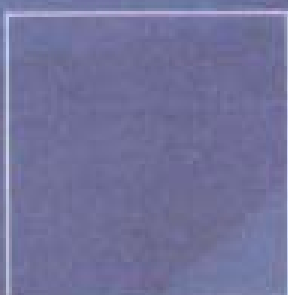


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Гоков А.М., Жидко Е.А.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ИЗДЕЛИЯ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ



4
ЧАСТЬ



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Гоков А. М.
Жидко Е. А.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

ИЗДЕЛИЯ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Учебное пособие
Часть 4

Харьков, Изд. ХНЭУ, 2007

ББК 32.85я73

Г59

УДК 004.08(075.6)

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор кафедры экспериментальной физики Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина *Лойда В. П.*; докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры полупроводниковой и вакуумной электроники Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина *Аржуша Ю. В.*; канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микроселекtronики, электронных приборов и устройств Харьковского национального университета радиоселекtronики *Ланченко А. Ю.*

Рекомендовано к изданию решением ученого совета Харьковского национального экономического университета.

Протокол №1 от 31.08.2006 г.

Гоков А. М.

Г59 Основы электротехники и электроники. Изделия цифровой электроники и электродвигатели. Учебное пособие. Ч. 4 / А. М. Гоков, Е. А. Жидко. – Харьков: Изд. ХНЭУ, 2007. – 284 с. (Русск. яз.)

ISBN 966-676-186-6

Излагаются вопросы, связанные с изучением построения и работы комбинационных цифровых устройств и цифровых автоматов. Изучаются устройства ввода, вывода, преобразования и хранения цифровой информации; принципы построения и функционирования электрических машин постоянного тока, асинхронных и синхронных машин; рассмотрены идеи, лежащие в основе работы электронных систем управления с микроконтроллерами. Излагаются основы теории функционирования систем управления с микроконтроллерами. Приведен широкий круг характерных практических примеров.

Рекомендовано для студентов, обучающихся по профилю компьютеризованных технологий и систем издательско-полиграфического производства, а также для изучающих дисциплину по другим профилям подготовки.

Викладаються питання, пов'язані з вивченням побудови і роботи комбінаційних цифрових пристроїв та цифрових автоматів. Вивчаються пристрої вводу, виводу, перетворення і збереження цифрової інформації; принципи побудови й функціонування електричних машин постійного струму, асинхронних і синхронних машин; розглянуті ідеї, що лежать в основі роботи електронних систем управління з мікроконтроллерами. Викладаються основи теорії функціонування систем управління з мікроконтроллерами. Наведено широке коло характерних практичних прикладів.

Рекомендовано для студентів, що навчаються за профілем комп'ютеризованих технологій і систем видавничо-поліграфічного виробництва, а також для тих, хто вивчає дисципліну за іншими профілями підготовки.

ББК 32.85я73

ISBN 966-676-186-6

© Харьковский национальный
экономический университет, 2007
© Гоков А. М.
Жидко Е. А.
2007

Введение

Достижения в области вычислительной техники, микроэлектроники способствовали развитию и широкому внедрению цифровых методов в области деятельности человека, связанные с извлечением, обработкой, передачей и хранением информации. Эти методы, впервые примененные в вычислительной технике, позволяют с помощью простейших арифметических и логических операций решать необычно широкий круг задач, стоящих перед электроникой. Быстрое совершенствование и удешевление цифровых интегральных схем гарантируют экономическую целесообразность внедрения цифровой техники в различное оборудование, в том числе, в системы управления. Следуя за направлением научно – технического прогресса, отражая тенденции развития элементной базы электроники и ее теоретического арсенала, в этой части дисциплины пойдет, речь о вопросах, посвященных схемотехнической реализации цифровых устройств электронных систем, исполнению типовых электрических двигателей, современным способам управления электродвигателями.

Основой настоящего учебного пособия стал курс лекций по учебной дисциплине «Основы электротехники и электроники» (ОЭЭ), который читается в Харьковском национальном экономическом университете студентам, обучающимся по специальностям 6.092704 «Комп'ютерізовані технології та системи видавничо-поліграфічних виробництв» и 6.092702 «Технологія мультимедійних видань». Для учебного пособия характерно то, что в нем логически продолжается учебный материал, изложенный в первой - третьей частях дисциплины. Это, в первую очередь, определило принцип обора материала и степень детальности освещения. Заметим, что учебное пособие не претендует на всесторонний охват всей проблематики цифровой электроники, хотя оно и рассматривает наиболее важные разделы теории, конкретные вопросы схемотехники.

В этой части дисциплины, которая объединяет и систематизирует наиболее важные принципы в области цифровой электроники, авторы попытались рассмотреть «старые» идеи, основные схемотехнические решения, являющиеся базой современной цифровой электроники на протяжении уже многих лет. При работе над содержанием пособия был сделан упор на фундаментальные знания, которые, как известно, явля-

ются основным достоинством университетского образования. Вместе с тем, учитывая тот факт, что цифровая электроника является отраслью знаний чрезвычайно бурно развивающейся, как в научном, так и в техническом плане, обращая внимание на то, что постоянно появляются новые схемотехнические решения и новая элементная база, авторы, при отборе материала, излагаемого в курсе, стремились и к тому, чтобы он отвечал современным требованиям и практическим задачам, решаемым в настоящее время. По этой причине определенная часть содержания пособия изложена нетрадиционно.

При написании пособия авторы ставили целью четко, строго и логично изложить материал учебной дисциплины в соответствии с современными стандартами высшего образования в Украине.

Учебный материал в пособии излагается с инженерной точки зрения и представлен таким образом, чтобы у студента не возникало необходимости обращаться к дополнительным литературным источникам. Вместе с тем, для самостоятельной работы, расширения и углубления знаний рекомендован широкий список литературы. Приведенные в каждом разделе простые и наглядные примеры и модели, а также широкий круг контрольных вопросов помогут студенту при усвоении учебного материала и приобретении умений самостоятельной работы.

В первом разделе учебного пособия последовательно излагаются вопросы, связанные с изучением принципов построения и работы комбинационных цифровых устройств и цифровых автоматов. Последовательно излагаются принципы построения и структуры самых распространенных цифровых устройств, выполненных на интегральных схемах различной степени интеграции. Рассмотрены типовые схемы шифраторов и дешифраторов, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры и другие устройства комбинационного типа. Часть материала посвящена изучению вопросов функционирования асинхронных и синхронных автоматов, триггеров различного назначения, счетчиков, таймеров, процессоров событий.

Содержание второго раздела посвящено изучению устройств, предназначенных для ввода – вывода цифровой информации, для ее хранения. Поистинно незаменимым для хранения цифровой информации небольших объемов стал регистр. Наряду с ним изучаются устройство и принцип работы различного рода типовых запоминающих устройств, которые служат для приема, хранения и выдачи информации

больших объемов, представленной в виде двоичных кодов. Рассматриваются энергозависимые и энергонезависимые типовые модули памяти, которые обычно встроены в кристалл функционально законченных, программно – управляемых устройств обработки цифровых данных, называемых процессорами. В пособие введены также вопросы, касающиеся устройств аналого – цифрового и цифро – аналогового преобразования информации. Такие модули необходимы для преобразования сигналов с датчиков физических величин в двоичный код, для выработки сигналов воздействия на устройства после их программной обработки в цифровом виде.

Одна из важных задач обучения студентов в первом и втором разделах состоит в том, чтобы обучаемые, используя основные сведения справочного характера, научились воспринимать информацию о функциональных возможностях разнообразных цифровых устройств, об их особенностях, могли понимать назначение выводов интегральных схем.

В третьем и четвертом разделе мы переходим к изучению электрических двигателей, число которых вследствие непрерывного развития промышленных систем автоматизации производства увеличивается с каждым годом, которые потребляют примерно половину всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Изучаются электромеханические свойства типовых двигателей постоянного и переменного тока, их наиболее важные характеристики и параметры. В соответствии с требованиями времени к бережливому использованию электроэнергии в пособии, с общих позиций, рассматриваются современные экономичные способы регулирования скорости электродвигателя.

В подавляющем большинстве современных электроприводов реализовано автоматическое управление с использованием цифровой элементной базы. Поэтому в пятом разделе учебного пособия излагается учебный материал, позволяющий ознакомиться с основами управления электродвигателями. С этой целью излагаются фрагменты теории, положенной в основу функционирования автоматизированных систем управления. Показано, как можно реализовать цифровое управление электродвигателем с использованием микроконтроллера.

Настоящее пособие, как и предыдущие книги по учебной дисциплине, может быть полезно студентам, обучающимся по другим направлениям и специальностям, а также для изучающих одноименную дисциплину по другим профилям подготовки.

Авторы благодарны за конструктивную критику и оказанную помощь в улучшении содержания учебного пособия сотрудникам кафедры физики и электроники Харьковского национального экономического университета (зав. кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент Е.А. Бондаренко).

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам – доктору технических наук, профессору кафедры экспериментальной физики Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина В.П. Пойде; доктору физико-математических наук, профессору кафедры полупроводниковой и вакуумной электроники Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина Ю.В. Аркуше; кандидату физико-математических наук, доценту кафедры микроэлектроники, электронных приборов и устройств Харьковского национального университета радиоэлектроники А.Ю. Панченко за внимательное прочтение рукописи и высказанные полезные замечания.

1. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА И ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТЫ

Как известно основными элементарными «кирпичиками» большинства цифровых устройств являются логические элементы. Из отдельных логических элементов собирают сложные схемы. Такие схемы можно поделить на комбинационные и последовательностные.

У комбинационных блоков состояние их выходов зависит от комбинации логических сигналов на входах в данный момент времени. В начале мы познакомимся с основными представителями комбинационных схем, нашедших наибольшее применение в современной цифровой электронике. Будут рассмотрены шифраторы и дешифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры и схемы сравнения двоичных чисел.

Для построения цифровых систем используются также последовательностные узлы, логическое состояние которых определяется последовательностью поступления входных сигналов. По этой причине мы в дальнейшем приступим к рассмотрению простейших цифровых последовательностных устройств. Мы изучим, как исполнены различные триггеры, счетчики и делители.

1.1. Комбинационные устройства и коммутаторы цифровой электроники

1.1.1. Общие сведения о комбинационных логических схемах

Устройства цифровой электроники предназначены для преобразования и обработки двоичных сигналов. Подобными задачами могут быть преобразование двоичного сигнала, представленного в одном коде, в другой код (например, из десятичного представления в двоично - десятичный), получение информации от нескольких источников в определенной последовательности и очередности, распределение данных нескольким потребителям, проведение сложения нескольких чисел, обнаружение ошибок, возникающих при передаче двоичных чисел и т. п.

Такие цифровые устройства чисто формально можно представить в виде функционального блока, «черного» ящика, имеющего несколько входов и несколько выходов. Внутри такого ящика имеется составленная из логических элементов какая то электронная схема, которая, в соответствии с заданным алгоритмом ее работы, производит преобразование совокупности входных сигналов в выходные. При этом логическое состояние выходов зависит только от комбинации логических сигналов на входах в данный момент времени.

Можно показать, что внутри «черного» ящика при решении указанных задач может находиться только схема, составленная из комбинации логических элементов (ЛЭ) у которых выход «предыдущего» ЛЭ соединен с входом «последующих» ЛЭ. При этом схема построена с соблюдением следующих правил:

А. Выход одного ЛЭ можно подсоединять к входам нескольких других ЛЭ.

Б. На входы ЛЭ можно подавать сигналы «0» и «1», или, соответственно, «низкий логический уровень» и «высокий логический уровень».

В. Выходы ЛЭ нельзя соединять вместе.

Е. Выходы ЛЭ нельзя подключать к собственным входам.

Алгоритм работы комбинационной логической схемы (КЛС) обычно задается двумя способами:

1. Логической функцией, представленной в виде булевого выражения.

2. Таблицей состояний (таблицей работы), в которой количество строк равно количеству возможных входных переменных, а количество столбцов – числу выходных переменных.

Еще раз обратим внимание на то, что логические сигналы на выходах КЛС в любой момент времени однозначно определяются сочетанием сигналов на входах и не зависят от их предыдущих состояний. В этом смысле КЛС это автоматы без памяти.

Если КЛС имеет « m » входов и « n » выходов, то число строк таблицы состояний определяется количеством комбинаций логических переменных -2^m .

Число логических элементов, входящих в КЛС, может, в общем случае, превышать несколько сотен, поэтому, прежде чем создавать принципиальную схему из ЛЭ, для упрощения обычно выполняют минимизацию требуемой логической функции. Для этого используют диаграммы Вейча (карты Карно) или метод Квайна.

Рассмотрим теперь подробнее, как на основе КЛС строятся типовые функциональные узлы цифровой аппаратуры.

1.1.2. Шифраторы и дешифраторы

Одним из распространенных видов преобразования информации в цифровой технике является шифрация и дешифрация.

Шифрацией называется преобразование M - разрядного кода в однозначно соответствующий ему n – разрядный код, имеющий меньшее число разрядов ($n < M$). В результате шифрации осуществляется некое «сжатие» информации для передачи по меньшему числу линий связи.

Шифраторы (называемые также кодерами) это КЛС, которые широко используются в устройствах ввода информации в цифровые системы. К примеру, таким устройством обычно снабжается клавиатура. Каждая клавиша клавиатуры связана с определенным входом шифратора. При нажатии выбранной клавиши подается логический сигнал на соответствующий вход шифратора, и на его выходе возникает двоичное число, соответствующее выгравированному на клавише символу.

На рис. 1.1. показано условное графическое изображение (УГО) шифратора, который преобразует восемь входных сигналов в трех раз-

рядный (трехбитовый) двоичный код.

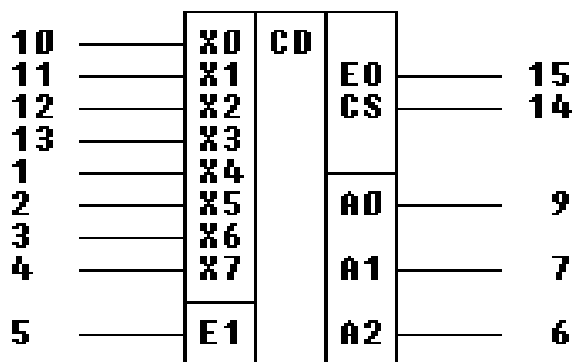


Рис.1.1. Условное графическое обозначение шифратора (кодера) на схемах, который преобразует 8 входных сигналов в трех разрядный двоичный код

В шифраторе имеется $M=8$ входов и $n=3$ выходов. X_0, X_1, \dots, X_7 – входные логические сигналы. A_1, A_2, A_3 – три разряда выходного двоичного кода. Символ CD образован из букв, входящих в английское слово Coder. EI (Enable Input) – сигнал включения шифратора (когда на этом входе низкий уровень шифратор осуществляет преобразование). GS (Group Signal) – сигнал, говорящий о наличии хотя бы одного активного сигнала на входе. EO (Enable Output) – выходной сигнал разрешения, указывающий на отсутствие «возбужденных» входов при включенном состоянии шифратора.

Функционирование шифратора описывается таблицей работы 1.1.

Таблица 1.1.

Таблица работы шифратора

ВХОДЫ									ВЫХОДЫ				
E1	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	A2	A1	A0	CS	E0
H	x	x	x	x	x	x	x	x	H	H	H	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
L	x	x	x	x	x	x	x	L	L	L	L	L	H
L	x	x	x	x	x	x	L	H	L	L	H	L	H
L	x	x	x	x	L	H	H	L	H	L	L	L	H
L	x	x	x	L	H	H	H	H	L	L	L	L	H
L	x	x	L	H	H	H	H	H	L	H	L	L	H
L	x	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H

Активными для данного шифратора на входе и выходе является низкие уровни сигнала L. Напомним, что активный уровень сигнала (0 или 1) это уровень логического сигнала, который производит воздействие на схему. Для указания активных уровней сигналов им присваивают мнемонические (символические) имена, которые состояются из латинских букв, входящих в английские слова, описывающие назначение сигнала. Два уровня напряжения, характеризующие логические состояния, определяются просто как высокий H (от англ. high - высокий) или низкий (low - низкий). Сигнал, к примеру, E1 (Enable Input), как следует из символического обозначения, предназначен для включения шифратора. Если в какой либо точке схемы его активный уровень высокий (логическая 1), то в этой точке он обозначается через E1, а если активный уровень его низкий (логический 0), то через $\bar{E1}$.

На рис.1.2. показана схема шифратора, который преобразует 10 входных сигналов в четырех разрядный двоичный код. Активными для данного шифратора на входе и выходе также являются низкие уровни сигнала. X₀, X₁, ... X₇ – входные логические сигналы. A₁, A₂, A₃, A₄ четыре разряда выходного двоичного кода

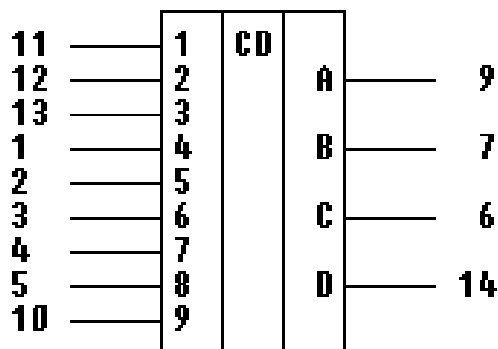


Рис.1.2. Условное графическое обозначение шифратора (кодера) на схемах, который преобразует 10 входных сигналов в четырех разрядный двоичный код

Таблица 1.2.

