короткие импульсы положительной или отрицательной полярности для подачи на входы исследуемых схем;

- гнезда «Генератор импульсов» – с них снимаются последовательности прямоугольных импульсов фиксированных частот;
- гнезда «Вход» предназначены для подачи на них необходимых логических уровней или последовательностей импульсов;
- гнезда «Выход» предназначены для подключения приборов контроля или нагрузки;
- гнездо «Вход» счетчика импульсов служит для подачи на счетчик входных импульсов;
- гнезда «Нагрузка» служат для подключения к нагрузке выходных цепей исследуемых схем;
- гнезда «⊥» предназначены для подключения общего провода внешних контролируемых устройств.

2. Задания и порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться со схемой лабораторного стенда, расположением элементов схемы. Изучить назначение регулировочных элементов, переключателей и измерительных приборов.

2.2. Изучить порядок включения и настройки осциллографа, назначение регулировочных элементов и переключателей и подключение осциллографа к исследуемой схеме.

2.3. Установить на стенд съемную панель с заданной для исследования схемой счетчика импульсов, выполнить необходимые переключения в соответствующем номеру панели блоке.

2.4. Выполнить экспериментальное исследование четырехразрядного двоичного счетчика на D-триггерах (ИМС К155ТМ2) (съемная панель 6). Выполнить сброс счетчика (установить все разряды счетчика в состояние 0) и путем подачи на вход счетчика одиночных импульсов составить таблицу состояний счетчика, определить коэффициент пересчета счетчика (число различных состояний счетчика), построить временные диаграммы переключений счетчика для всех четырех разрядов.

Подать на вход счетчика последовательность импульсов от «Генератора импульсов» и сравнить осциллограммы переключения триггеров во всех разрядах с построенной временной диаграммой.

Сформулировать основные свойства исследуемой схемы двоичного счетчика.

2.5. Выполнить экспериментальное исследование четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на ИМС К155ИЕ2 (съемная панель 7).

Выполнить сброс счетчика (установить все разряды счетчика в состояние 0) и путем подачи на вход счетчика одиночных импульсов соста-

вить таблицу состояний счетчика, определить коэффициент пересчета счетчика (число различных состояний счетчика), построить временные диаграммы переключений счетчика для всех четырех разрядов.

Подать на вход счетчика последовательность импульсов от «Генератора импульсов» и сравнить осциллограммы переключения триггеров во всех разрядах с построенной временной диаграммой.

Сформулировать основные свойства исследуемой схемы двоично-десятичного счетчика.

3. Методические указания к проведению работы

3.1. Изучить принцип действия исследуемых счетчиков импульсов (см. раздел 14 «Импульсные и цифровые устройства», с. 131 – 138).

3.2. Для исследования заданной схемы установить на стенд соответствующую съемную панель, с помощью соединительных проводов выполнить необходимые подключения, переключатели «Логика», «Триггеры», «Счетчик» установить в положение, соответствующее номеру съемной панели, включить стенд.

3.3. Для исследования четырехразрядного двоичного счетчика на D-триггерах (ИМС К155ТМ2) необходимо вход сброса счетчика (R) соединительным проводником соединить с гнездом «Уровень логический», а вход импульсов счетчика – с гнездом «Импульс одиночный» и с гнездом «Вход» встроенного счетчика импульсов с цифровым индикатором. Состояние разрядов счетчика импульсов контролировать на прямых выходах триггеров каждого разряда с помощью вольтметра $U_{вых}$ или осциллографа. Состояния разрядов счетчика фиксировать в таблице следующего вида (табл. 7.1):

Таблица 7.1

Число входных импульсов	Q_3	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0
1				
2				

Перед началом счета необходимо выполнить сброс счетчика. После подачи на вход счетчика каждого следующего импульса (нажатием кнопки в блоке «Импульс одиночный») контролировать и фиксировать состояния разрядных триггеров. Количество поданных импульсов контролировать по цифровому индикатору счета импульсов. Как только после очередного входного импульса состояние всех разрядов счетчика станет равным 0, формирование таблицы состояний счетчика следует прекратить.

По полученной таблице состояний определить коэффициент пересчета счетчика импульсов (общее число различных состояний) и построить временную диаграмму.

3.4. Исследование четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на ИМС К155ИЕ2 выполняется аналогично п. 3.3.

4. Отчет по работе

По результатам исследований выполнить отчет, на титульном листе которого указать название лабораторной работы, фамилию, и.о. исполнителя, номер группы и дату выполнения.

В отчете вычертить схему исследуемого устройства. Привести таблицы состояний счетчиков импульсов, коэффициенты пересчета, временные диаграммы переключения разрядных триггеров. Сформулировать основные свойства исследуемых счетчиков импульсов.

Контрольные вопросы

1. Понятие счетчика импульсов, его функции, виды счетчиков, их назначение и применение.
2. Схема и принцип действия суммирующего двоичного счетчика импульсов на D-триггерах.
3. Схема и принцип действия вычитающего двоичного счетчика импульсов на D-триггерах.
4. Для чего нужна шина сброса в счетчиках?
5. Схема и принцип действия суммирующего десятичного счетчика импульсов на JK-триггерах.
6. Свойства суммирующего десятичного счетчика на ИМС К155ИЕ2.
7. Какие устройства используются в качестве делителей частоты?
8. Что такое коэффициент пересчета счетчика?
9. Чему равен коэффициент пересчета n -разрядного двоичного счетчика?
10. Где применяются счетчики импульсов?

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе по дисциплине
«ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ»

1. Задание

Разработать принципиальную, полумонтажную и монтажную схемы сверлильного станка, работающего по заданной программе. Выбрать электрооборудование для станка, сечение и марку проводов и кабелей, определить динамические свойства привода.

2. Определение программы работы станка

По цифровому и буквенному коду составляют программу работы станка, т.е. схему движения стола, определяют моменты включения привода главного движения и напряжение питания цепи управления.

Цифра 1 означает движение стола вперед, 2 – одновременное движение вперед и влево, 3 – влево, 4 – влево и назад, 5 – назад, 6 – назад и вправо, 7 – вправо, 8 – вправо и вперед, 0 – остановку стола на 10 с (если 0 – последняя цифра, то после остановки на 10 с станок снова включается по заданной программе); М – рабочий процесс сверления, А – питание схемы управления от сети переменного тока напряжением 127 В, В – постоянного тока напряжением 110 В, С – переменного тока напряжением 36 В, Д – постоянного тока напряжением 24 В.

Например, вариант 0М58В означает, что при нажатии на кнопку «Пуск» стол в течение 10 с должен оставаться неподвижным (первая цифра 0), затем необходимо осуществить процесс сверления (буква М). По окончании рабочего процесса сверления подвижный стол должен переместиться назад (цифра 5) и, достигнув путевого переключателя SQ6, одновременно должен перемещаться в направлении вперед и вправо (цифра 8) до достижения им или SQ4 (или SQ5) и остановиться. Рабочий цикл закончен.

Рабочий процесс сверления предполагает работу привода главного движения и привода подачи в следующей последовательности. Вначале включается двигатель главного движения М1 вращения сверла, после чего без выдержки времени – двигатель М2, который перемещает шпиндель вниз (рабочий ход). Достигая путевого переключателя SQ2, двигатель М2 реверсирует, и вращающееся сверло перемещается вверх до тех пор, пока шпиндель не вызовет срабатывание SQ1. Путевой переключатель SQ1

подает сигнал на завершение процесса сверления, т.е. остановку двигателей М1 и М2.

Сигналы на перемещение стола в каком-либо направлении, его остановку, включение и выключение двигателей М1 – М4 подают переключающие контакты путевых переключателей SQ1 – SQ6, а также реле времени.

Эту программу для наглядности можно условно представить графически. Например, процесс сверления обозначить жирной точкой, остановку стола – кружком, а перемещение стола в том или ином направлении – линией со стрелкой. Так, задание по варианту 0М58В графически изображено на рис. 1.