Таблица работы шифратора

ВХОДЫ									ВЫХОДЫ			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	D	C	B	A
Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
х	х	х	х	х	х	х	х	х	L	L	Н	L
х	х	х	х	х	х	х	х	L	Н	L	Н	Н
х	х	х	х	х	х	х	L	Н	Н	Н	L	L
х	х	х	х	х	L	Н	Н	Н	Н	L	L	Н
х	х	х	х	L	Н	Н	Н	Н	Н	L	Н	L
х	х	х	L	Н	Н	Н	Н	Н	Н	L	Н	Н
х	х	L	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	L	L
х	L	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	L	Н
L	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	L

Функционирование шифратора описывается таблицей работы 1.2.

Для обратного преобразования двоичных чисел в небольшие по значению десятичные числа используются КЛС - дешифраторы (называемые также декодерами). Входы дешифратора предназначаются для подачи двоичных чисел, выходы последовательно нумеруются десятичными числами. При подаче на входы двоичного числа появляется сигнал на определенном выходе, номер которого соответствует входному числу. При $n=2^M$ дешифратор называется полным.

Дешифраторы имеют широкое применение. В частности, они используются в устройствах, печатающих на бумаге выводимые из цифрового устройства числа или текст. В таких устройствах двоичное число, поступая на вход дешифратора, вызывает появление сигнала на определенном его выходе. С помощью этого сигнала производится печать символа, соответствующего входному двоичному числу. Дешифраторы входят также в состав микросхем памяти для выборки одной из множества ячеек. Они применяются также в коммутаторах, обеспечивая включение в каждый момент времени только одного устройства.

На рис.1.3. показано УГО дешифратора, который преобразует четырехразрядный (четырёхбитовый) двоичный код в десять выходных сигналов. В дешифраторе имеется $M=4$ входов и $n=10$ выходов, пронумерованных десятичными числами. Он может быть применен для того, чтобы обеспечить индикацию или печать двоично – десятичных чисел. Это неполный линейный дешифратор ($2^4=16$). Символ DC образован из букв, входящих в английское слово Decoder.

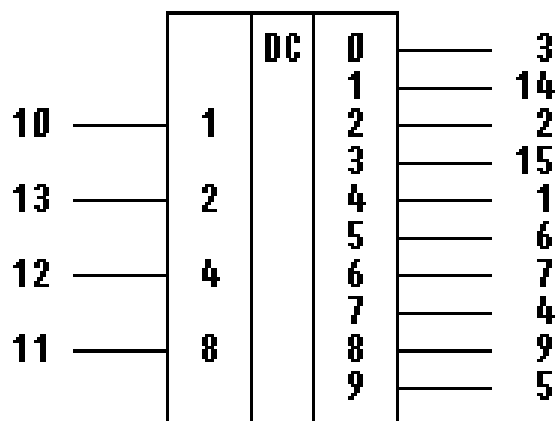


Рис.1.3. Условное графическое обозначение дешифратора (декодера) на схемах, который преобразует четырехразрядный двоичный код в 10 выходных сигналов

Функционирование дешифратора описывается таблицей работы 1.3.

Таблица 1.3

Таблица работы дешифратора

Входы				Выходы									
8	4	2	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Появление логической единицы на соответствующем выходе можно использовать для замыкания электрической цепи, в которую включены индикаторное устройство или обмотка реле цифропечатающего устройства.

Для реализации более сложных схем дешифраторов используют много ступенчатые схемы.

Для перевода двоичных чисел из одной формы представления в другую широко используют КЛС, называемые преобразователями кодов. Их используют при выводе информации на индикаторные устройства (средства представления информации) или печатающие устройства, когда двоичные или двоично – десятичные числа преобразуются коды, необходимые для того чтобы светились требуемые элементы светодиодных и жидкокристаллических индикаторов, чтобы работали «элементы» печатающих устройств.

Широко распространенным типом КЛС, выпускаемых в виде отдельной микросхемы, являются дешифраторы двоично - десятичных кодов в семисегментный код. Такие дешифраторы применяются в устройствах визуальной индикации десятичных цифр на световых табло. В частности, сейчас широко используются семисегментные светодиодные и жидкокристаллические индикаторы. В них индикация осуществляется семью светящимися «полосками». Подавая управляющие напряжения

(логические сигналы) на отдельные полоски и вызывая их свечение (в жидкокристаллических индикаторах изменяя окраску) можно получить изображение десятичных цифр (рис.1.4).

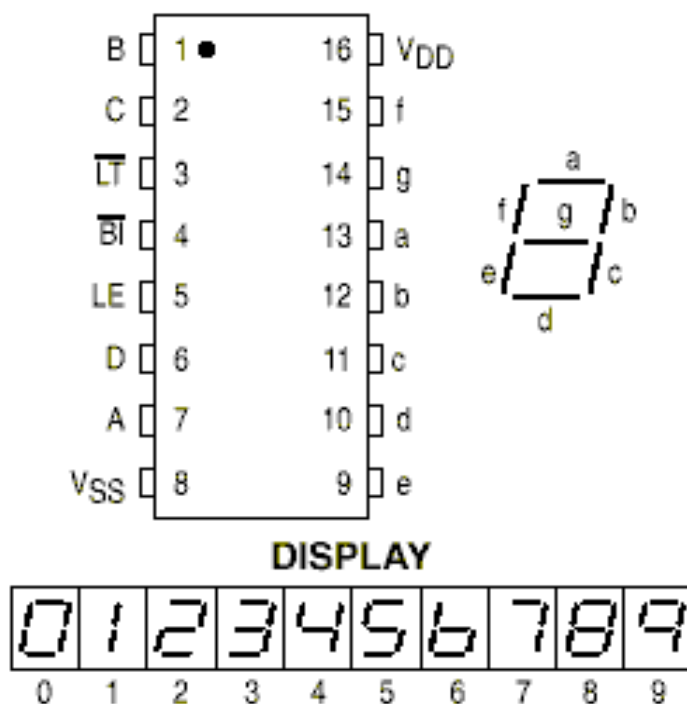


Рис.1.4. Изображение микросхемы дешифратора, который преобразует двоично - десятичный в семисегментный код, и формируемое изображение цифр

Функционирование дешифратора описывается таблицей работы 1.4. Для увеличения функциональных возможностей в схему дешифратора вводят несколько дополнительных выводов. Например, вывод LT, служит для проверки работоспособности микросхемы. Если на LT, подать «0», то на всех выходах будет присутствовать высокий уровень и получим цифру 8. Если на BI подать «0», то на всех выходах будет присутствовать низкий уровень и свечения полосок не будет. Это удобно использовать для «гашения» свечения не нужных цифр в многозарядных индикаторах. Если на входе LE (разрешения свечения) присутствует низкий уровень сигнала, то происходит дешифрация сигнала, в противном случае дешифратор не работает.

Таблица 1.4.

Таблица работы дешифратора

Inputs							Outputs							
LE	BI	LT	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g	Display
X	X	0	X	X	X	X	1	1	1	1	1	1	1	8
X	0	1	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	Blank
0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	2
0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	3
0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	4
0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	6
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	7
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	8
0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	9
0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Blank
0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	Blank
0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Blank
0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	Blank
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	Blank
1	1	1	X	X	X	X			*					*

1.1.3. Мультиплексоры и демультиплексоры

В цифровой электронике часто возникают задачи преобразования параллельных цифровых кодов в последовательные, передачи цифровой информации от «m» различных источников к «n» приемникам через один канал общего пользования (к примеру, информации, что поступает по нескольким шинам, в одну линию). Для этого на входе канала устанавливается КЛС, которая последовательно «опрашивает» источники информации и подключает к выходу КЛС один из источников информации, согласно коду адреса источника в данный момент. Устройство, которое осуществляет выборку одного из нескольких входов и подключает его к своему выходу, называется мультиплексором. Мультиплексор можно уподобить бесконтактному многопозиционному переключателю.

Мультиплексор (MUX – Multiplexer) $2^n \rightarrow 1$ или 2^n – канальный мультиплексор является коммутатором 2^n информационных сигналов DI (Data Input) на один выход DO (Data Output) в соответствии с адресными

сигналами A (A- Address). Каждому информационному входу присваивается номер, называемый адресом. Выбор входа обычно осуществляется посредством двоичного кода адреса $\{A_{n-1}A_{n-2} \dots A_0\}$.

Логическая функция:

$$DO = D_1(\bar{A}_1\bar{A}_0) \vee D_2(\bar{A}_1A_0) \vee D_3(A_1\bar{A}_0) \vee D_4(A_1A_0), \quad (1.1)$$

описывает работу мультиплексора на четыре информационных входа при двух адресных переменных A1, A0. Реализация данного выражения в виде таблицы работы представлена в таблице 1.5.

Таблица 1.5.

Таблица работы изделия

A ₁	A ₀	DO
0	0	D1
0	1	D2
1	0	D3
1	1	D4

УГО мультиплексора 4 → 2 на четыре информационных входа и на 2 выхода показано на рис. 1.5.

Для увеличения функциональных возможностей мультиплексоров и обеспечения их каскадирования вводятся управляющие сигналы разрешения V1 и V2 и сигналы стробирования S1 и S2. Функционирование такого мультиплексора представлено в таблице 1.6.

Мультиплексоры, выпускаемые в виде ИС, имеют число информационных входов, которое редко превышает 16. Число информационных входов может быть увеличено. Нарастивать число входов можно объединением нескольких мультиплексоров. На рис. 1.6 показанный вариант мультиплексора 32:1 полученный на основе мультиплексоров 8:1 и 4:1, соединенных как говорят пирамидально.

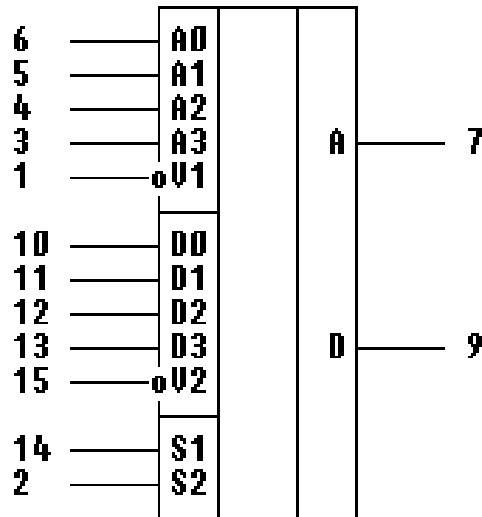


Рис.1.5. Условное графическое обозначение мультиплексора 4→2 на четыре информационных входа и два выхода на схемах

Таблица 1.6

Таблица работы мультиплексора

		Входы					Выход
S1	S2	0	1	2	3	V	
X	X	X	X	X	X	H	L
L	L	L	X	X	X	L	L
L	L	H	X	X	X	L	H
H	L	X	L	X	X	L	L
H	L	X	H	X	X	L	H
L	H	X	X	L	X	L	L
L	H	X	X	H	X	L	H
H	H	X	X	X	L	L	L
H	H	X	X	X	H	L	H

Недостатками пирамидального наращивания является повышенная затрата микросхем и малое быстродействие при последовательном прохождении сигналов по «ступеням пирамиды».

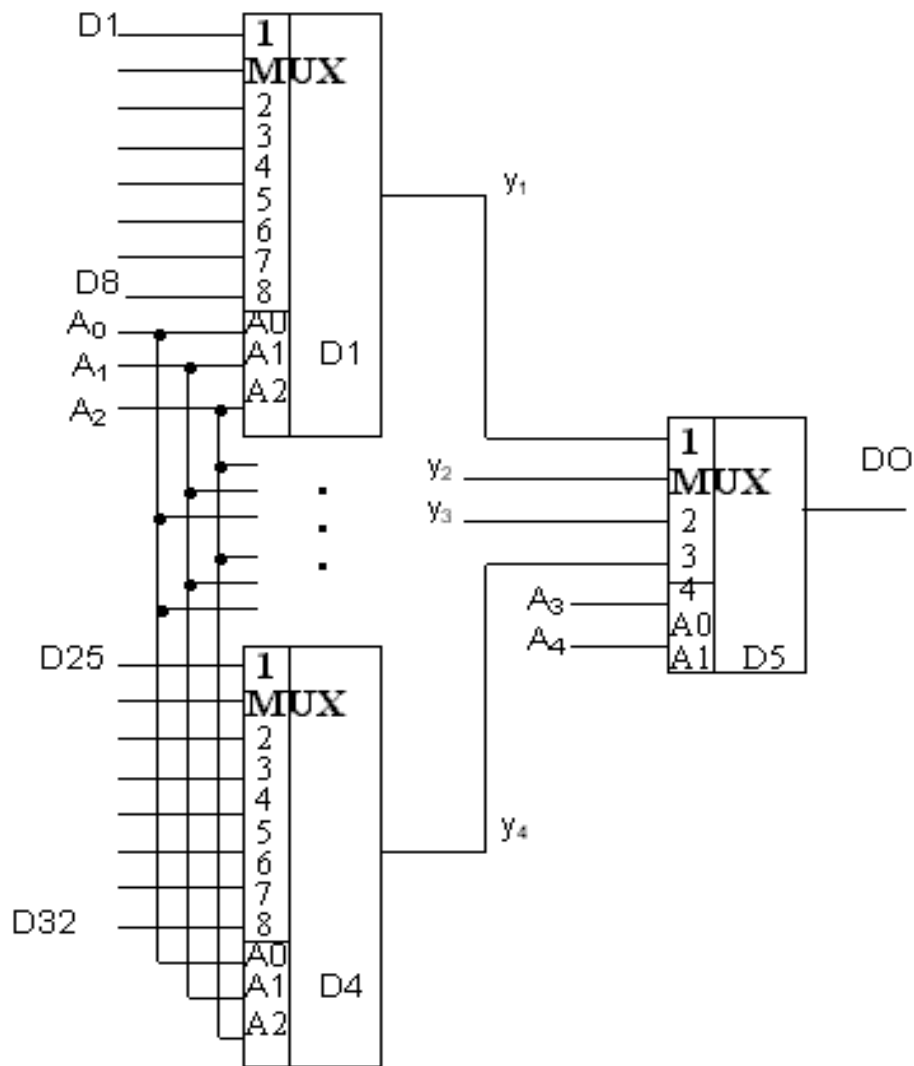


Рис.1.6. Схема мультиплексора 32→1, полученная соединением мультиплексоров «пирамидально»

Выигрыш в быстродействии может дать параллельное соединение мультиплексоров, как показано на рис.1.7.

Мультиплексоры, выпускаемые промышленностью, могут иметь три состояния выхода. При третьем (высокоимпедансном) состоянии выхода TS- (TS- Three- state Output), Z – состоянии мультиплексор имеет высокоомный выход, что позволяет увеличивать его функциональные возможности.

В иностранной литературе мультиплексоры называют селекторами – мультиплексорами данных (Data Selector/Multiplexer). Это более длинный термин и использовать его не очень удобно.

Демультимплексоры (DMX – Demultiplexer) в функциональном отношении противоположны мультиплексорам. Они имеют один информаци-

онный вход и несколько выходов. Коммутация входного сигнала DI (Data Input) на желаемый выход DO (Data Output) осуществляется, как и в мультиплексоре, посредством кода адреса $A_{n-1}A_{n-2} \dots A_0$.

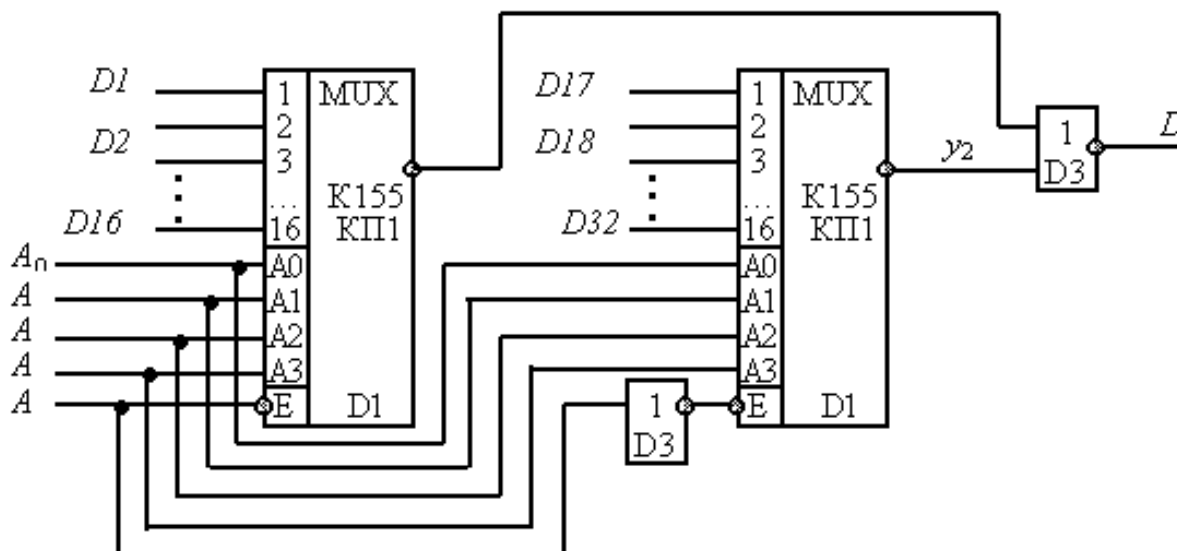


Рис.1.7. Схема мультиплексора 32 → 1, полученная соединением мультиплексоров параллельно

Работа демультиплексора на четыре выхода представлена таблицей 1.7

Таблица 1.7.