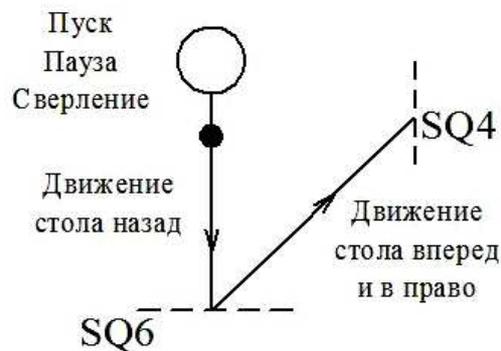


Рис. 1. Условное графическое изображение задания по варианту 0М58В

На пути движения стола необходимо показать те путевые переключатели, которые выдают сигнал на какую-либо коммутацию в электрических цепях. Если стол одновременно перемещается в двух направлениях (например, вправо и вперед), то можно использовать любой из путевых переключателей: или SQ4, или SQ5 в зависимости от того, какого переключателя достигнет стол раньше.

3. Электрооборудование станка

Непосредственно на станке расположены:

- электродвигатель главного движения (вращения сверла) М1;
- электродвигатель подачи (перемещение сверла вниз – вверх) М2;
- электродвигатель перемещения стола в направлении вправо – влево М3;
- электродвигатель перемещения стола вперед – назад М4;
- путевые переключатели SQ1 и SQ2, ограничивающие соответственно верхнее и нижнее положения шпинделя;

- путевые переключатели SQ3 и SQ4, установленные на пути движения стола вправо и влево;
- путевые переключатели SQ5 и SQ6, ограничивающие движение стола в направлении вперед – назад;
- две клеммные колодки (одна – у станка, вторая – в шкафу управления) с многожильным кабелем, связывающим шкаф управления со вспомогательным приводом и путевыми переключателями.

Вне станка расположен шкаф управления с аппаратурой управления, состоящей из семи контакторов KM1 – KM7, служащих для включения и реверсирования всех двигателей; тепловых реле в цепи питания электродвигателей; реле времени; вышеуказанной клеммной колодки; трансформатора и другой аппаратуры, обеспечивающей работу станка по заданной программе.

На рис. 2 и 3 показано расположение электрооборудования на сверлильном станке.

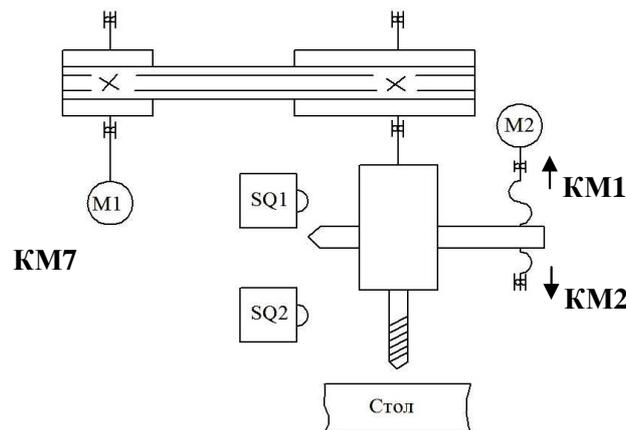


Рис. 2. Расположение электрооборудования привода шпинделя

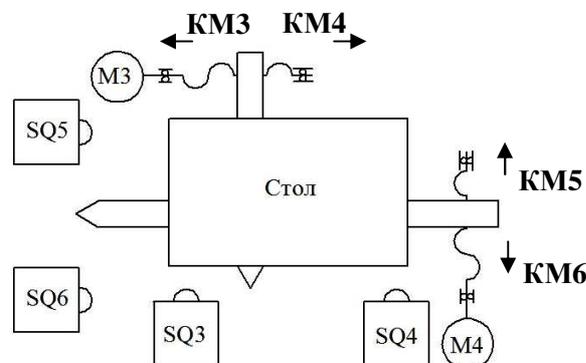


Рис. 3. Расположение электрооборудования привода стола

4. Принцип работы электрической части станка

На рис. 4 показана электрическая схема силовой цепи, а на рис. 5 – схема управления, обеспечивающая работу сверлильного станка по программе 0M58B.

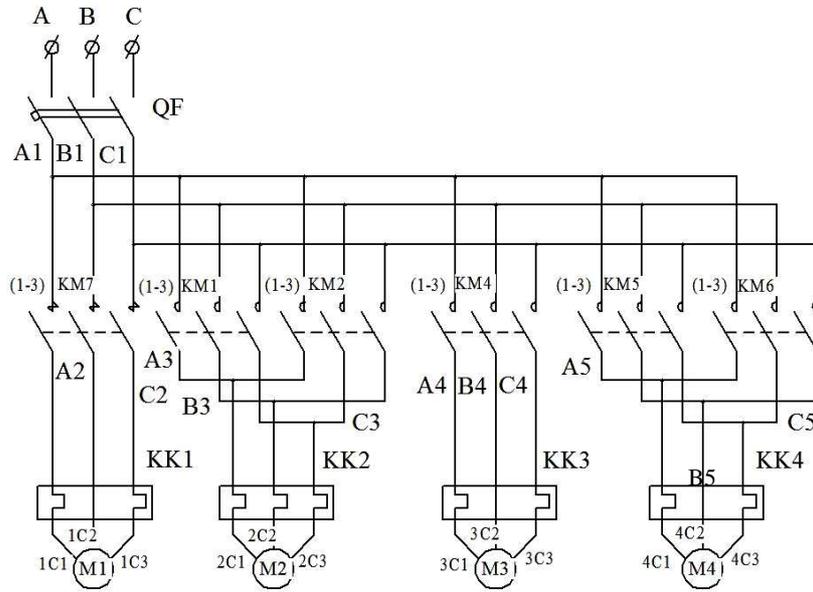


Рис. 4. Электрическая схема силового электрооборудования станка

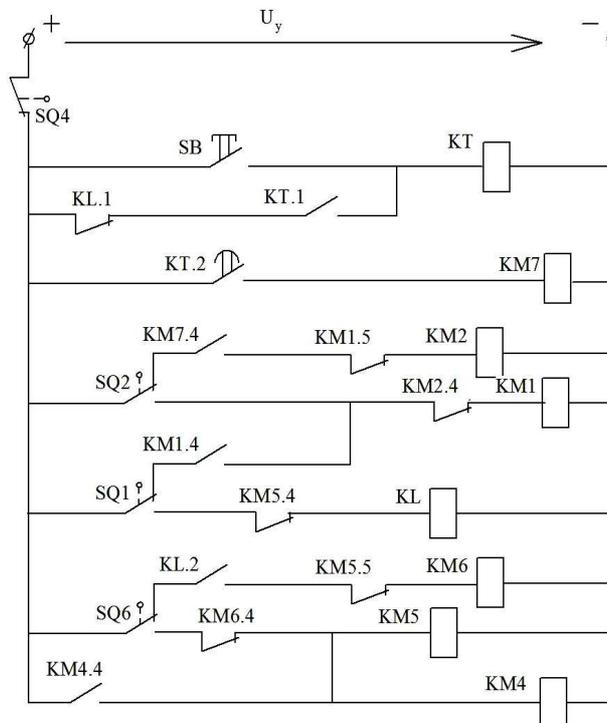


Рис. 5. Электрическая схема управления станком

В исходном положении все контакторы и реле обесточены. Питание их обмоток будет осуществляться через размыкающий контакт путевого переключателя SQ4. При нажатии на кнопку SB «Пуск» подается питание на обмотку реле времени, которое своим контактом КТ.1 включается на самопитание через размыкающий контакт КЛ.1. Через 10 с срабатывает контакт КТ.2 и включает обмотку контактора КМ7. Силовыми контактами КМ.7 (1 – 3) включается асинхронный двигатель М1, который вращает шпиндель станка. Одновременно замыкается слаботочный контакт КМ7.4 и подается питание на обмотку КМ2 через размыкающие контакты SQ2 и КМ1.5. Включается двигатель привода шпинделя М2, который обрабатывает движение сверла вниз, и осуществляется процесс сверления детали. Шпиндель, достигая своего нижнего положения, нажимает на подвижный элемент путевого переключателя SQ2 и вызывает его срабатывание. При этом разрывается цепь питания обмотки КМ2 и включается обмотка контактора КМ1, которая контактом КМ1.4 включается на самопитание через размыкающий контакт SQ1. В силовой части цепи фазы В и С меняются местами и происходит реверсирование двигателя М2. Шпиндель начинает двигаться вверх. Но при этом контакты путевого переключателя SQ2 возвращаются в исходное положение. Однако это не вызовет повторного срабатывания КМ2, т.к. размыкающий контакт КМ1.5 разрывает цепь питания обмотки контактора КМ2.