Таблица работы демультиплексора на четыре выхода

A1	A0	DO1	DO2	DO3	DO4
0	0	DI	0	0	0
0	1	0	DI	0	0
1	0	0	0	DI	0
1	1	0	0	0	DI

Нетрудно убедиться, что она, собственно говоря, не отличается от таблицы истинности дешифратора, если адресные входы сделать ин-

формационными, а на прежний информационный вход D1 подать постоянно уровень U1.

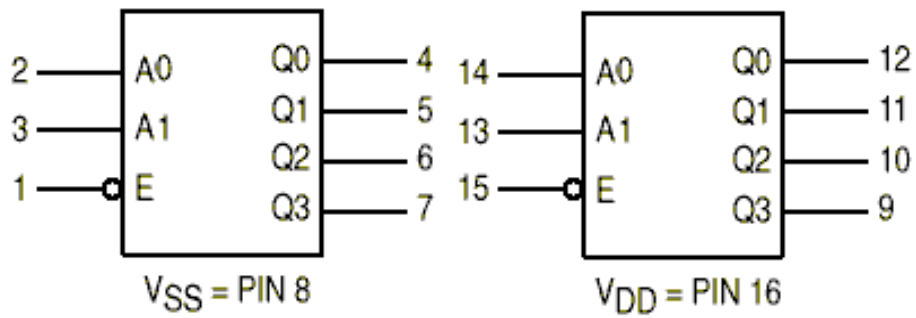


Рис.1.8. Схема дешифратора - демультиплексора 2 → 4,

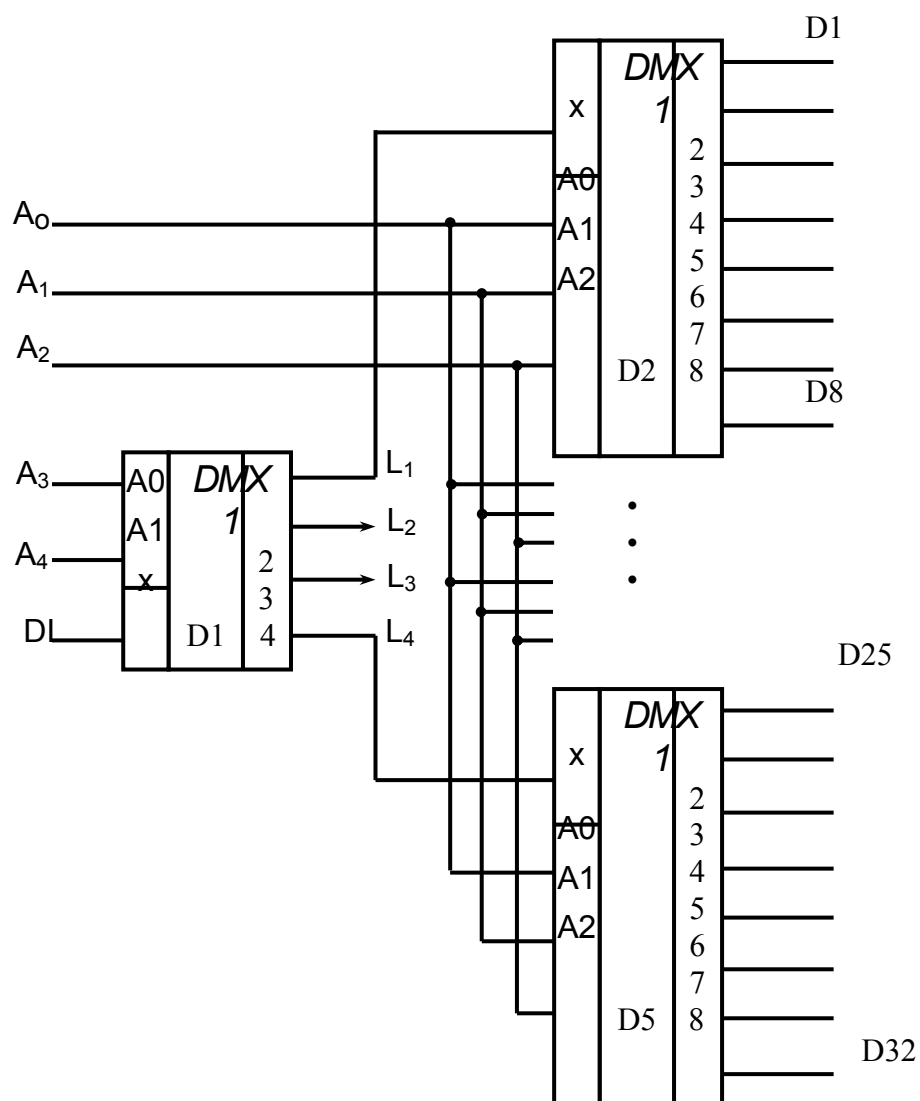


Рис.1.9. Схема демультиплексора 1 → 32, полученная соединением мультиплексоров

Тогда каждой комбинации переменных на входах А1 и А0 будет отвечать логическая единица на одном из выходов. Поэтому способы схемной реализации демультиплекторов принципиально не отличаются от способов реализации дешифраторов (рис. 1.8).

Демультиплекторы в интегральном выполнении имеют 4, 8 или 16 выходов. Если необходимое число выходов превышает возможности одной микросхемы, прибегают к наращиванию выходов. Осуществляют это чаще всего пирамидальным способом (рис.1.9).

1.1.4. Сумматоры и схемы сравнения двоичных чисел

Сумматор это предназначенная для сложения двух двоичных чисел КЛС, формирующая сигналы суммы (S) и переноса (P) в старший разряд при сложении двух двоичных чисел (А, В) по правилам двоичной арифметики.

Для примера рассмотрим сложение двух одноразрядных двоичных чисел (А, В) в одноразрядном сумматоре (его часто называют полусумматором).

Таблица 1.8.

Таблица работы полусумматора

A	B	S	P
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Значения цифр в каждом двоичном разряде складываются между собой. Если результат при этом превышает единицу, то возникает перенос в следующий разряд. Информация о переносе представляется в виде бита переноса, равного 1, если перенос есть, и 0 – в противном случае.

Полусумматор имеет два входа и пригоден для использования только в младшем разряде. Устройство для суммирования двух много-разрядных чисел должно иметь, начиная со второго разряда, три входа:

два для слагаемых и один для сигнала переноса с предыдущего разряда. Такой сумматор можно реализовать на основе двух полусумматоров.

На основе одноразрядных сумматоров строятся схемы много разрядных сумматоров. В них соответствующим образом подсоединены к каждому сумматору входы от переносов предыдущих разрядов и выходы для переноса на последующие разряды. Сигнал переноса может перемещаться последовательно от разряда к разряду. При этом у сумматора получается не очень высокое быстродействие, поскольку появляется большая задержка выходного сигнала, связанная с последовательным прохождением переноса через все одноразрядные сумматоры. При большом числе разрядов задержка может оказаться весьма значительной.

Для повышения быстродействия в сумматорах обычно используют ускоренные способы формирования переноса. Наиболее часто используется способ с одновременным формированием переноса от нескольких разрядов.

При параллельном переносе используют дополнительные схемы ускоренного (сквозного) переноса. При этом структура сумматора усложняется. Микросхема, используемая для ускоренного переноса, показана на рис.1.10.

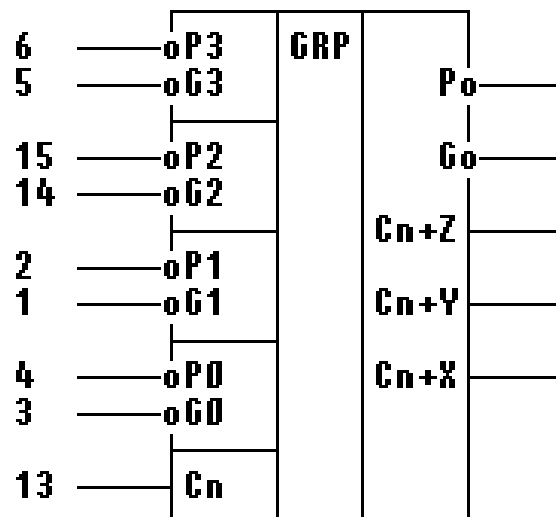


Рис.1.10. Микросхема, используемая в сумматорах с ускоренным переносом

Вычитание в какой – то мере обратно операции сложения. По этой причине часто операцию вычитания заменяют сложением уменьшаемого с вычитаемым, представленным в дополнительном коде. Достоинство такого подхода состоит в том, что вычитание, как и сложение выполняется теми же микросхемами. Когда $A > B$ ответ формируется в прямом коде, в противном случае - ответ формируется в обратном коде.

К арифметическим устройствам относятся также цифровые компараторы. Они (от англ. compare – сравнивать, сличать) выполняют сравнение двух чисел, заданных в двоичном коде. В зависимости от схемного исполнения компараторы могут определять равенство $A=B$ либо вид неравенства двух независимых чисел. Результат сравнения отображается логическим уровнем на соответствующем выходе. Четырехразрядная схема сравнения показана на рис.1.11.

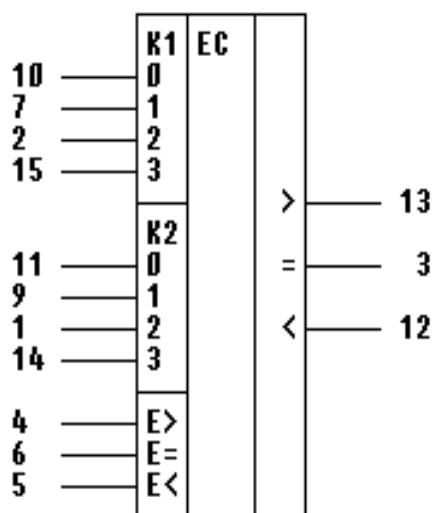


Рис.1.11. Условное графическое обозначение на схемах четырехразрядного цифрового компаратора

К универсальным и довольно сложным устройствам комбинационного типа относятся арифметико - логические устройства (АЛУ). Они являются основным узлом операционных частей вычислительной техники и автоматики. АЛУ способны выполнять разные арифметические и логические операции над двумя многоразрядными числами (операндами). Настройка на выполнение той или другой операции осуществляется посредством управляющих сигналов. Обычно разрядность операндов составляет 4, 8, 16.

Таблица 1.9.

Перечень выполняемых АЛУ арифметических действий и логических операций

Код операции				Логическая функция	Арифметическое действие
M4	M3	M2	M1	Mo = 1	Mo = 9
0	0	0	0	\bar{A}	$A + \bar{C}_0$
0	0	0	1	$A \vee B$	$(A \vee B) + \bar{C}_0$
0	0	1	0	$\bar{A}B$	$(A \vee \bar{B}) + \bar{C}_0$
0	0	1	1	0	$-1 + \bar{C}_0$
0	1	0	0	\overline{AB}	$A + (\overline{AB}) + \bar{C}_0$
0	1	0	1	\bar{B}	$(A \vee B) + (\overline{AB}) + \bar{C}_0$
0	1	1	0	$A \oplus B$	$A - B - 1 + \bar{C}_0$
0	1	1	1	$A\bar{B}$	$(\overline{AB}) - 1 + \bar{C}_0$
1	0	0	0	$\bar{A} \vee B$	$A + (\overline{AB}) + \bar{C}_0$
1	0	0	1	$\overline{A \oplus B}$	$A + B + \bar{C}_0$
1	0	1	0	B	$(A \vee \bar{B}) + (\overline{AB}) + \bar{C}_0$
1	0	1	1	AB	$(\overline{AB}) - 1 + \bar{C}_0$
1	1	0	0	1	$A + A + \bar{C}_0$
1	1	0	1	$A \vee \bar{B}$	$(A \vee B) + A + \bar{C}_0$
1	1	1	0	$A \vee B$	$(A \vee \bar{B}) + A + \bar{C}_0$
1	1	1	1	A	$A - 1 + \bar{C}_0$

Для примера в таблице 1.9 представлен, в зависимости от комбинации управляющих сигналов, перечень выполняемых АЛУ арифметических действий и логических операций.

1.2. Последовательностные цифровые устройства электроники

1.2.1. Общие сведения о триггерах, как элементах с «памятью»

Когда мы рассматривали логические элементы, КЛС, то все время подчеркивали, что логические состояния на их выходах однозначно определяются комбинацией логических сигналов на их входах, действующих в данный момент времени. Причем возможности «запомнить» эту комбинацию нет.

Обойтись в цифровой электронике только такими элементами и функциональными узлами сложно. Вам хорошо известно, что в калькуляторе для выполнения операций необходимо, после нажатия одной клавиши, запомнить операнд. Иначе нельзя будет выполнить его сложение со вторым операндом. Чтобы выполнить сложение потребуется ввести и «запомнить» на некоторое время одно слагаемое, а затем, набрав второе слагаемое и тоже его «запомнить». Только в конце, когда имеются оба слагаемых можно выполнить сложение.

Все КЛС характеризовались отсутствием «памяти». «Память» - свойство устройства цифровой электроники сохранять в течение требуемого времени значения логических сигналов, характеризующих внутреннее состояние цифрового устройства. Если устройство обладает «памятью», то при смене входных данных надо знать не только сами значения входных сигналов, но и располагать информацией о прошлых входных воздействиях, о состоянии в котором устройство было до этого. Из этого следует, что устройства с «памятью» реализуют функциональную связь уже не между отдельными значениями входных и выходных сигналов, а между их последовательностями. По этой причине к цифровым устройствам, обладающим памятью, часто применяется термин «устройство последовательного типа», а сами устройства называют последовательностными схемами.

Последовательностные схемы имеют обратные связи и характеризуются как устойчивыми состояниями, в которых они могут пребывать относительно длительное время, так и кратковременными неустойчивыми, когда они «переключаются» из одного устойчивого состояния в другое.

Устройства, содержащие элементы памяти, пребывая в устойчивых состояниях способные хранить двоичную информацию продолжительное время

Триггер – это электронное устройство, способное длительно оставаться в одном из двух устойчивых состояний и менять состояние под воздействием внешних сигналов. Он может оставаться в заданном состоянии и после прекращения действия переключающих сигналов. Приняв одно из состояний триггера за единичное, а другое – за нулевое, можно считать, что триггер хранит (помнит) один разряд двоичного числа (один бит информации).

Триггер, в общем случае, может иметь два выхода. Один из выходов называют прямым и обозначается Q . Его состояние может быть равно логической единице или логическому нулю. Другой выход называют инверсным и обозначают \bar{Q} . Состояние триггера всегда оценивают по тому, какой логический сигнал на прямом выходе. Если $Q = 1, \bar{Q} = 0$, то есть триггер по прямому выходу находится в единичном состоянии, то говорят, что триггер установлен в единичное состояние. Если $Q = 0, \bar{Q} = 1$, то триггер установлен в нулевое состояние, «сброшен» в нуль.

Смена состояний имеет много синонимов: переключение, переброс, опрокидывание, запись информации.

Перевод триггера из одного устойчивого состояния в другое осуществляется за счет подачи внешних логических сигналов на его определенные входы. При этом переход с одного устойчивого состояния в другое осуществляется очень быстро (скачкообразно).

Работа триггера может происходить синхронно и асинхронно.

Большинство цифровых устройств являются синхронными, т. е. имеют специальные входы, на которые подаются синхронизирующие (тактовые) сигналы, являющиеся своеобразными командами, задающими «ритм» работы. Обычно они определяют момент начала работы устройства.

Синхронные устройства имеют вход синхронизации C (от англ. CLOCK – время[задающий]) и переключаются только при наличии на нем синхронизирующего сигнала.

Синхронный триггер изменяет свое состояние тогда, когда на один из его входов поступает синхронизирующий (тактирующий) импульс.

У асинхронных устройств, начало изменения своего состояния привязывают к моменту поступления любого информационного сигнала. Асинхронные устройства переходят в новое состояние сразу при поступлении на входы определенной комбинации, информационных сигналов. На асинхронный триггер сигнал синхронизации не подается, а его переключение происходит тогда, когда воздействующий (активный) сигнал поступает на информационные входы.

Вход синхронизации может быть статическим и динамическим. Тот и другой, в свою очередь, бывает прямым и инверсным.

Статическим входом называют вход, через который воздействие сигнала на устройство передается в течение всего времени его существования. Причем, если во время существования синхронизирующего сигнала будут меняться сигналы на информационных входах, устройство будет реагировать на эти изменения. В этом смысле статический вход синхронизации эквивалентен входу разрешения в устройствах комбинационного типа.

Статическими входами обычно являются также входы, на которые подаются информационные сигналы.