При своем движении вверх шпиндель, достигнув крайнего верхнего положения, вызывает переключение SQ1. При этом обмотка КМ1 обесточивается, но включается обмотка промежуточного реле КЛ, служащего для размножения контактов SQ1.

Первым контактом КЛ.1 разрывается цепь питания обмотки реле времени, которое, в свою очередь, контактом КТ.2 обесточит контактор КМ7 и прекращается вращение сверла. Вторым контактом КЛ.2 включается обмотка контактора КМ6 через размыкающие контакты SQ6. Контактными КМ.6 (1 – 3) включается двигатель М4, который обрабатывает перемещение стола назад. Достигая путевого переключателя SQ6, стол переключает его контакты и КМ6 обесточивается, но включаются запараллеленные обмотки контакторов КМ5 и КМ4. Замыкание силовых контактов КМ4.(1 – 3) и КМ5.(1 – 3) вызывает одновременное движение стола вперед и вправо. Контакт КМ4.4 включает эти контакторы на самопитание, а контакт КМ5.4 разрывает цепь питания обмотки промежуточного реле КЛ, которое, в свою очередь, контактом КЛ.2 разрывает цепь питания обмотки КМ6, не допуская повторного срабатывания контактора КМ6, когда при своем движении вперед контакт SQ6 возвратится в исходное положение. Наконец, достигая крайнего право-

го положения, стол вызывает срабатывание SQ4, который своим размыкающим контактом обесточивает обмотки контакторов KM4 и KM5.

В окончательном варианте в схеме управления необходимо предусмотреть защиту электродвигателей от перегрузок и от случайных срабатываний обоих контакторов, обеспечивающих реверсирование электродвигателя. В первом случае последовательно с обмоткой контактора необходимо включить размыкающий контакт теплового реле, нагревательные элементы которого включены в цепь питания соответствующего электродвигателя. Во втором случае одновременное срабатывание, например, контакторов KM1 и KM2 вызвало бы короткое замыкание в силовой цепи между фазами В и С. Исключить такую возможность можно, если в цепь питания обмотки первого контактора включить размыкающий контакт второго контактора. И наоборот, в цепь питания второго контактора – размыкающий контакт первого контактора. Схема, дополненная защитой, показана на рис. 6.

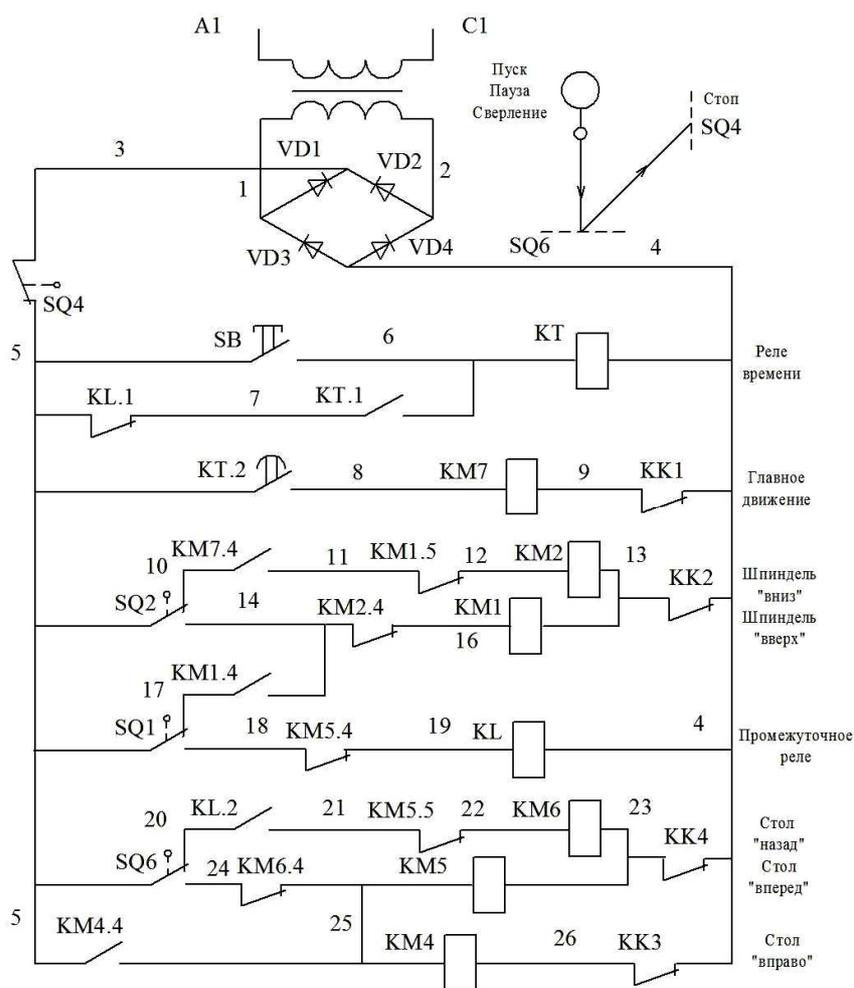


Рис. 6. Схема управления с защитой

5. Методические рекомендации по разработке электрической схемы станка

Электрическая схема станка состоит из двух частей: силовой и схемы управления.

В силовую часть схемы входят цепи питания всех электродвигателей (см. рис. 4). Кроме обмоток электродвигателей здесь расположены силовые контакты контакторов и нагревательные элементы тепловых реле.

Включение станка осуществляется автоматическим воздушным выключателем QF.

Разработку схемы управления следует начинать с команды, подаваемой кнопкой управления SB «Пуск». В соответствии с программой с условным обозначением 0M58B при нажатии на кнопку «Пуск» необходимо создать выдержку времени в 10 с, после чего включается двигатель M1 главного движения. Этот фрагмент программы можно реализовать схемой, приведенной на рис. 7.

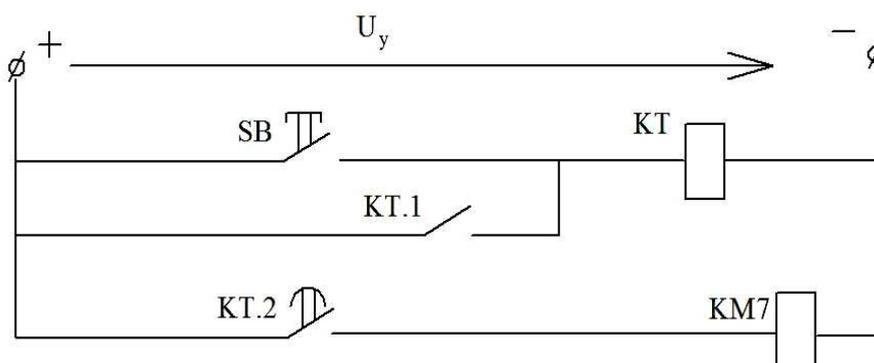


Рис. 7. Фрагмент схемы управления

При нажатии на кнопку SB получает питание обмотка реле времени КТ. Контакт КТ.1 срабатывает без выдержки времени и шунтирует кнопку SB, благодаря чему кнопку можно отпустить, а обмотка реле времени будет запитана через свой замыкающий контакт (реле времени включается на самопитание). Контакт КТ.2 включается через заданное время (10) и подает питание на обмотку контактора КМ7. Силовые контакты этого контактора КМ.7 (1 – 3) включают двигатель вращения сверла.

После включения двигателя главного движения контактом КМ7.4 через замкнутый контакт SQ2 подается питание на обмотку контактора КМ2 (рис. 8). Силовые контакты КМ2.(1 – 3) включают двигатель M2, обрабатывающий движение шпинделя вниз. Шпиндель, достигнув крайнего нижнего

положения, вызывает переключение SQ2, но включается обмотка КМ1. Контакты КМ1.(1 – 3) реверсируют двигатель М2 за счет того, что фазы В и С меняются местами, и шпиндель перемещается вверх.

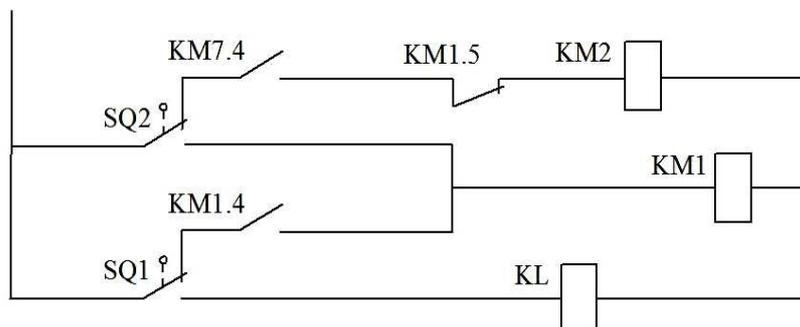


Рис. 8. Фрагмент схемы управления

Так как, перемещаясь вверх, SQ2 возвратится в исходное положение, то необходимо размыкающим контактом КМ1.5 не допустить срабатывание КМ2, а обмотку КМ1 включить на самопитание контактом КМ1.4, который включен последовательно с размыкающим контактом путевого переключателя SQ1. Благодаря этому при достижении шпинделем крайнего верхнего положения обесточивается обмотка КМ1 и двигатель М2 останавливается.

В этот момент при срабатывании SQ1 необходимо отключить двигатель главного движения и включить двигатель М4, который должен обрабатывать движение стола назад. Но т.к. SQ1 имеет только один переключающий контакт, то для размножения контактов необходимо включить промежуточное реле КЛ.

Двигатель главного движения можно отключить, разомкнув цепь питания обмотки КМ7 или обмотки реле времени, дополнив схему (см. рис. 7) размыкающим контактом КЛ.1. Этот контакт показан на общей схеме управления (см. рис. 5). Действительно, если реле времени КТ обесточится, то контакт КТ.2 мгновенно разомкнется и обесточит обмотку КМ7.

Второй контакт промежуточного реле КЛ.2 включает обмотку контактора КМ6 (рис. 9), который своими силовыми контактами КМ6.(1 – 3) включает двигатель М4 (см. рис. 4), обрабатывающий перемещение стола назад.

Но питание контактора КМ6 лучше организовать через размыкающий контакт путевого переключателя SQ6. Когда стол, достигнув положения SQ6, вызовет его срабатывание, то одновременно с отключением обмотки КМ6 включаются две параллельно включенные обмотки контакторов КМ5 и КМ4. В силовой цепи (см. рис. 4) контакты КМ5.(1 – 3) включают двигатель М3. Стол движется вперед и вправо.

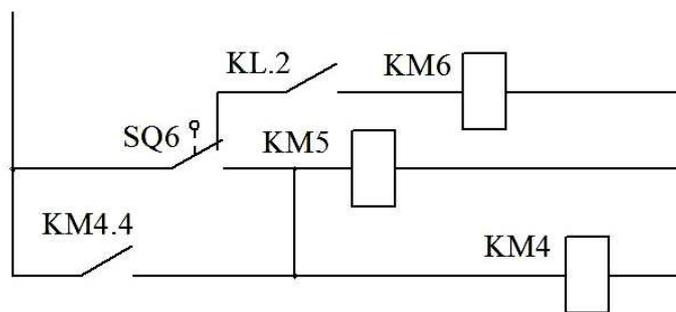


Рис. 9. Фрагмент схемы управления

В этой схеме необходимо включить обмотки KM4 и KM5 на самопитание или замыкающим контактом KM4.4, или контактом KM5. В противном случае контакт SQ6 почти сразу же, возвращаясь в исходное положение, обесточит KM4 и KM5.

Возвращаясь в исходное положение, он включит KM6, т.к. контакт KL.2 остается замкнутым. Чтобы разомкнуть KL.2, необходимо обесточить обмотку KL, например, контактом KM5.4 (см. рис. 5).

Наконец, стол, достигнув путевого выключателя SQ4, обесточит всю схему управления.

Заданная программа работы станка выполнена.

6. Как составить схему соединений (монтажную схему) по принципиальной схеме

Принцип составления монтажной схемы можно пояснить на простой принципиальной схеме.

Пусть требуется составить монтажную схему питания маломощного однофазного электродвигателя, в которой предусмотрена и тепловая, и токовая защита (рис. 10).

Вначале на принципиальной схеме нумеруют участки схемы. В пределах каждого участка не должно быть никаких электрических элементов, кроме соединительных проводов. В данной схеме таких участков 6. На принципиальной схеме цепь питания нагрузки (силовая часть цепи) показана утолщенными линиями.

Затем желательно нарисовать промежуточную полумонтажную схему (рис. 11), в которой электрические элементы располагают так же, как и на принципиальной схеме, но провода на этой схеме должны начинаться и заканчиваться на соответствующих клеммах. Клеммы показаны жирными точками и произвольно пронумерованы арабскими цифрами.

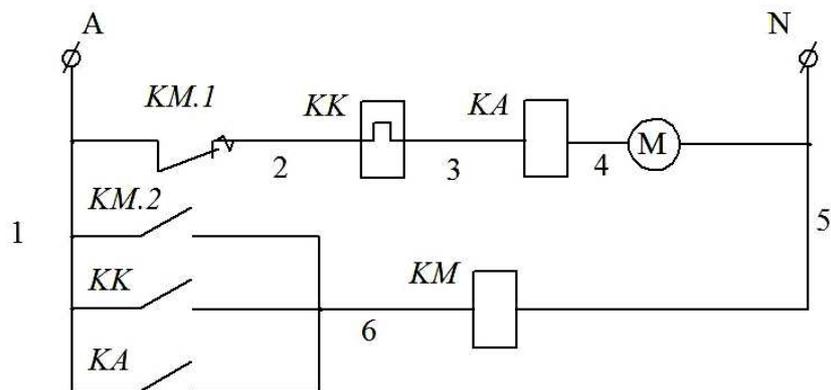


Рис. 10. Принципиальная схема

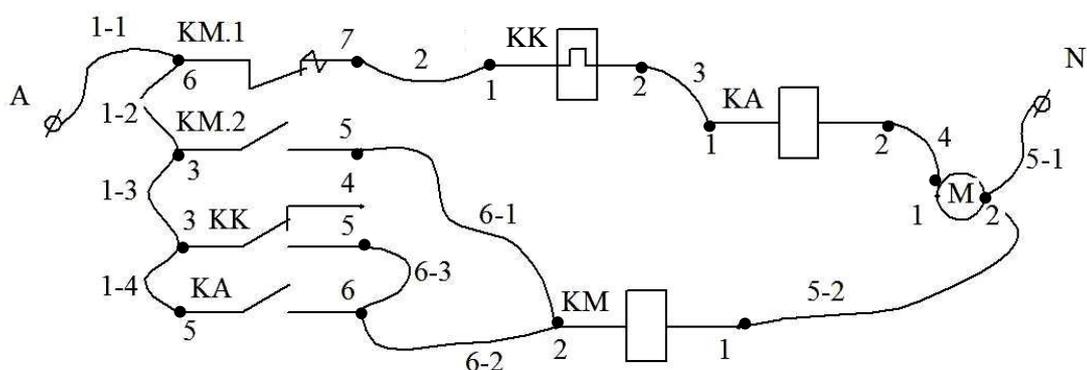


Рис. 11. Полумонтажная схема

Например, чтобы соединить пять клемм, принадлежащих первому участку, необходимо 4 провода, которые должны быть подключены так, чтобы к одной клемме подсоединялось не более двух проводов (присоединение трех и более проводов к одной клемме является нежелательным).