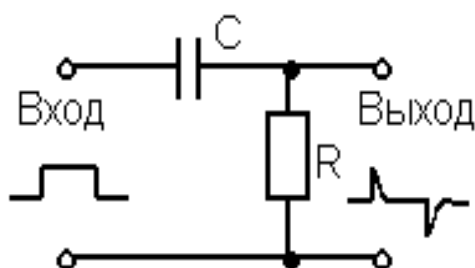


Рис.1.12. Условное графическое обозначение на схемах четырехрядного цифрового компаратора

Динамическим входом называют вход, через который воздействие на цифровое устройство происходит только в момент перепада входного сигнала из 0 в 1 или, наоборот, из 1 в 0. Воздействие на такой вход подобно перепадам напряжения и аналогично импульсам, сформированным дифференцирующей цепью (рис. 1.12). Динамический (импульсный) вход обычно помечается треугольником или наклонной чертой, указывающих на то по фронту или спаду импульса осуществляется воздействие на вход.

На рис. 1.13 показаны варианты условных графических обозначений различных типов входов.

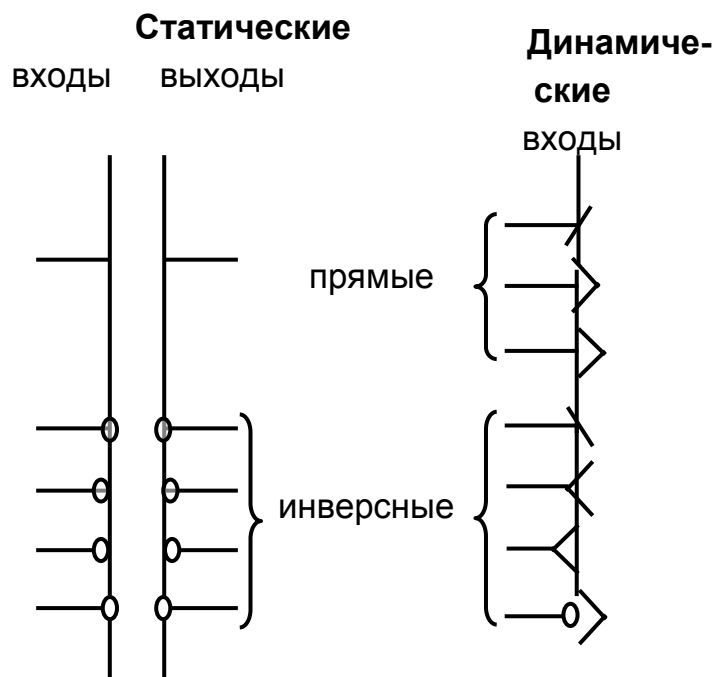


Рис.1.13. Условное графическое обозначение на схемах статических и динамических входов и выходов

При необходимости метки выводов дополняют буквами и символами, показывающими функциональное назначение выводов. Заметим, что такими же буквами и символами обозначают выводы и на структурных схемах, если выводы прямые, и дополняют обозначения инверсной чертой, например, \bar{R} , \overline{CR} , если они инверсные.

Входы триггеров можно условно разделить на информационные и специальные. Для обозначения информационных входов, обеспечивающих перевод триггера в заданное состояние, используют следующие обозначения.

S- (от англ. SET –установить) – вход для установки триггера в состояние «1» ($Q=1, \bar{Q}=0$).

R- (от англ. RESET –сбросить) – вход для установки триггера в состояние «0» ($Q=0, \bar{Q}=1$).

J- (от англ. JUMP –переброс) – вход для установки универсального триггера в состояние «1» ($Q=1, \bar{Q}=0$).

К- (от англ. KEEP –держать, сохранять) – вход для установки универсального триггера в состояние «0» ($Q=0, \bar{Q}=1$).

D- (от англ. DELAY –задержка) – вход D триггера.

T- счетный вход (вход триггера по которому каждый очередной сигнал вызывает переход триггера в новое состояние, противоположное предыдущему).

Для обозначения специальных входов используют следующие обозначения.

C - (от англ. CLOCK –время[задающий]) – вход синхронизации.

E — вход для разрешение приема информации.

Чтобы избежать путаницы будем придерживаться соглашения положительной логики и под цифрой 1 будем подразумевать напряжение высокого уровня, а под 0 – низкого.

Кроме того, поскольку входы и поступающие на них сигналы обычно обозначают одинаковыми буквами, для различения будем вводить в обозначениях сигналов либо тактовые индексы (например, C^{n+1}, Q^n), либо штриховую метку (C', J').

Триггеры на логических элементах весьма разнообразны, поэтому их подразделяют по ряду признаков. По способу записи информации различают триггеры RS-, T-, D-, JK-типов и др.

1.2.2. Асинхронные RS-триггеры

Эти простейшие триггеры используются как однобитовые ячейки памяти. Их применяют также, в частности, в триггерах других типов. Свое название они получили по обозначениям входов: S (set – установка), с помощью которого триггер устанавливается единичное состояние, и R (reset – сброс) – нулевое состояние.

Асинхронные потенциальные RS – триггеры называются также триггерами – защелками (Latch) или фиксаторами. Условное графическое обозначение RS – триггера и его исполнение с помощью логических элементов ИЛИ - НЕ, охваченных обратными связями, показаны на рис.1.14.

Исходя из функционирования триггера, можно представить следующую упрощенную таблицу его работы (табл.1.10).

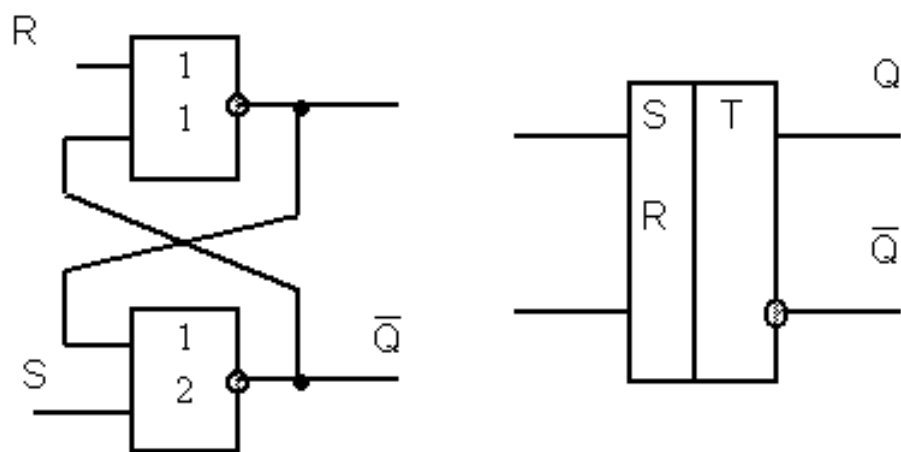


Рис.1.14. Условное графическое обозначение асинхронного RS – триггера и его исполнение с помощью логических элементов ИЛИ - НЕ, охваченных обратными связями «крест на крест»

Таблица 1.10.

Упрощенная таблица работы триггера

n	n + 1			
	Q^n	S^{n+1}	R^{n+1}	\bar{Q}^{n+1}
0	0	0	0	1
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
1	0	1	0	1
0	0	1	0	1
0	1	1	н/о	н/о
1	1	1	н/о	н/о

Если на входах R и S имеют место нулевые потенциалы, то триггер может находиться сколь угодно долго в одном из двух устойчивых состояний, которые определяются его «предыдущей жизнью» Q^n . При этом, если его предыдущее состояние (колонка n) было «1», то и новое логическое состояние (колонка n+1) будет «1» и наоборот.

Если на вход S (set – установка) подать потенциал высокого уровня (логическую «1»), то, вне зависимости от предыдущего состояния,

триггер будет установлен в единичное состояние и на его прямом выходе появиться логическая единица ($Q=1, \bar{Q}=0$).

Аналогично, если на вход R (reset – сброс) подать потенциал высокого уровня (логическую «1»), то, вне зависимости от предыдущего состояния, триггер будет установлен в нулевое состояние и на его прямом выходе появиться логический нуль ($Q=0, \bar{Q}=1$).

Таким образом, воздействуя на информационные входы триггера, в него, по отношению к выходу, можно «записать» один бит информации - либо «1», либо «0».

Одновременная подача высоких уровней напряжений на входы R и S недопустима, поскольку триггер «не понимает», как можно одновременно установить на нем несовместимые (и противоположные) логические сигналы «0» и «1».

Для построения асинхронного RS-триггера достаточно охватить петлей взаимной обратной связи два ЛЭ ИЛИ-НЕ (рис.1.14).

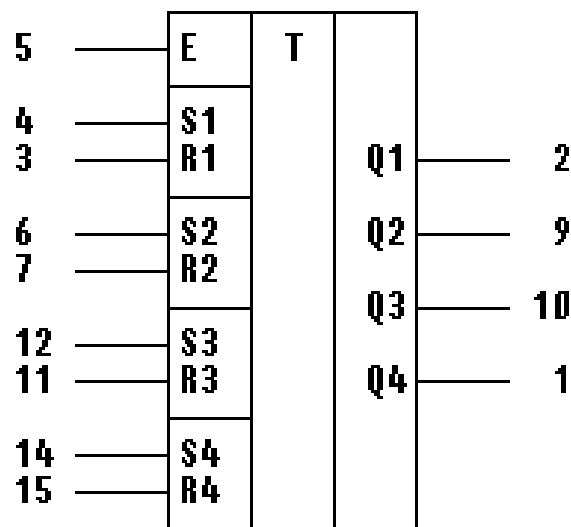


Рис.1.15. Условное графическое обозначение четырех RS – триггеров выполненных в виде единой микросхемы

Итак, для схемы RS – триггера при сигналах $S^{n+1}=R^{n+1}=0$ состояние триггера не меняется ($Q^{n+1}=Q^n$). Говорят, что триггер находится в режиме хранения одного бита информации. При подаче на входы комбинаций $S^{n+1}=1, R^{n+1}=0, S^{n+1}=0, R^{n+1}=1$ устанавливаются соответственно единичное и нулевое состояния. В триггер «записывается» один

бит информации. Если поданы $S^{n+1} = R^{n+1} = 1$, т.е. одновременно действуют две противоположные команды, состояние не определено. Поэтому комбинация $S^{n+1} = R^{n+1} = 1$ здесь недопустима.

Обычно в одном корпусе микросхемы размещается несколько триггеров. Условное графическое обозначение четырех RS – триггеров показано на рис.1.15.

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу RS триггера при входных воздействиях в виде импульсов, показаны на рис. 1.16. Здесь для удобства рассмотрения перепады входных информационных сигналов совмещены с началом условных тактовых интервалов.

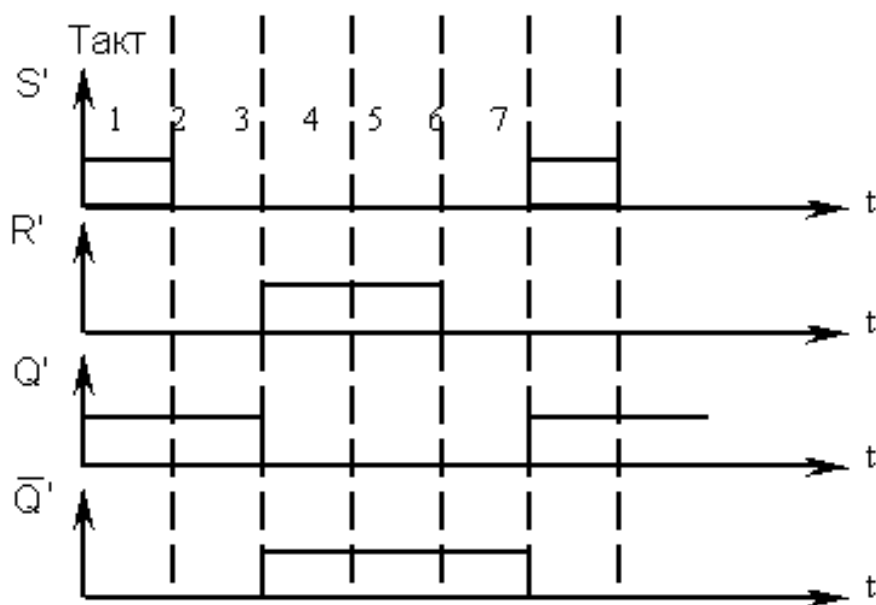


Рис.1.16. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу RS - триггера при входных информационных воздействиях в виде импульсов

Быстродействие асинхронного RS-триггера определяется максимальной частотой следования сигналов S' и R' , при которой он функционирует без сбоев. Очевидно, она определяется временем переключения обоих ЛЭ:

$$F_{\text{макс}} = \frac{1}{2 t_{\text{зд.ср}}}. \quad (1.2)$$

1.2.3. Синхронные (тактируемые) RS-триггеры

В асинхронных триггерах при формировании входных сигналов могут возникать ложные короткие импульсы за счет так называемого «эффекта гонок». Эти короткие импульсы могут приводить к ложным срабатываниям триггера. Для исключения ложных срабатываний применяют синхронные триггеры, у которых изменения выходных состояний происходит в момент подачи специальных импульсов – синхроимпульсов. Эти синхроимпульсы (тактовые импульсы) подаются после завершения переходных процессов в схемах формирования входных управляющих сигналов триггера.

На рис.1.17. показана функциональная схема синхронного RS-триггера на элементах И-НЕ и его условное графическое обозначение. Основное отличие этого триггера состоит в том, что у него имеется вход синхронизации С (от англ. CLOCK – время[задающий]). Из-за этого информация в триггер может записываться только тогда, когда на синхронизирующем входе появляется тактовый импульс.

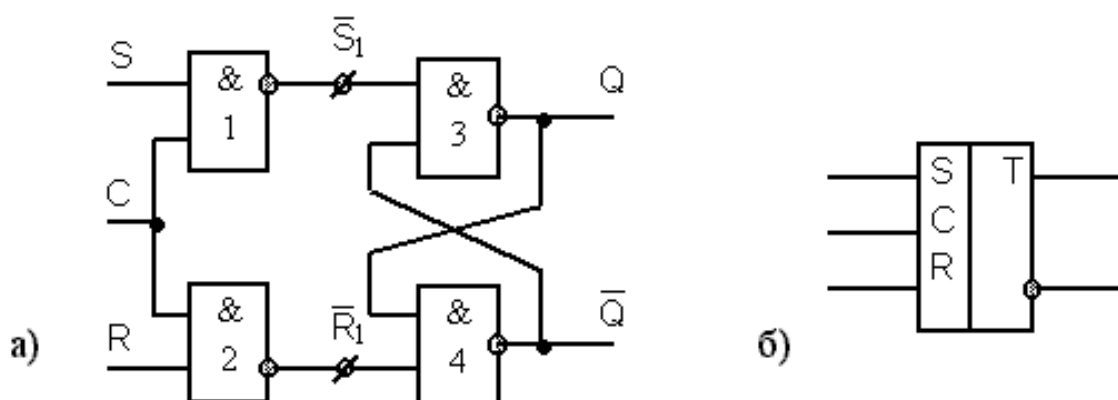


Рис.1.17. Условное графическое обозначение синхронного RS – триггера и его исполнение с помощью логических элементов И – НЕ

В своем составе асинхронный триггер содержит синхронный RS-триггер на логических элементах ЛЭ3 и ЛЭ4 с инверсными информационными входами и схему управления на ЛЭ1 и ЛЭ2, объединенных по входу синхронизации С.

Анализируя схему можно отметить, что состояние выходов тактируемого синхронного RS-триггера на элементах И-НЕ может меняться только в те моменты, когда на входе синхронизации имеет место высо-

кий потенциал. В этом случае синхронный RS-триггер работает как обычный асинхронный. При нулевом потенциале на входе С состояние RS-триггера фиксировано и он «не реагирует» на воздействия, которые поступают по информационным R и S входам. Действительно, пусть $C' = 0$. Независимо от значений внешних сигналов S' и R' логическая схема управления формирует на входах асинхронного триггера $S'_1 = R'_1 = 1$. Поскольку триггер имеет инверсные входы и управляется «нулями», то в этой ситуации он работает в режиме хранения.

Пусть теперь $C' = 1$. Если $S' = R' = 0$, то $S'_1 = R'_1 = 1$ – режим хранения. Если $S' = 1$ и $R' = 0$, то $S'_1 = 0$ и $R'_1 = 1$, то $Q' = 1$. При $S' = 0$ и $R' = 1$ наоборот – $Q' = 0$. Комбинация $S' = R' = 1$, как и в асинхронных триггерах, недопустима.

В цифровой аппаратуре находят применение также двухступенчатые триггеры. Такие триггеры необходимы в устройствах, когда по одному и тому же сигналу синхронизации (тактовому импульсу) приходится одновременно «опрашивать» состояние триггера (фиксировать то, что было записано до этого) и «записывать» в него новый бит информации (переключать его в новое состояние). Чтобы не возникало сбоев при таких практически одномоментных действиях, необходимо, чтобы эти две операции были как – то «смещены» во времени. Надо чтобы триггер менял свое состояние не во время действия тактового импульса (1 такта), а только после его окончания (2 такта). Иначе говоря, требуется, чтобы новая информация на выходе триггера появлялась только после того, как входы триггера окажутся запертыми.