Провода, принадлежащие одному участку, должны быть пронумерованы. Например, 6-2 означает второй провод 6-го участка, 1-3 – первый участок, третий провод.

На монтажной схеме (рис. 12) изображают в виде условных графических обозначений (прямоугольников, упрощенных внешних очертаний и пр.) электрооборудование, причем расположение его должно примерно соответствовать действительному размещению на стенде, в шкафу, на площадке и т.д. При этом необходимо внутри прямоугольников поместить условные графические обозначения элементов, относящихся к данному устройству, аппарату (контакты, обмотки и т.д.), и обозначения промаркированных клемм, к которым подсоединены эти элементы.

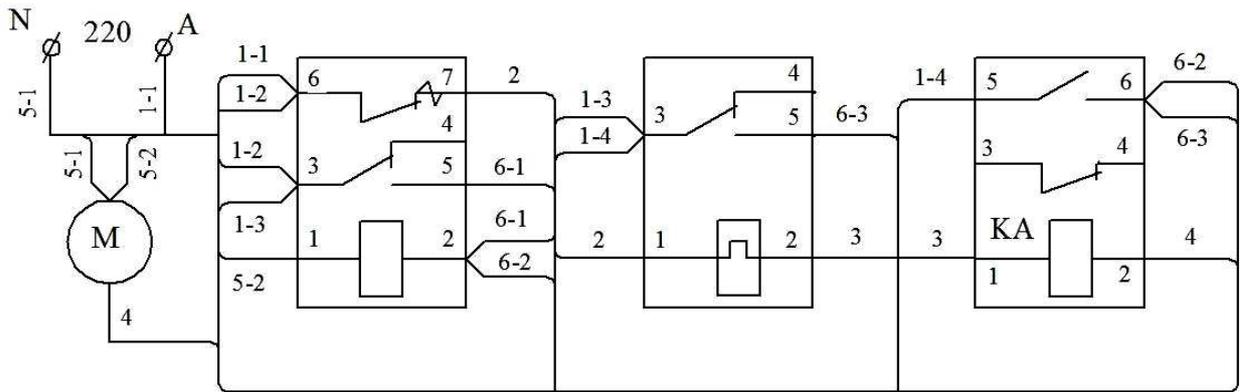


Рис. 12. Монтажная схема

Затем в соответствии с промаркированными проводами и клеммами выполняют монтажную схему. Допускается «сливать» отдельные провода в общую линию, но при подходе к контактам (клеммам) каждый провод изображают отдельной линией.

На практике иногда приходится по монтажной схеме восстанавливать принципиальную. В этом случае вначале необходимо нарисовать полумонтажную, развернутую схему, в которой клеммы источника питания разнесены в пространстве.

На полумонтажной схеме, в отличие от монтажной, элементы данного устройства (контакты, обмотки) могут быть расположены на различных участках схемы.

Затем последовательными упрощениями, т.е. рациональным размещением элементов схемы, приводят ее к принципиальной, по которой легко разобраться в принципе работы этой схемы.

Полумонтажная промежуточная схема удобна при определении неисправности в цепи. Рассмотрим несколько задач.

Задача 1

Как будет работать схема, если по ошибке провод 6-3 подсоединили не к 5-й, а к 4-й клемме КК?

Ответ:

В этом случае вместо размыкающего контакта теплового реле КК включен замыкающий контакт. Это приведет к тому, что при подаче напряжения через этот контакт получит питание обмотка контактора КМ. Контактор сработает и своим замыкающим контактом КМ2 обмотку включит на самопитание, а силовой контакт КМ1 разорвет цепь питания электродвигателя. Двигатель не будет работать.

Задача 2

Как будет работать схема, если провод 5-1 подсоединить не ко 2-й клемме электродвигателя, а к 1-й?

Ответ:

В этом случае клеммы источника питания А и N будут замкнуты накоротко, так как и обмотка теплового реле КК, и обмотка реле тока КА практически не имеют сопротивления. Ток короткого замыкания пройдет по цепи А – провод 1-1 – контакт КМ1 – провод 2 – обмотка теплового реле К – провод 3 – обмотка реле тока КА – провод 4 – провод 5-1 – N. Этот ток может вывести из строя любой (любые) из указанных элементов.

Задача 3

Как будет работать схема, если провод 5-2 ошибочно подключен не ко 2-ой, а к 1-й клемме электродвигателя М?

Ответ:

При подаче напряжения включается электродвигатель, который будет нормально работать. Однако при срабатывании защиты, когда замкнется контакт КК или контакт КА, контактор КМ не сработает, т.к. напряжение между клеммами А и 1-й клеммой электродвигателя, на которую включена обмотка, будет равно практически нулю. Иначе говоря, защита электродвигателя не будет работать.

Следует иметь в виду, что при последовательном соединении обмотки контактора и электродвигателя на какое-либо напряжение практически все напряжение будет приложено к обмотке контактора, т.к. ее сопротивление на несколько порядков выше, чем сопротивление двигателя. При этом контактор нормально сработает, но через обмотку электродвигателя будет проходить очень малый ток, потребляемый обмоткой контактора. Электродвигатель этот ток даже «не почувствует».

Итак, подчеркнем основные правила выполнения схемы соединений (монтажной схемы):

1. На схеме должны быть изображены все устройства и элементы, их зажимы (клеммы), а также соединения между этими устройствами и элементами.

2. Все элементы и устройства изображают в виде условных графических обозначений, прямоугольников или упрощенных внешних очертаний. В последнем случае (внутри прямоугольников) допускается помещать условные графические обозначения элементов.

3. Расположение графических обозначений устройств и элементов (реле, контакторов, путевых переключателей, электродвигателей и т.д.) на

схеме должно примерно соответствовать действительному размещению их на станке и в шкафу управления.

4. Следует указывать обозначения выводов (контактов) устройств и элементов. Если их нет, то допускается условно присваивать им обозначение на схеме (все клеммы должны быть пронумерованы арабскими цифрами).

5. На принципиальной схеме участки цепи должны быть промаркированы. В силовой цепи – буквой L с цифрами. Например, L15, L25, L35 обозначает пятый участок первой, второй и третьей линии. Допускается обозначать участки силовой цепи буквами А, В и С с цифрами, причем входным фазам числовой номер не присваивается. В цепи управления участки цепи маркируются арабскими цифрами.

6. В пределах одного участка не должно быть никаких элементов и устройств. Участки цепи, разделенные контактами аппаратов, обмотками реле, приборов, машин, резисторами и другими элементами, должны иметь разное обозначение.

7. Участки цепи, проходящие через разъемные, разборные или неразборные контактные соединения, должны иметь одинаковое обозначение.

8. Допускается «сливать» отдельные провода или кабели в общую линию, но при подходе к контактам (клеммам) провод и жилу кабеля изображают отдельной линией.

9. Если участок состоит из отдельных проводов, то порядковый номер провода соответствующего участка записывается после обозначения участка через тире арабскими цифрами. Например, 18-2 – второй провод 18-го участка, В3-1 – первый провод фазы В третьего участка.

10. После обозначения провода у выводов (контактов) устройств и элементов необходимо в скобках указать адресное обозначение, т.е. куда поступает данный провод (обозначение устройства и через двоеточие номер контакта). Например, 14-2(КМ2:8) – второй провод 14-го участка поступает на контактор КМ2 и подсоединяется к его восьмой клемме; 2С3 (ХТ 1:9) – провод участка 2С3 (третья клемма второго асинхронного электродвигателя) подключается к 9-ой клемме разборной первой клеммной колодки.

11. Провода, соединяющие маломощные электродвигатели М2, М3, М4 и путевые переключатели, подсоединять к аппаратам в шкафу управления через контакты разборных соединений (клеммные колодки ХТ1 и ХТ2).

В качестве примера показана монтажная схема электрооборудования станка (рис. 13), где путевые переключатели подсоединены к аппаратам в

шкафу управления напрямую, минуя клеммы ХТ1 и ХТ2. В этой части схеме необходимо доработать.

Двигатель М1 привода главного движения связан со своим контактором и тепловым реле с помощью кабеля, минуя клеммные колодки.

На рис. 13 дан пример выполнения схемы соединений по разработанной принципиальной схеме (см. рис. 4 и рис. 6).

7. Выбор мощности электродвигателя

Расчет мощности электродвигателя главного движения выполнить по [6].

Диаметр сверла определить по формуле $d = 10 + 0,5N$, где N – номер варианта или последняя цифра номера зачетной книжки (для студентов-заочников).

Материал заготовки – Ст 45.

По расчетной мощности выбрать тип конкретного асинхронного электродвигателя и записать его паспортные данные:

$$P_n \text{ (кВт)}; n_n \text{ (об/мин)}; U_n \text{ (В)}; M_{\text{макс}} / M_n; M_{\text{пуск}} / M_n.$$

Мощности остальных электродвигателей выбрать произвольно в пределах 0,1 – 0,4 кВт.

Выбрать питающий кабель (марку и сечение проводов) для электродвигателя вращения сверла.

8. Определение времени разгона и остановки электродвигателя

Время разгона и остановки электродвигателя определяют по основному уравнению электропривода

$$M_{\text{вр}} - M_c = J \cdot d\omega / dt.$$

Если $M_{\text{вр}} - M_c$ – величина постоянная в пределах изменения скорости от ω_1 до ω_2 , то, решая дифференциальное уравнение, получим:

$$\Delta t = \frac{J}{M_{\text{вр}} - M_c} (\omega_2 - \omega_1).$$

Если $M_{\text{вр}} - M_c$ изменяется с изменением скорости, то время разгона двигателя определяют приближенно, разбивая механическую характеристику на участки (не менее 4-х), в пределах которых момент усредняют,

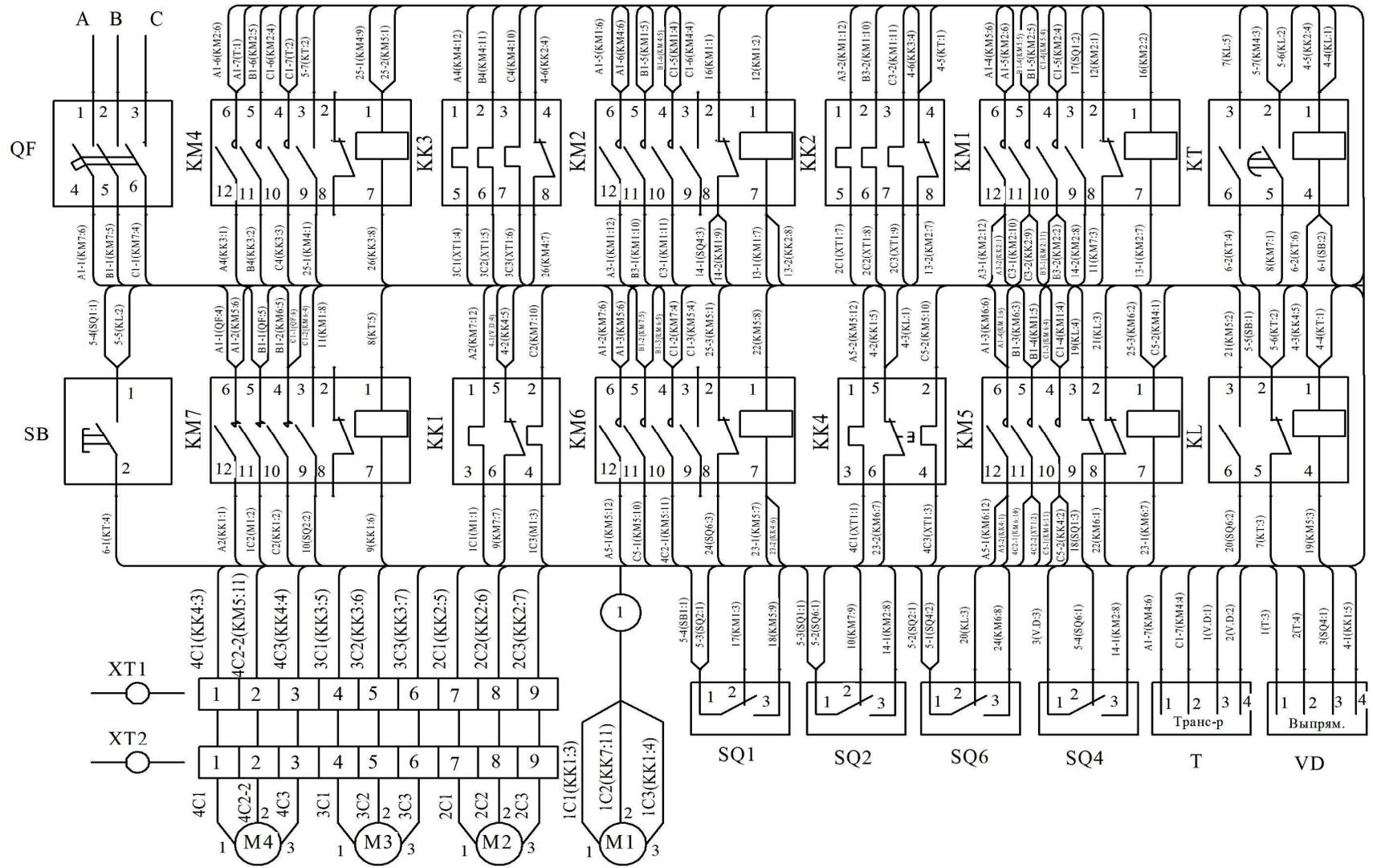


Рис. 13. Монтажная схема

считая его постоянным. Определяют время разгона двигателя на отдельных участках, а затем его суммируют:

$$\Delta t_{разг} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4.$$

По паспортным данным выбранного электродвигателя главного движения строят в масштабе его механическую характеристику (рис. 14).

Разбивают эту характеристику на 4 участка и определяют в пределах каждого участка среднее значение вращающего момента.

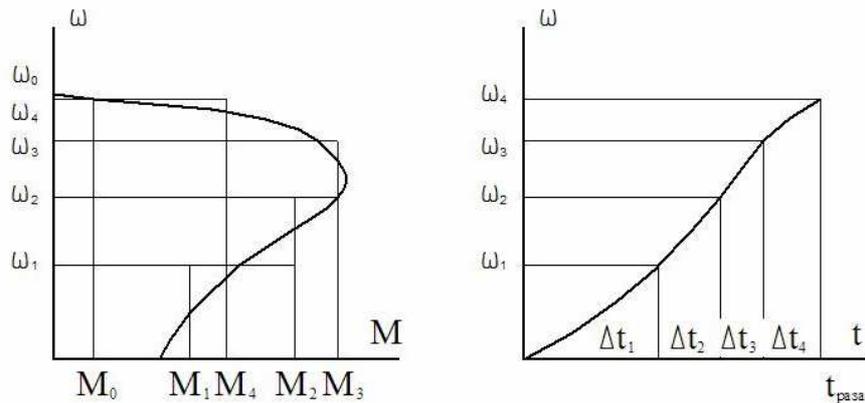


Рис. 14. Механическая характеристика и график разгона электродвигателя

Определяют время разгона двигателя на каждом участке

$$\Delta t_1 = \frac{J}{M_{вр1} - M_c} (\omega_1 - 0),$$

$$\Delta t_2 = \frac{J}{M_{вр1} - M_c} (\omega_2 - \omega_1),$$

и т.д.