Структура и условное обозначение двухступенчатого синхронного RS-триггера изображены на рис.1.18. В основном поле условного графического обозначения триггера помещены две буквы Т. MS – триггер состоит из двух секций (ступеней). Первая секция ведущая или М – секция (М -от англ.Master –хозяин). Ведущий триггер принимает информацию с входных линий. Вторая секция - ведомая или S – секция (S - от англ. Slave - раб). Вспомогательный триггер «переписывает» информацию с главного триггера. Секции имеют отдельные входы для подачи синхронизирующих импульсов. При работе сначала единичное значение подается на синхронизирующий вход главного триггера, вызывая изменение его состояния в соответствии со значениями на входных линиях. После этого, синхроимпульс подается на вход ведомого триггера, состояние

ведущего триггера передается на ведомый. Для того чтобы эти два процесса происходили со сдвигом во времени, имеется двухфазный источник синхроимпульсов. Обычно в каждый MS – триггер встраивают свой формирователь нужных отдельных синхросигналов, который формирует сигналы обеих фаз от одной синхронизирующей импульсной последовательности.

На рис.1.18. ступени схемы, представляющие собой одноступенчатые синхронные RS-триггеры, управляются противофазными синхронизирующими сигналами благодаря инвертору. Поэтому если первая ступень работает в режиме приема информации ($C' = 1$), то вторая – в режиме хранения ($\bar{C}' = 0$) и наоборот: при $C' = 0$ для первой ступени режим хранения, а для второй режим переписи информации из первой ступени.

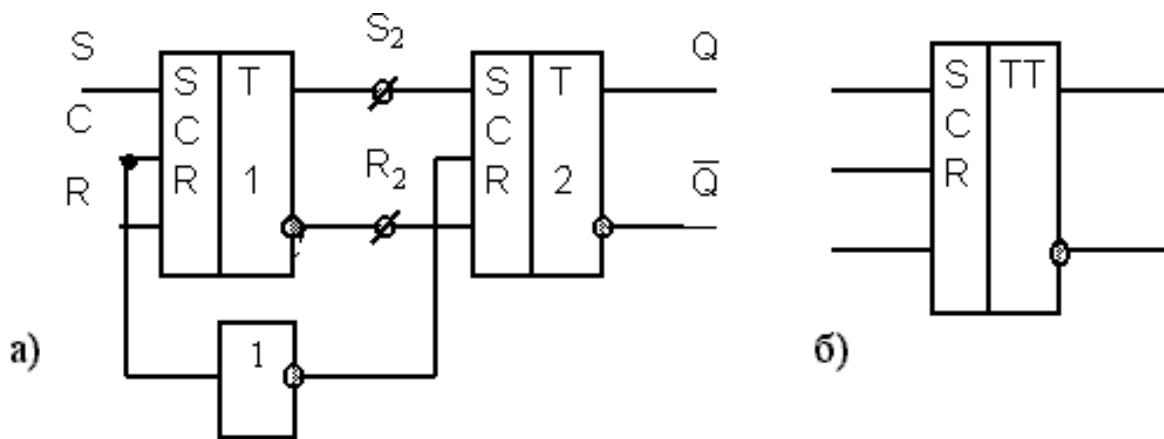


Рис.1.18. Условное графическое обозначение двухступенчатого (двухтактного) синхронного RS – триггера и его исполнение с помощью двух RS – триггеров

На рис. 1.19. показаны временные диаграммы работы MS – триггера. Видно, что состояние второй ступени повторяет состояние первой с задержкой t_c , равной длительности импульса синхронизации C' . Триггер как бы обладает свойством внутренней задержки, которая часто бывает необходима, в частности, для построения сдвигающих регистров.

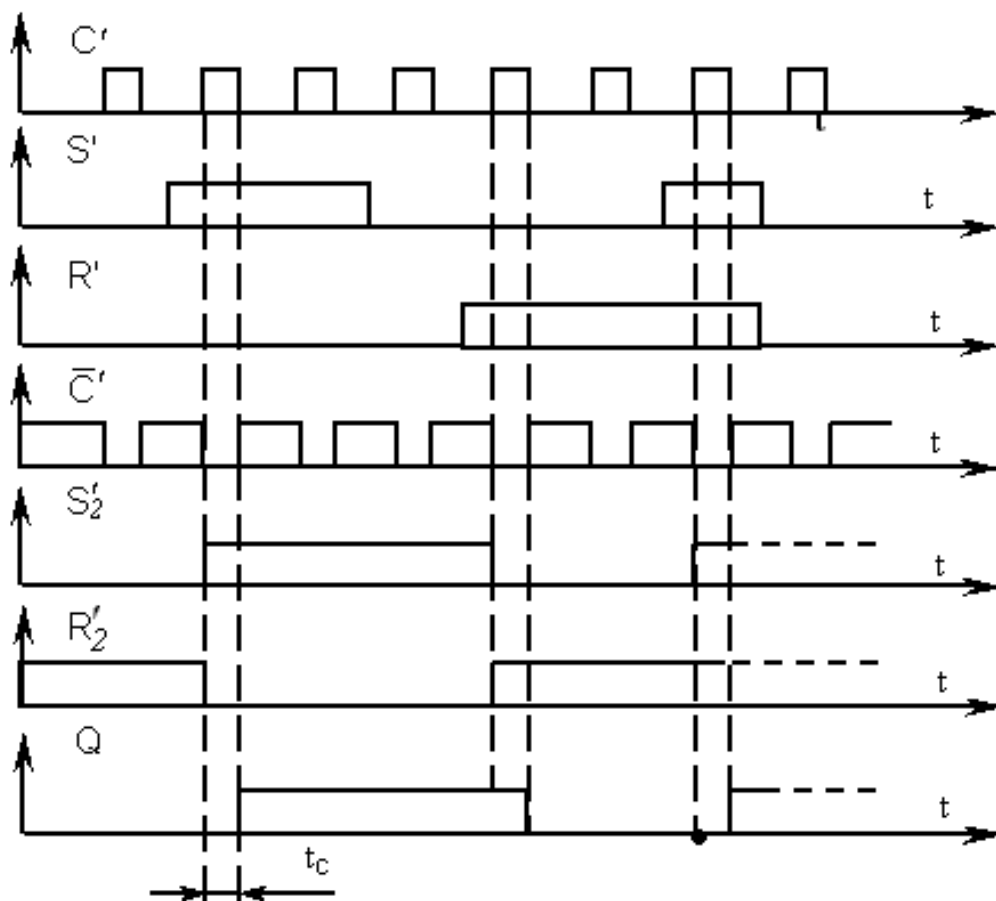


Рис.1.19. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу двухступенчатого (двухтактного) MS - триггера при входных информационных воздействиях в виде импульсов

Заметим, что при двухступенчатой структуре комбинация $S' = R' = 1$ по-прежнему недопустима.

1.2.4. Т – триггеры

Т-триггер (счетный триггер) имеет всего один информационный вход, обозначаемый +1. Смена состояний происходит при каждом поступлении на него информации (1 или 0), т.е. имеет место логика $Q^{n+1} = \overline{Q^n}$. Управление осуществляется либо фронтом, либо спадом импульса. Если вход триггера прямой, изменение состояния происходит при поступлении перепада 0 – 1 (фронта), если инверсный – 1– 0.

Условное графическое обозначение Т-триггера с прямым счетным входом и иллюстрирующие его работу временные диаграммы, показаны

на рис.1.20. Переключение по каждому входному импульсу можно трактовать как подсчет их количества по модулю 2 (после каждого нечетного импульса на выходе $Q' = 1$, а после четного – $Q' = 0$).

Такое свойство триггера используется в счетчиках и накапливающих сумматорах. Т-триггер может рассматриваться также как делитель частоты следования импульсов на 2.

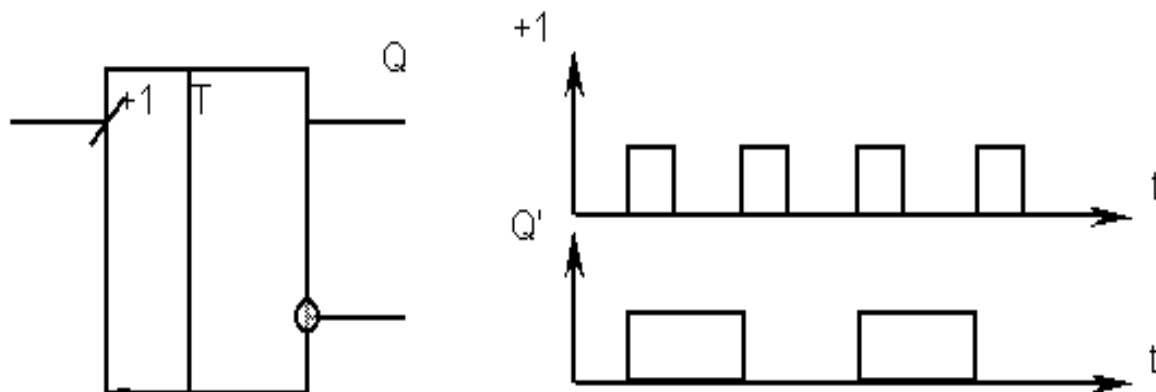


Рис.1.20. Условное графическое обозначение Т– триггера и временные диаграммы его работы

В интегральном исполнении в виде самостоятельных изделий Т-триггеры не изготавливаются, так как их функции, как мы увидим позже, могут выполнять триггеры D- и JK - типов. Счетный режим у них получается путем коммутации выводов либо подачи определенных сигналов.

1.2.5. D-триггеры с задержкой двоичной информации

D-триггеры имеют информационный вход D и вход синхронизации C и функционируют согласно таблице состояний 1.11. С подачей синхронизирующего сигнала C' триггер устанавливается в состояние $Q^{n+1} = D'$ и сохраняет его до поступления последующего сигнала C' .

Согласно таблице состояний 1.11, D - триггер осуществляет задержку двоичной информации, поступающей на вход D, на период следования синхронизирующего сигнала C' . Поэтому его называют ещё триггером задержки. Свое название получил от слова Delay – задерживать.

Таблице состояний D-триггера

D'	Q ⁿ⁺¹
0	0
1	1

В микроэлектронной схемотехнике находят применение D-триггеры как со статическим, так и динамическим входом синхронизации.

На рис.1.21. приведена простейшая схема D-триггера с прямым статическим входом C. При $C' = 0$ логические элементы ЛЭ1 и ЛЭ2 выключены ($S' = R' = 1$). Поэтому асинхронный RS-триггер (ЛЭ3 и ЛЭ4), являющийся ячейкой памяти с инверсными входами, работает в режиме хранения. Сигнал $C' = 1$ разрешает передачу информации со входа D в ячейку памяти. Происходит это так. Если $D' = 0$, то $S' = 1$, $R' = 0$ и $Q^{n+1} = 0$; если $D' = 1$, то $S' = 0$, $R' = 1$ и $Q^{n+1} = 1$.

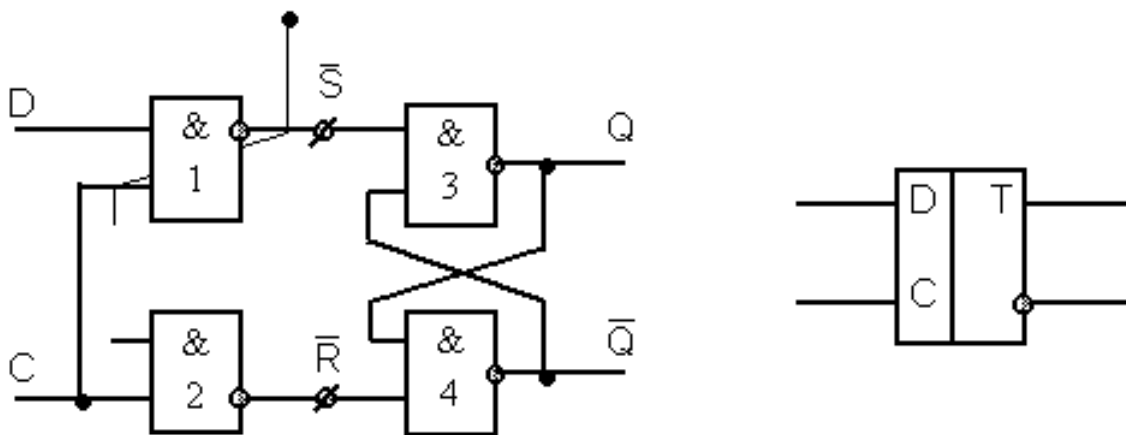


Рис.1.21. Условное графическое обозначение D – триггера с статическим входом

Работу D триггера со статическим входом иллюстрирует рис. 1.22.

D триггер осуществляет задержку двоичной информации, поступающей на вход D на период следования синхронизирующего сигнала (на 1 такт). Заметим, что изменения информации на входе D во время действия синхронизирующего сигнала передаются на выход триггера

($t_1 < t < t_2$). Обычно это нежелательно. Поэтому, когда необходимо фиксировать информацию только в определенные моменты времени, применяют либо очень короткие импульсы C' , либо D-триггер с динамическим входом C .

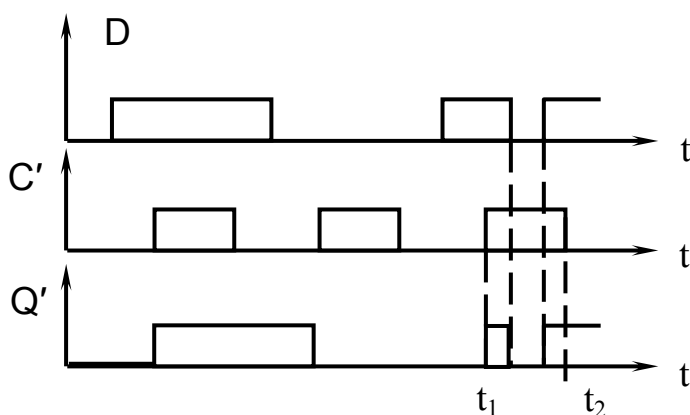


Рис.1.22. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу D триггера при входных воздействиях в виде импульсов

Наиболее распространенной схемой интегрального D-триггера с динамической синхронизацией является схема на трех асинхронных RS-триггерах (рис. 1.23).

Триггер на логических элементах ЛЭ5 и ЛЭ6 служит ячейкой памяти, а два других – на ЛЭ1, ЛЭ2 и ЛЭ3, ЛЭ4 – являются вспомогательными, образуют узел управления. Наряду со входами D и C могут быть также входы асинхронной установки в единичное и нулевое состояния (S и R). Асинхронность этих входов на условном графическом обозначении подчеркивается отделением их от области метки C с помощью перегородок.

Принцип действия триггера поясняется временными диаграммами напряжений на выходах логических элементов (рис. 1.24). Диаграммы построены с учетом времени задержки переключения ЛЭ $t_{зд.ср}$, позволяющего повысить наглядность причинно-следственных связей в триггере.

Пусть в исходном состоянии ($t < t_1$) $D' = 1$, $C' = 0$. Сигнал $C' = 0$ подается на входы ЛЭ2 и ЛЭ3, поэтому они выключены ($y_2 = y_3 = 1$), ячейка памяти (ЛЭ5, ЛЭ6) работает в режиме хранения. Для однознач-

ности принято $Q' = 0$. На входах ЛЭ4 две единицы, значит $y_4 = 0$, а связанный с его выходом ЛЭ1 выключен ($y_1 = 1$).

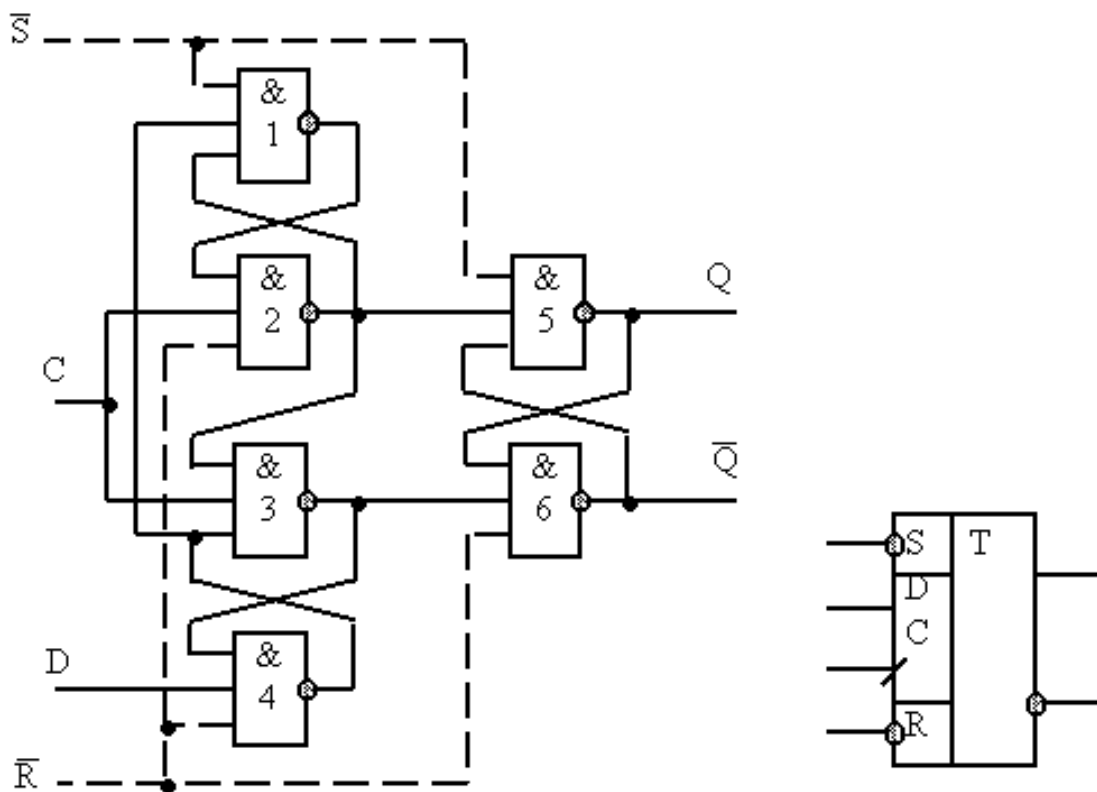


Рис.1.23. Условное графическое обозначение D – триггера с динамической синхронизацией

С поступлением синхронизирующего сигнала ($t = t_1$) в течение ближайшего интервала $t_{зд.ср}$ включается ЛЭ2, так как на его входах действуют единичные уровни. Элемент ЛЭ3 свое состояние не меняет.

В течение второго интервала дискретизации возможно переключение ЛЭ1, ЛЭ3, ЛЭ5, на входы которых поступил сигнал $y_2 = 0$. Поскольку ЛЭ1 и ЛЭ3 были выключены, их состояние не меняется. Выключится лишь ЛЭ5 ($Q' = 1$).

В течение третьего интервала дискретизации включается лишь ЛЭ6 ($\overline{Q}' = 0$). На этом переходные процессы в триггере заканчиваются.

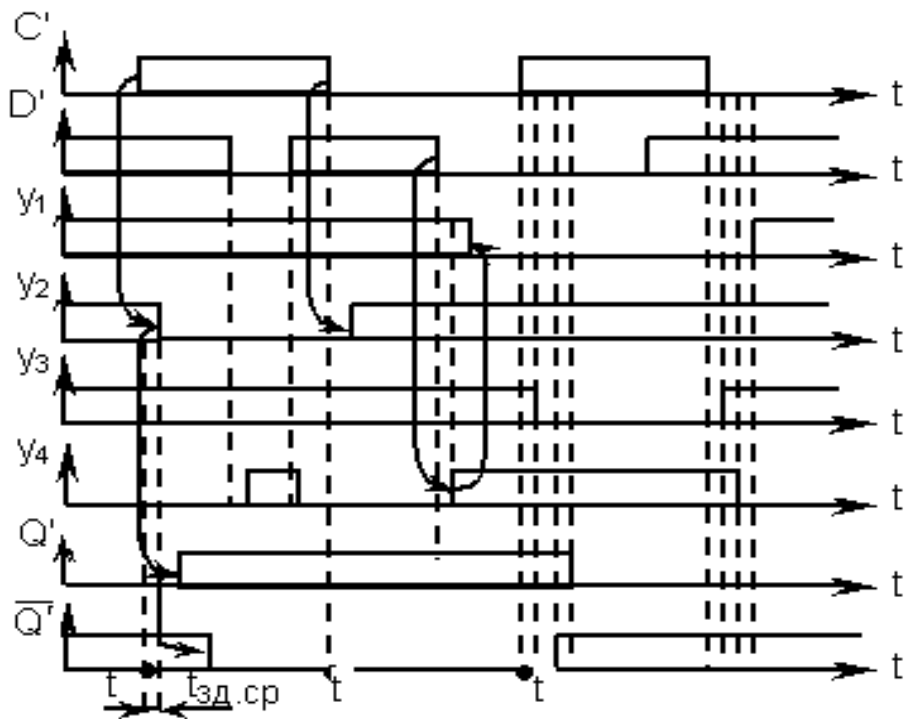


Рис.1.24. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу D триггера при входных воздействиях в виде импульсов

Аналогичным образом строятся диаграммы при других комбинациях внешних сигналов C' и D' . Опуская описание такого построения, проведем анализ полученных результатов.

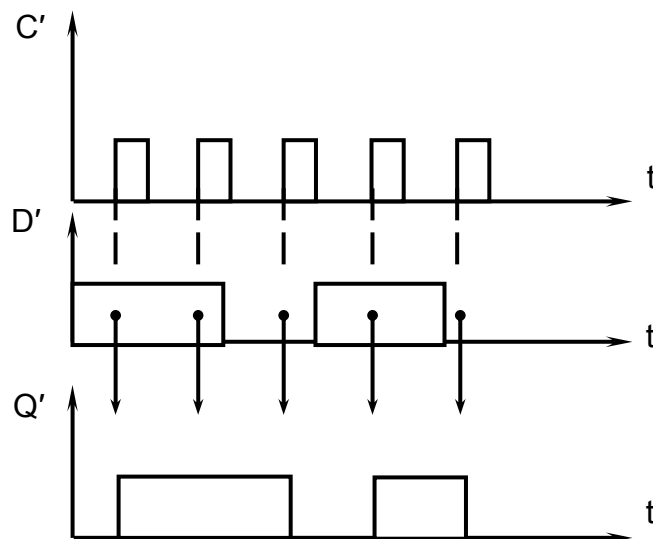


Рис.1.25. Временные диаграммы D триггера, показывающие, что триггер фиксирует входную информацию только по фронту импульса C'

Рис. 1.24 свидетельствует о следующем. Во-первых, триггер действительно работает в соответствии с функцией перехода $Q^{n+1} = D'$. Во-вторых, он переключается только в моменты поступления логического перепада 0 – 1 на выходе С. Причем, изменение информации на входе D как во время действия синхронизирующего сигнала ($C' = 1$), так и во время паузы ($C' = 0$) не приводит к изменению состояния триггера.

Итак, вход синхронизации прямой динамический. Благодаря этому триггер фиксирует входную информацию только по фронту импульса C' (рис.1.25).

Динамичность синхронизации позволяет использовать D-триггер в качестве Т-триггера. Счетный режим получается путем подключения входа D к выходу Q (рис.1.26.). Действительно, до момента поступления очередного синхронизирующего сигнала ($C' = 1$) на информационном входе $D' = Q^n$, следовательно, в результате воздействия сигнала C' состояние триггера станет $Q^{n+1} = D' = \overline{Q^n}$. Выражение $Q^{n+1} = \overline{Q^n}$ является функцией переходов Т-триггера.

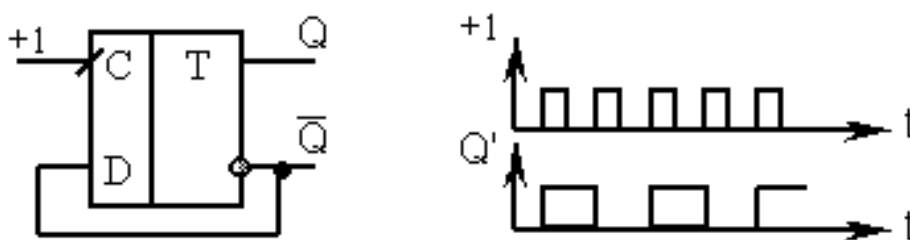


Рис.1.26. Работа D – триггера в счетном режиме (в качестве Т- триггера)

Быстродействие триггера в счетном режиме определяется минимальным периодом следования счетных импульсов, который в свою очередь соответствует логической глубине, т.е, наиболее длинному пути прохождения сигнала.

1.2.6. JK – триггеры

JK - триггер представляет обобщенную версию RS – триггера и имеет два информационных входа (J, K) и вход синхронизации С (рис.

1.27). Этот триггер не имеет запрещенных комбинаций входных сигналов. Разница в поведении названных триггеров проявляется тогда, когда на оба информационных входа подается сигнал логической единицы. JK - триггер работает он согласно функции переходов $Q^{n+1} = \overline{K'}Q^n \vee J'Q^n$ или соответствующей ей таблице состояний 1.12.

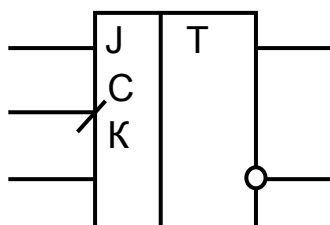


Рис.1.27. Условное графическое обозначение JK – триггера

Таблица 1.12.

Таблица состояний JK – триггера

J'	K'	Q^{n+1}
0	0	Q^n
1	0	1
0	1	0
1	1	$\overline{Q^n}$

С помощью информационных входов J и K, подобных R и S в триггер записывается необходимый бит информации. На вход C поступают тактовые (синхронизирующие) импульсы. Когда на оба входа J и K подается уровень логической единицы триггер блокируется и состояние его выходов не изменяется. Говорят, что в этом случае триггер находится в режиме хранения информации. Выходные сигналы соответствуют тому состоянию, которое имело место до воздействия входных сигналов.

С поступлением синхронизирующего C' и при наличии на информационных входах сигналов $J' = K' = 1$ триггер переключается в противоположное состояние ($Q^{n+1} = \overline{Q^n}$), т. е. работает в счетном режиме. В остальных случаях он функционирует как синхронный RS-триггер с пря-

мыми входами (табл. 1.10), если вход J считать входом S, а вход K – входом R. Триггер JK-типа может работать и как D-триггер, если исключить случаи равнозначности сигналов J' и K'. Иными словами, JK-триггер является универсальным. На рис. 1.28 показаны схемы использования его в режимах: а) синхронного RS-триггера (при условии исключения комбинации $J' = K' = 1$), б) Т-триггера, в) D-триггера.

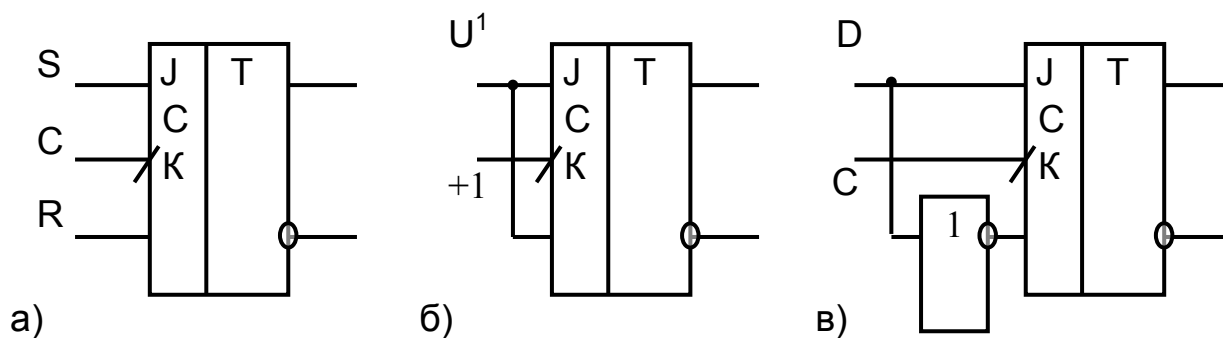


Рис.1.28. Использование универсального JK – триггера в качестве: а) синхронного RS-триггера б) Т-триггера, в) D-триггера.

На практике наиболее широкое распространение получили двухступенчатые JK-триггеры. Их структурная схема и условное графическое обозначение представлены на рис.1.29.

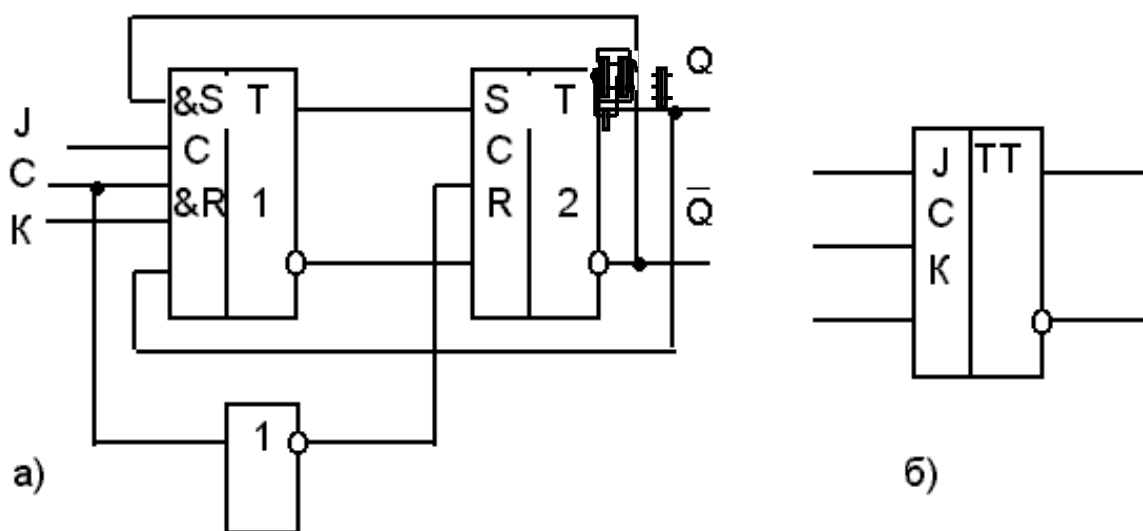


Рис.1.29. Условное графическое обозначение двухступенчатого (двухтактного) синхронного J K – триггера и его исполнение с помощью двух J K – триггеров

По составу и связям схема аналогична двухступенчатому RS-триггеру (рис. 1.18). Добавлены лишь обратные связи с выходов второй ступени на входы первой, исключающие неопределенное состояние при комбинации $J' = K' = 1$. Для организации обратных связей триггер первой ступени содержит по два входа S и R, объединенных схемой, реализующей логическую операцию конъюнкции.

Организация работы двухступенчатого JK-триггера, в целом, такая же, как и во всех ранее рассмотренных двухступенчатых структурах. Это поочередный переход ступеней из режима приема информации в режим хранения, определяемый синхронизирующим сигналом. Однако переход триггера в то или иное состояние зависит не только от информационных сигналов J' и K' , но и от состояния его в предыдущем такте. Покажем это на примере работы, когда $J' = K' = 1$. Если до поступления очередного сигнала $C' = 1$ на выходе $Q^n = 0$, то на обоих входах S первого триггера будет единичный уровень, а на одном из входов R – нулевой. Поэтому в момент поступления сигнала $C' = 1$ первый триггер установится в единичное состояние, а после окончания его ($C' = 0$) – также второй триггер ($Q^{n+1} = 1$). В силу осевой симметрии схемы очевидно, если $Q^n = 1$, то $Q^{n+1} = 0$. Итак, имеет место счетный режим: $Q^{n+1} = \overline{Q^n}$.

Функционирование JK - триггера можно представить таблицей состояний 1.13.

Таблица 1.13.

Таблица состояний JK – триггера

Входы					C	Выходы	
C	J	K	S	R		Q	\overline{Q}
0	1	X	0	0	┐	1	0
1	X	0	0	0	┐	1	0
0	0	X	0	0	┐	0	1
1	X	1	0	0	┐	0	1
X	X	X	0	0	┘	Q_n	\overline{Q}_n
X	X	X	1	0	X	1	0
X	X	X	0	1	X	0	1
X	X	X	1	1	X	1	1

При подаче на информационные входы J и K высокого уровня сигнала H триггер работает в счетном режиме. При наличии на входе С низкого уровня напряжения происходит запись информации в первую ступень триггера. Переключение второй ступени и запись информации по входам J и K осуществляется положительным фронтом сигнала по входу С.

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу JK-триггера, приведены на рис. 1.30.

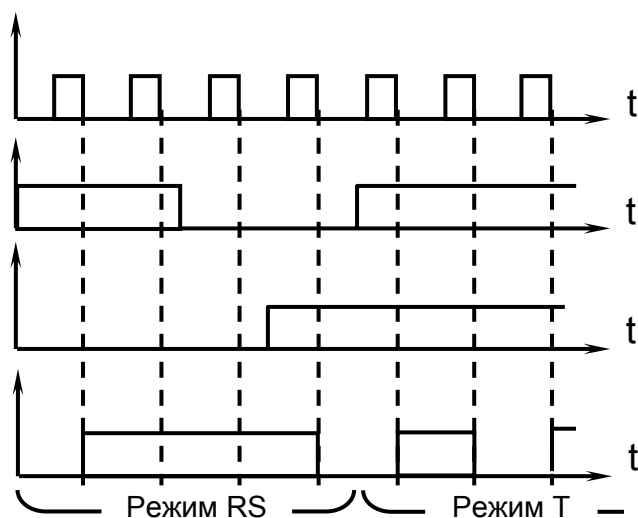


Рис.1.30. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу J K триггера при входных воздействиях в виде импульсов

1.3. Счетчики и делители

1.3.1. Общие сведения о счетчиках и делителях

Счетчиком называют цифровое устройство, состоящее из триггеров, выполняющее функцию счета электрических импульсов, сигналы на выходе которого в определенном коде отображают число импульсов, поступивших на счетный вход. Счетчик может быть также использован для подсчета некоторых событий и временных интервалов.

Примером простейшего счетчика может служить T – триггер (рис.1.20), осуществляющий процедуру двоичного счета. Такой счетчик считает до двух. Счетчик, образованный цепочкой из n триггеров (последовательным соединением T – триггеров), может подсчитать в дво-

ичном коде 2^n импульсов. Каждый из триггеров такой цепочки называют разрядом счетчика. Число m определяет количество разрядов двоичного числа, которое может быть записано в счетчик. Число $K_{сч}=2^n$ (число различных состояний, через которые проходит счетчик в процессе одного полного цикла счета) называют коэффициентом (модулем) счета.