Момент инерции всех вращающихся частей станка J , приведенный к валу электродвигателя, считать равным удвоенному моменту инерции ротора электродвигателя (взять по каталогу или подсчитать приближенно по геометрии ротора). Так как двигатель разгоняется на холостом ходу, то момент сопротивления, равный моменту трения вращающихся частей, принять равным 20 % от номинального момента электродвигателя.

Остановка двигателя осуществляется при его вращении на холостом ходу

$$\Delta t_{ост} = \frac{J}{M_c} \omega_4.$$

Начертить в масштабе графики изменения скорости вращения двигателя во времени при пуске и остановке электродвигателя.

Курсовая работа выполняется на листах формата А4 (монтажная схема – А3) и должна содержать:

Лист 1

Расположение электрооборудования привода сверла и стола.

Лист 2

Электрическая схема силовой цепи.

Лист 3

Электрическая схема управления.

Лист 4

Электрическая схема соединений (монтажная схема).

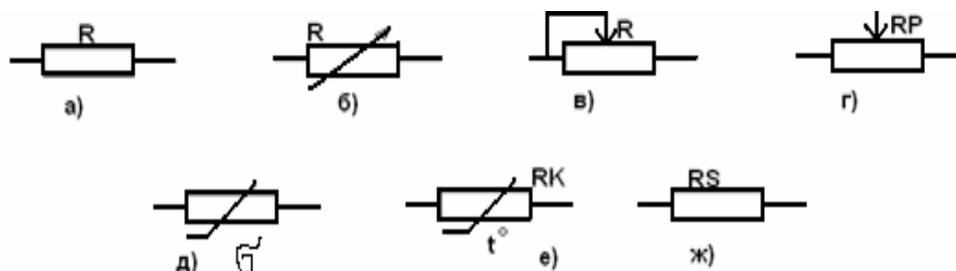
Лист 5, 6

Пояснительная записка с объяснением принципа работы электрической схемы станка, выбора мощности электродвигателя, расчетом времени разгона и остановки электродвигателя сверла.

Лист 7

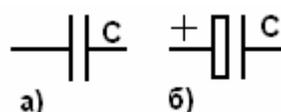
Перечень электрооборудования.

УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ



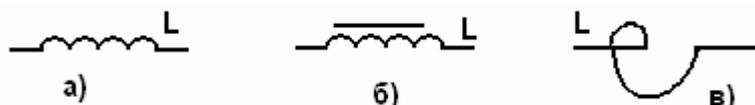
Резисторы R:

a – постоянный; *б* – переменный; *в* – переменный в реостатном включении; *г* – потенциометр; *д* – тензорезистор; *е* – терморезистор; *ж* – шунт измерительный



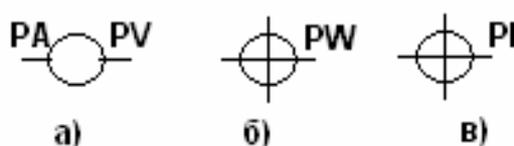
Конденсаторы C:

a – общее обозначение; *б* – электролитический



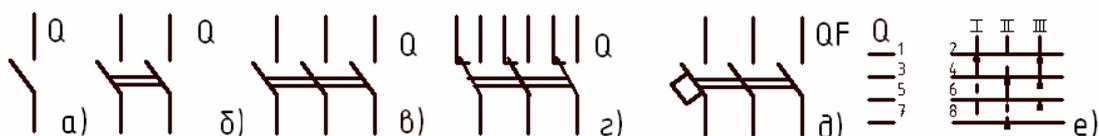
Катушки индуктивности L:

a – без магнитопровода; *б* – реактор, дроссель с магнитопроводом; *в* – реактор



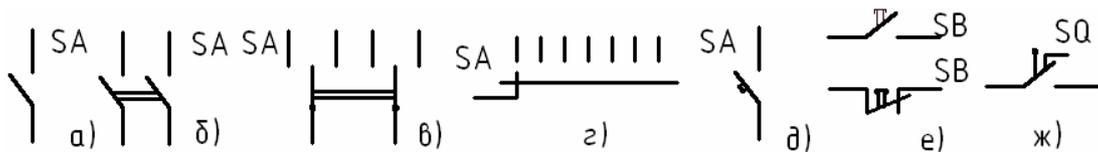
Приборы измерительные P:

a – амперметр PA, вольтметр PV, омметр PR; *б* – ваттметр PW; *в* – счетчик активной энергии PI



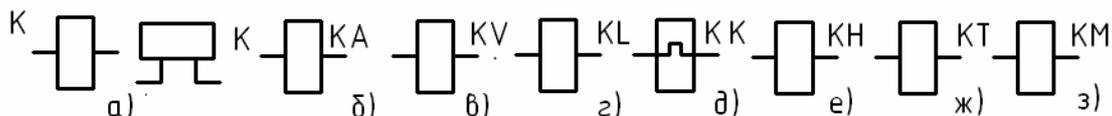
Выключатели в силовых цепях:

a – однополюсный; *б* – двухполюсный; *в* – трехполюсный; *г* – переключатель трехполюсный; *д* – автоматический выключатель (автомат); *е* – пакетный переключатель четырехконтактный, трехпозиционный



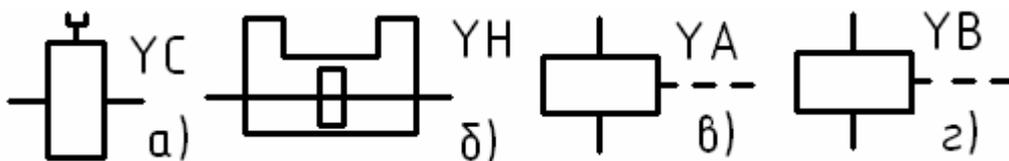
Выключатели, переключатели в слаботочных цепях S:

a – однополюсный; *б* – двухполюсный; *в* – трехпозиционный с нейтральным положением; *г* – однополюсный, многоконтактный; *д* – автоматический выключатель; *е* – выключатель кнопочный с замыкающим и размыкающим контактом; *ж* – переключатель путевой



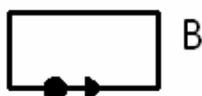
Катушки электромагнитных реле, контакторов К:

a – общее обозначение; *б* – реле тока; *в* – реле напряжения; *г* – промежуточное реле; *д* – тепловое реле; *е* – указательное реле; *ж* – реле времени; *з* – контактор



Устройства механические с электромагнитным приводом (Y – электромагнитные):

a – муфта; *б* – плита; *в* – привод; *г* – тормоз

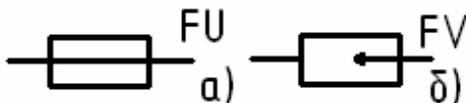


Преобразователи неэлектрической величины в электрическую, датчики B: давления BP; скорости BV; частоты вращения BR; фотоэлемент BL; сельсин BC



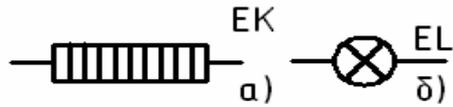
Устройства сигнализаций Н:

a –звонок

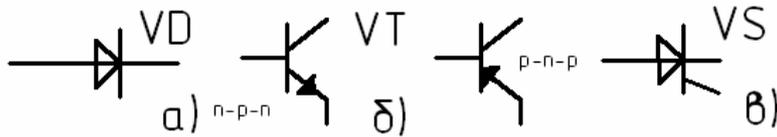


Разрядники, предохранители F:

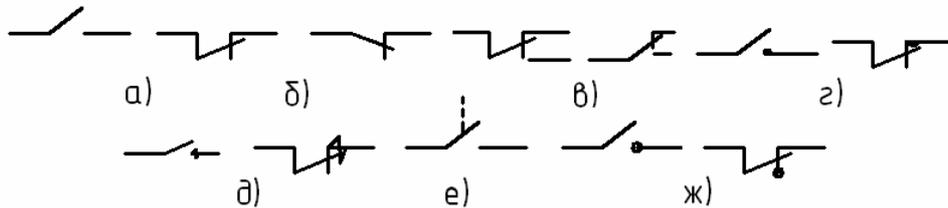
a – предохранитель плавкий; *б* – разрядник



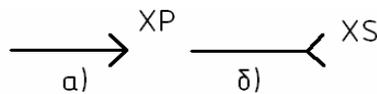
Элементы разные Е:
a – элемент нагревательный; *б* – лампа осветительная



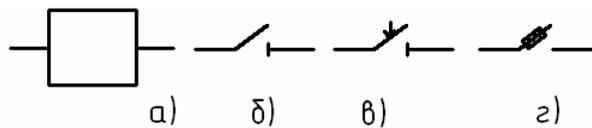
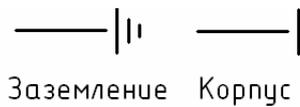
Приборы полупроводниковые V:
a – диод; *б* – транзистор; *в* – тиристор



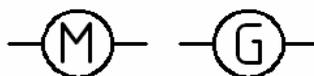
Контакты реле (контактора, тумблера, кнопки):
a – замыкающий; *б* – размыкающий; *в* – переключающий; *г* – силовой;
д – силовой с дугогашением; *е* – с механической связью; *ж* – без самовозврата



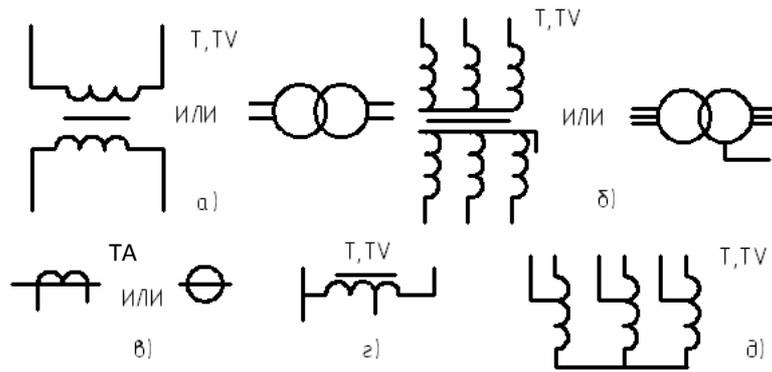
Контактные соединения X:
a – штырь; *б* – гнездо



Высоковольтные выключатели, разъединители:
a – выключатель высокого напряжения; *б* – разъединитель; *в* – короткозамыкатель;
г – выключатель-предохранитель

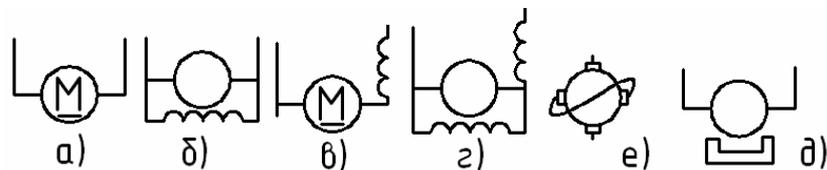


Двигатели M; генераторы G. Общее обозначение



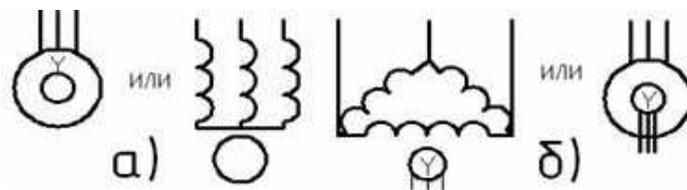
Трансформатор, автотрансформатор Т:

a – однофазный; *б* – трехфазный; *в* – трансформатор тока;
г – автотрансформатор однофазный; *д* – автотрансформатор



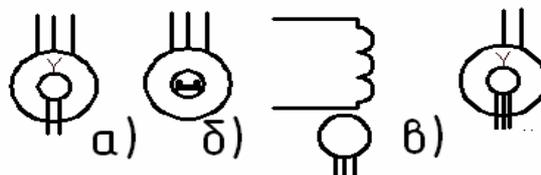
Машины постоянного тока:

a – независимого возбуждения; *б* – параллельного возбуждения; *в* – последовательного возбуждения; *г* – смешанного возбуждения; *д* – с возбуждением от постоянных магнитов; *е* – электромашинный усилитель



Асинхронная машина:

a – с короткозамкнутым ротором; *б* – с фазным ротором



Синхронная машина:

a – с электромагнитным возбуждением; *б* – с возбуждением от постоянного магнита;
в – сельсины (сельсин-датчик, сельсин-приемник)

РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ

Рейтинговая система предполагает непрерывный контроль и оценку знаний студентов в течение всего семестра.

Эффективность этого метода подтверждается практикой ее применения автором в течение более двух десятков лет.

В настоящее время для студентов контроль организован следующим образом.

Успешное выполнение каждой лабораторной работы и решение задачи на практических занятиях оценивается по десятибалльной системе, причем правильное выполнение и оформление работы оценивается 4-мя баллами, а остальные 6 баллов студент может получить при защите этих работ. Этот контроль либо организовывается в виде персонального собеседования по материалу этой лабораторной работы или задачи, либо проводится фронтально и письменно, с использованием тех индивидуальных задач, которые приведены в УМК.

Студентам предлагается выполнить 7 лабораторных работ и 7 практических задач. Максимальное количество баллов, которое может получить студент в семестре, – 140 (без учета дополнительных баллов). На экзамен выносятся два десятибалльных теоретических вопроса. Таким образом, общее количество баллов – 160, из которых 140 студент может получить в течение семестра.

Для большей заинтересованности в прослушивании лекций студенты могут получить дополнительные баллы (максимум 2) при правильном письменном ответе на простой, но персональный вопрос (вариантов, как правило, 24), который предлагается в конце лекции за 10 – 15 минут до конца занятий. Таких контрольных лекционных задач в семестре может быть 6 – 7. Это еще дополнительно 12 – 14 баллов.

Для получения экзаменационной оценки, например, 7, необходимо набрать минимум $0,7 \times 160 = 112$ баллов, 8 – $0,8 \times 160 = 128$ баллов и т.д.

Контроль знаний студента в течение семестра стимулирует регулярные занятия, исключает «лотерею» и значительно повышает эффективность учебного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паначевный, Б.И. Курс электротехники / Б.И. Паначевный. – 2-е изд., дораб. – Харьков: Торсинг, 2002. – 287 с.
2. Китунович, Ф.Г. Электротехника: учебник для вузов / Ф.Г. Китунович. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высш. шк., 1999. – 400 с.
3. Электротехника: учеб. пособие. / А.С. Касаткин [и др.]. – 4-е изд., перераб. – М.: ЭнергATOMиздат, 1983. – 440 с.
4. Липатов, Д.Н. Вопросы и задачи по электротехнике для программированного обучения : учеб. пособие для втузов / Д.Н. Липатов. – М.: Энергия, 1973. – 238 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие для неэлектротехнических специальностей вузов / В.Г. Герасимов [и др.]; под ред. В.Г. Герасимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 286 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Т. 2. – М.: Машиностроение, 1985. – 495 с.
7. Щербаков, И.П. Основы электроники / И.П. Щербаков. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: ЭнергоATOMиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.
8. Гусев, В.Г. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 62 с.
9. МикроЭВМ, микропроцессоры и основы программирования: учеб. пособие / А.Н. Морозевич [и др.]; под общ. ред. А.Н. Морозевича. – Минск: Выш. шк., 1991. – 352 с.
10. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: ЭнергоATOMиздат, Ленинград. отделение, 1988. – 304 с.

Учебное издание

АВДЕЙКО Валерий Порфирьевич
ВЕРШИНИН Александр Сергеевич
АДАМОВИЧ Александр Леонидович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методический комплекс
для студентов технических специальностей
неэлектротехнического профиля

В двух частях

Часть 2

Основы электроники и электропривод

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 19.09.12. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л.16,47. Уч.-изд. л. 16,12. Тираж 30 экз. Заказ 1344.

Издатель и полиграфическое исполнение –
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09

ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.