Символом счетчиков для условного обозначения счетчиков на схемах служат буквы СТ (от англ. Counter – счетчик). После символа обычно проставляют число, характеризующее модуль счета (например, 2 или 10 – СТ2, СТ10) (рис.1.9).

Основными эксплуатационными показателями счетчика являются емкость и быстродействие. Емкость счетчика, численно равная коэффициенту счета, равна числу импульсов за один цикл.

Быстродействие счетчика определяется двумя параметрами: разрешающей способностью $T_{раз}$ и временем установки кода счетчика $T_{уст}$. Под разрешающей способностью подразумевают минимальное время между двумя входными сигналами, в течение которого не возникают сбои в работе. Обратная величина $F_{макс}=1/T_{раз,сч}$ называется максимальной частотой счета. Время установки кода $T_{уст}$ равно времени между моментом поступления входного сигнала и переходом счетчика в новое устойчивое состояние. Эти параметры зависят от быстродействия триггеров и способа их соединения между собой.

Счетчики различаются числом и типами триггеров, способами связей между ними, кодом, организацией счета и другими показателями. Цифровые счетчики классифицируются по следующим параметрам.

А. По коэффициенту счета – двоичные (бинарные); двоично-десятичные (декадные) или с другим основанием счета; с произвольным постоянным и переменным (программируемым) коэффициентом счета;

Б. По направлению счета – суммирующие (Up –Counter), вычитающие (Down –Counter), и реверсивные (Up -Down –Counter);

В. По способу организации внутренних связей – с последовательным, параллельным или с комбинированным переносом, кольцевые, счетчики Джонсона.

Г. По способу управляющего воздействия – на потенциальные асинхронные, асинхронные импульсные и синхронные.

В суммирующем счетчике каждый входной импульс увеличивает число, записанное в счетчик на единицу. В вычитающем счетчике действие происходит обратным образом. Двоичное число, хранящееся в счет-

чике, с каждым поступившим импульсом уменьшается на единицу. Реверсивный счетчик может работать в качестве суммирующего и вычитающего. Эти счетчики имеют дополнительный вход для задания направления счета.

Счетчики с последовательным переносом представляют собой цепочку триггеров, в которой импульсы, подлежащие счету, поступают на вход первого триггера, а сигнал переноса передается последовательно от одного разряда к другому.

Главное достоинство счетчиков с последовательным переносом – простота схемы. Увеличение разрядности осуществляется подключением дополнительных триггеров к выходу последнего триггера. Основным недостатком счетчиков с последовательным переносом – сравнительно низкое быстродействие, поскольку триггеры срабатывают последовательно, один за другим.

Счетчики с параллельным переносом состоят из синхронных триггеров. Счетные импульсы подаются одновременно на все тактовые входы, а каждый из триггеров цепочки служит по отношению к последующим только источником информационных сигналов. Срабатывание триггеров параллельного счетчика происходит синхронно, и задержка переключения всего счетчика равна задержке одного триггера. В таких счетчиках используются JK- и D-триггеры. В схемном отношении они сложнее счетчиков с последовательным переносом. Число разрядов у этих счетчиков обычно невелико (4...6), поскольку с повышением числа разрядов число внутренних логических связей быстро растет.

Счетчики с параллельным переносом применяются в быстродействующих устройствах. Они обладают более высокой помехоустойчивостью, так как в паузах между импульсами триггеры счетчика заблокированы. К их недостаткам следует отнести меньшую нагрузочную способность отдельных разрядов из-за дополнительной нагрузки внутренними связями. Узел, предшествующий счетчику, должен иметь достаточную мощность, чтобы управлять входами нескольких триггеров.

В счетчике с параллельно-последовательным переносом триггеры объединены в группы так, что отдельные группы образуют счетчики с параллельным переносом, а группы соединяются последовательно. В роли групп могут быть и готовые счетчики. Счетчики этого типа, как правило, многоразрядные. Общий коэффициент счета равен произведению

коэффициентов счета всех групп. По быстродействию они занимают промежуточное положение.

Классификационные признаки независимы и могут встречаться в разных сочетаниях: например, суммирующие счетчики бывают как с последовательным, так и с параллельным переносом, они могут иметь двоичный, десятичный и иной коэффициент счета.

Синхронные и асинхронные счетчики могут иметь дополнительные входы для установки счетчика в начальное состояние.

Суммирующий счетчик функционирует таким образом, что при поступлении на его вход одного импульса записанное в нем число увеличилось на единицу. Процедура подсчета количества импульсов, поступающих на вход трехразрядного счетчика $K_{сч}=2^3=8$, иллюстрируется таблицей 1.14.

Таблица 1.14.

Процедура подсчета количества импульсов, поступающих на вход трехразрядного счетчика

Старший разряд счетчика С	Средний разряд счетчика В	Младший разряд счетчика А	Число на выходе счетчика в десятичном представлении
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	4
1	0	1	5
1	1	0	6
1	1	1	7

Принцип построения суммирующего счетчика следует из правила прибавления к двоичному числу единицы. В соответствии с этим правилом, например, трехразрядный счетчик должен последовательно принимать состояния 000, 001, 010, 011, 100, ..., 111.

Видно, что триггер младшего разряда переключается каждым счетным импульсом, т.е. входом счетчика служит вход этого триггера.

Состояния второго и третьего триггеров меняются соответственно каждым вторым и четвертым импульсом. Это обеспечивается последовательным соединением триггеров.

Пример, иллюстрирующий устройство трехразрядного суммирующего счетчика, временные диаграммы его работы и условное изображение его показан на рис. 1.31.

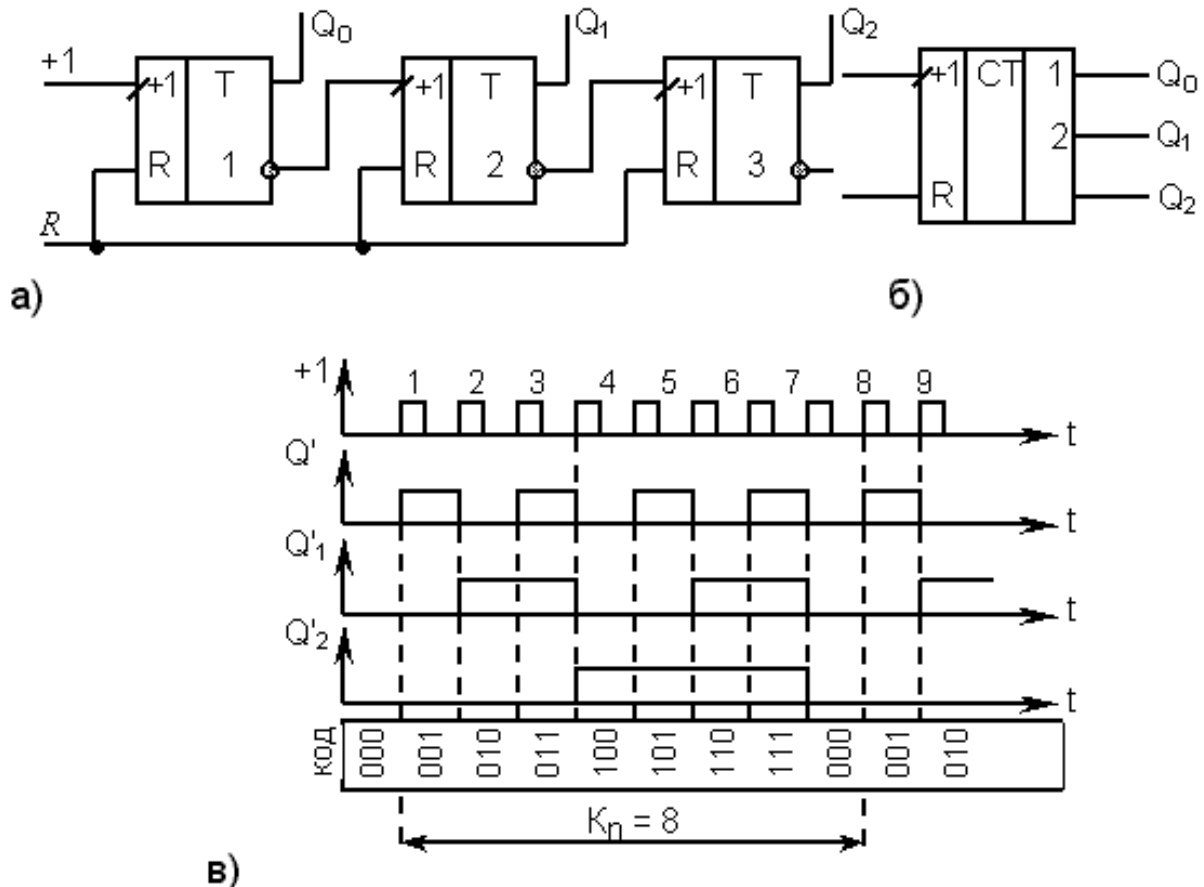


Рис.1.31. Схема (а), условное графическое обозначение и временные диаграммы, поясняющие работу трехразрядного двоичного суммирующего счетчика

Счетчик может принимать 8 различных состояний, которые повторяются через каждые 8 входных импульсов ($K^n = 8$). С наибольшей частотой переключается триггер младшего разряда, следовательно, разрешающая способность счетчика определяется временем задержки переключения триггера ($T_{cm} = T_{me}$). Это положение распространяется на все типы двоичных счетчиков.

Данный счетчик называют счетчиком с последовательным переносом, так как переключение триггера i -го разряда происходит в результате последовательного переключения всех предыдущих триггеров младших разрядов, т.е. информация распространяется по цепочке триггеров последовательно. Время установления счетчика:

$$T_{ycm} = nT_{me} = nT_{cm}. \quad (1.3)$$

Это говорит о том, что если, например, необходимо снимать информацию после каждого входного импульса, период следования их должен быть $T > nT_{me}$. Существенное ухудшение быстродействия с ростом разрядности – основной недостаток счетчиков с последовательным переносом.

У счетчиков информация, в принципе, может снимается с прямых и (или) инверсных выходов всех триггеров. В паузах между входными импульсами триггеры сохраняют свои состояния, т.е. счетчик запоминает число входных импульсов.

Нулевое состояние всех триггеров входящих в состав счетчика принимается за нулевое состояние счетчика в целом. Остальные состояния нумеруются по числу поступивших входных импульсов. Когда число входных импульсов $N_{вх} > K_{сч}$, то говорят, что происходит переполнение (насыщение) счетчика. Далее счет не ведется, а счетчик возвращается в нулевое состояние и цикл счета повторяется (циклически повторяется последовательность состояний). Счетчики с насыщением удобны для фиксации некоторого числа событий. Коэффициент счета, таким образом, характеризует число входных импульсов, необходимое для выполнения одного цикла и возвращения в исходное состояние. Число входных импульсов и состояние счетчика взаимно определены только для первого цикла. Термин модуль используется для обозначения числа различных состояний в счетной последовательности.

При подаче на вход вычитающего счетчика одного счетного импульса ранее записанное в нем число уменьшается на единицу.

Принципы построения вычитающих счетчиков основаны на правилах вычитания двоичных чисел и отличаются от принципов построения суммирующих счетчиком лишь в том, что если триггеры имеют прямой

вход +1, то его подключают к прямому выходу предыдущего триггера, если вход инверсный, то подключают к инверсному выходу.

На рис.1.32 показаны схема (а), условное графическое обозначение и временные диаграммы, поясняющие работу трехразрядного двоичного вычитающего счетчика. Здесь дополнительный вход S позволяет предварительно устанавливать все триггеры в единичное состояние.

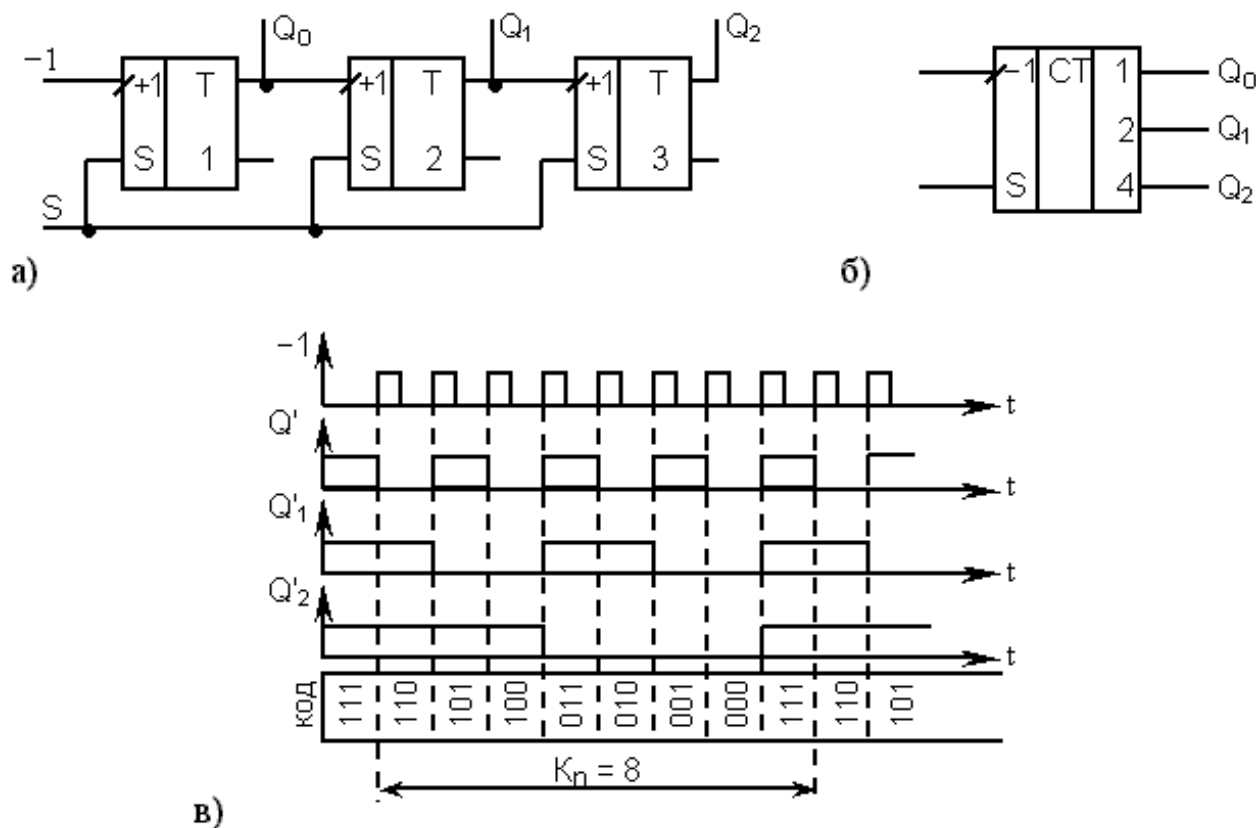


Рис.1.32. Схема (а), условное графическое обозначение и временные диаграммы, поясняющие работу трехразрядного двоичного вычитающего счетчика

Реверсивные счетчики могут работать как в режиме суммирования, так и вычитания. Переключение режимов осуществляется коммутацией счетных входов всех триггеров (кроме триггера младшего разряда) к инверсным или прямым выходам предыдущих триггеров (рис. 1.33). Переключение режима выполняет сигнал разрешения E' . При $E' = 1$ прямой вход i -го триггера коммутируется к прямому выходу $(i - 1)$ -го триггера, что соответствует режиму вычитания. При $E' = 0$ вход подключается к инверсному выходу, и триггер становится суммирующим.

Универсальность реверсивного счетчика достигается ценой введения дополнительно $n - 1$ логических элементов и ухудшения быстродействия.

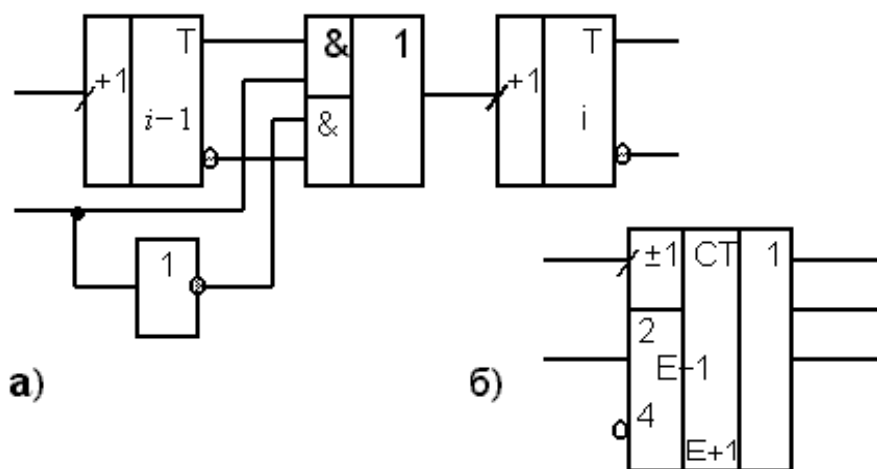


Рис.1.33. Схема (а), условное графическое обозначение трехразрядного двоичного реверсивного счетчика

1.3.2. Двоично – десятичные счетчики. Делители частоты

Для производства счета в десятичной системе счисления чаще всего используются двоично – десятичные счетчики (двоичный — по коду счета, десятичный — по числу состояний), работающие с $K_{сч}=10$. Модуль счета у них 10.

На рис. 1.34 приведен пример декадного (двоично-десятичного) счетчика с исключением старших избыточных состояний.

Счетчики по модулю 10 организуются из четырехразрядных двоичных счетчиков (каждому разряду десятичного числа ставится в соответствие четыре двоичных разряда). Кодирование их внутренних состояний производится в соответствии с двоично – десятичным кодом, однако в них сигнал переноса формируется в состоянии 9.

Для того, чтобы на выходе счетчика не появлялось двоичное число, большее 1001 (т. е. в десятичной системе 9) в счетчик вводят обратную связь с последнего (четвертого, старшего) и второго разряда, которая посредством логического элемента И-НЕ устанавливает все триггеры в нулевое состояние после того как счетчик сосчитал 9 импульсов

(1001). Тем самым ведением дополнительных связей исключаются избыточные шесть состояний.

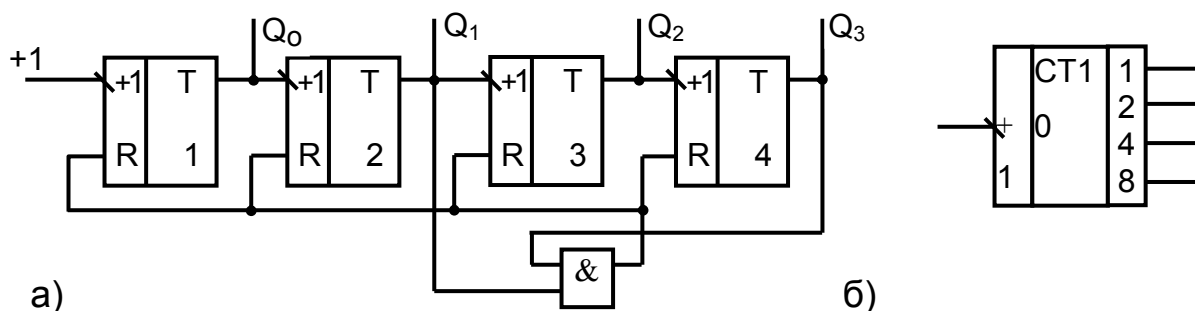


Рис.1.34. Схема (а), условное графическое обозначение двоично - десятичного счетчика

Начальное состояние у него нулевое: $A_0 \{0000\}$. При поступлении входных импульсов счет идет как в обычном двоичном счетчике. Как только устанавливается состояние $A_{10} \{1010\}$, на выходе элемента И-НЕ, играющего роль дешифратора, вырабатывается сигнал $y = Q_1 Q_3 = 1$, и счетчик принудительно переводится в начальное состояние A_0 .

Двоично - десятичные счетчики, выпускаемые промышленностью, весьма разнообразны. Счетчики могут быть синхронными и асинхронными. В последних триггеры при импульсном воздействии счетных сигналов срабатывают не одновременно.

Счетчики (асинхронные и синхронные) могут иметь асинхронные потенциальные входы установки некоторых их начальных состояний.

Во многих случаях используются двоично - десятичные реверсивные счетчики, способные суммировать, вычитать импульсы. Многие счетчики обладают универсальными свойствами и позволяют управлять направлением счета.

Пример микросхемы, в которой реализован двоично – десятичный реверсивный счетчик, построенный на основе J К-триггеров, показан на рис.1.35.

Схема счетчика в интегральном исполнении предназначена для сложения или вычитания поступающих импульсов. Направление счета в

счетчике определяется состоянием на счетных входах триггера С. При прямом счете на вход обратного счета С должно быть подано напряжение высокого уровня.

Для построения счетчика с большой разрядностью (говорят каскадирования счетчиков) используются выходы прямого Р и обратного переноса В. С выхода прямого переноса импульсы подаются на вход прямого счета следующей микросхемы. Можно вводить начальное состояние на входы D0...D3.

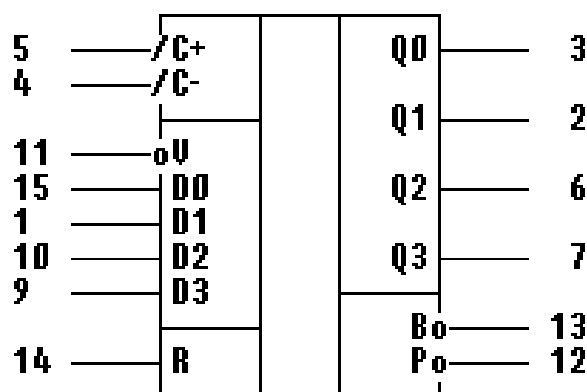


Рис. 1.35. Микросхема, реализующая двоично – десятичный реверсивный счетчик

Одна из важнейших функций, которую выполняют счетчики в цифровых схемах, это деление частоты следования импульсов.

Принцип построения делителей во многом аналогичен принципу построения счетчиков. После завершения каждого цикла подсчета импульсов на выходах последнего триггера возникают перепады напряжения. Поэтому для работы счетчика в режиме деления достаточно использовать выходной сигнал только последнего триггера. При этом промежуточные состояния остальных триггеров во внимание принимать не следует.

Поскольку всякий счетчик может быть использован как делитель частоты, то часто используют термин счетчик-делитель.

В качестве делителя частоты тактового сигнала на коэффициент равный модулю его пересчета может быть использован счетчик со счетным входом (рис.1.36).

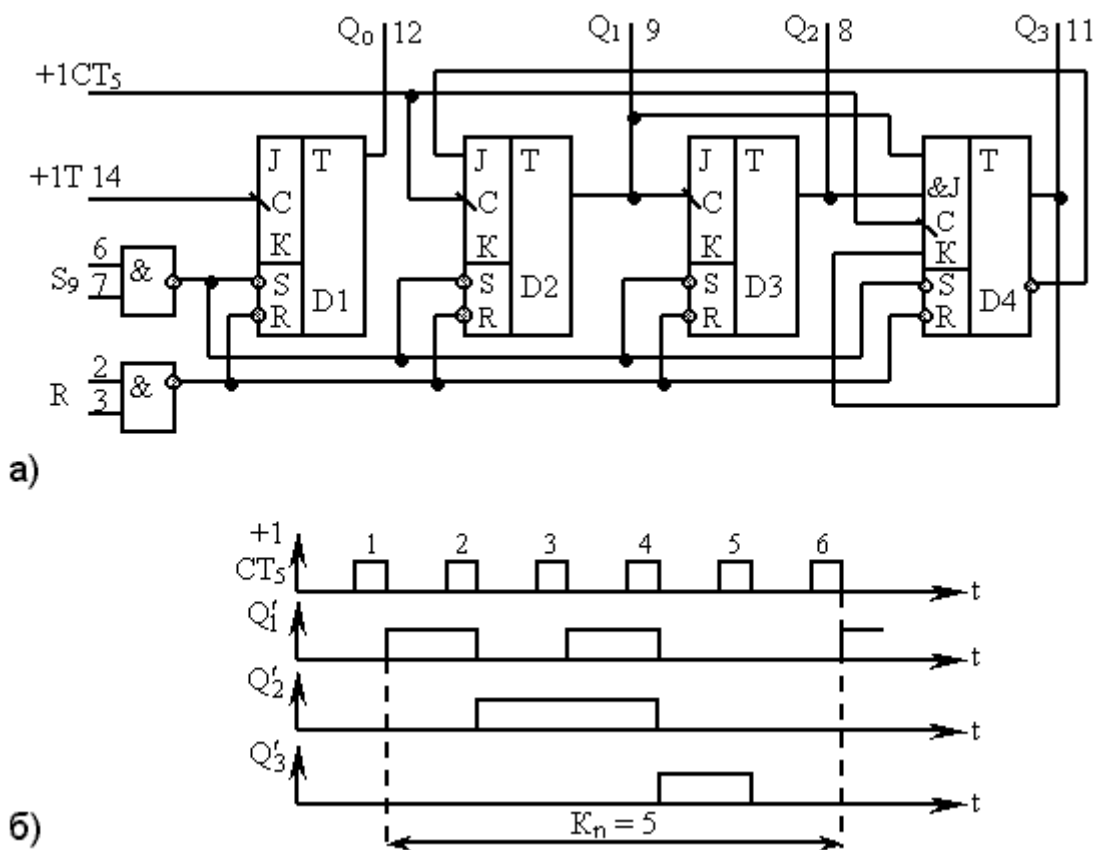


Рис.1.36. Схема (а), условное графическое обозначение и временные диаграммы, поясняющие работу делителя частоты следования импульсов

Если входные сигналы периодичны и следуют с частотой $F_{вх}$, то частота выходных сигналов равна:

$$F_{вых} = F_{вх} / K_{сч}. \quad (1.4)$$

Коэффициент счета $K_{сч}$ в делителях называется коэффициентом деления и обозначается как $K_{дел}$ ($K_{дел} = N_{вх} / N_{вых}$).

Рассмотренный делитель имеет целочисленный коэффициент деления. Однако элементная база современной микроэлектроники позволяет создавать делители и с дробными коэффициентами деления, а также делители с программно изменяемым коэффициентом деления.

На рис.1.37 показан делитель с управляемым коэффициентом деления. Менять коэффициент $K_{дел}$ в делителях можно так же, как и в счетчи-

ках с $K_n \neq 2^n$, т.е. путем исключения различного числа избыточных состояний, но программно – с помощью внешних управляющих сигналов.

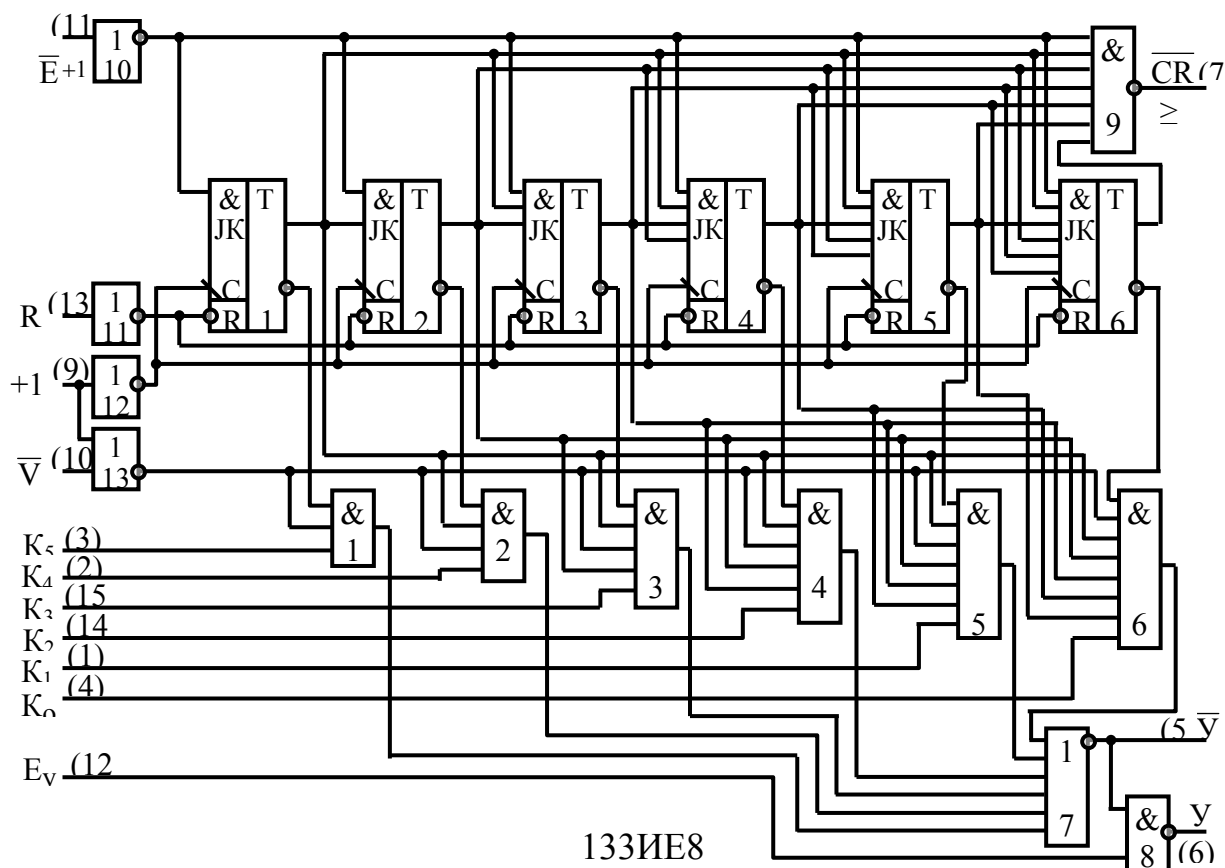


Рис.1.37. Схема делителя с управляемым коэффициентом деления

Делитель состоит из шестиразрядного двоичного счетчика с параллельным переносом, дешифраторов состояний на ЛЭ1...ЛЭ6, выходы которых объединены в один выход \bar{y} элементом ИЛИ-НЕ (ЛЭ7), а также дешифратора-формирователя сигнала переноса \bar{CR} и вспомогательных логических элементов. Каждый дешифратор включается в работу при подаче на него управляющего сигнала $K'_i = 1$.

С целью увеличения диапазона перестройки коэффициента деления микросхемы соединяют последовательно. Сигналы переноса играют роль входных по отношению к последующим микросхемам. Если каскадно соединить 4 двоично – десятичных счетчика, то модуль такого счетчика будет 10^4 . Его можно использовать для деления частоты тактового сигнала в 10000 раз.

1.3.3. Таймеры/счетчики микроконтроллеров

Неоспоримым остается тот факт, что в настоящее время найти серьезное электронное изделие, не имеющее микроконтроллеров, практически не возможно. Микроконтроллеры стали чем - то само собой разумеющимся в телевизорах, DVD-плеерах, автоматических дверях, промышленных системах управления, измерительных устройствах и т.п.

В аппаратную часть таких контроллеров, как правило, входят 8 – разрядный таймер/счетчик T/C0 и 16-разрядный таймер/счетчик T/C1. Таймеры/счетчики T/C0 и T/C1 выполнены в виде суммирующих счетчиков, в которых по фронту импульса увеличивается содержимое счетчика на единицу. По выбору (за счет указания в программе) таймеры/счетчики T/C0 и T/C1 могут применяться как задатчики времени (таймеры) или как счетчики.

В случае использования T/C0 и T/C1 в качестве таймера импульсы подаваемые на вход задаются формирователем, использующим кварцевый генератор. Эти импульсы могут подаваться на счетчик непосредственно или через интегрированный в микроконтроллер десятиступенчатый делитель (на 8, 64, 256, 1024). Коэффициент деления частоты следования импульсов настраивается индивидуально для каждого из таймеров путем программной настройки специального мультиплексора.

Если требуется режим работы «Счетчик» то таймеры/счетчики T/C0 и T/C1 подсчитывают число импульсов поступающих извне на металлический контакт ввода- вывода микроконтроллера. При этом программным путем посредством мультиплексора можно выбрать в качестве активного либо фронт, либо спад поступающих импульсов.

8 – разрядный таймер/счетчик T/C0 хорошо подходит для оценки временных интервалов и формирования так называемых «временных меток». 16-разрядный таймер/счетчик T/C1 используется для решения более сложных задач. В частности, его применяют для того, чтобы создавать импульсы с изменяющейся шириной, и, тем самым, осуществлять широтно – импульсную модуляцию. Поскольку с помощью микроконтроллера относительно легко реализовать ШИМ – сигнал, то T/C1 используется для реализации простых преобразователей цифрового сигнала в медленно изменяющийся сигнал аналоговой величины, так называемых АЦП. Использование таймера/счетчика T/C1 в качестве широтно – импульсного модулятора, преобразующего цифровое число в аналого-

вое значение, позволяет применять микроконтроллеры в системах управления различными объектами, в частности электродвигателями.

Контрольные вопросы

1. Какими двумя способами обычно задается алгоритм работы комбинационной логической схемы (КЛС)?
2. Что называют шифрацией информации?
3. Нарисуйте и поясните условное графическое изображение (УГО) шифратора, который преобразует восемь входных сигналов в трехразрядный (трехбитовый) двоичный код.
- 4. Что такое таблица работы шифратора?**
5. Нарисуйте и поясните условное графическое обозначение дешифратора (декодера) на схемах, который преобразует четырехразрядный двоичный код в 10 выходных сигналов.
6. Какие устройства называют преобразователями кодов и для чего они применяются?
7. Что такое мультиплексоры и демultipлексоры? Для чего они предназначены?
8. Что такое сумматор? Как он функционирует?
9. Что такое цифровой компаратор? Как он функционирует?
10. Что такое триггер? Для чего он предназначен и как он функционирует?
11. Как можно условно разделить входы триггеров?
12. Что такое асинхронные потенциальные RS – триггеры? Поясните их назначение.
13. Что такое синхронные RS – триггеры? Поясните их назначение.
14. Приведите и поясните условное графическое обозначение T-триггера с прямым счетным входом и иллюстрирующие его работу временные диаграммы.
15. Поясните назначение и работу D триггера со статическим входом.
16. Что такое JK - триггер? Как он функционирует?
17. Какие устройства называют счетчиками?
18. По каким параметрам классифицируются цифровые счетчики?
19. Что такое счетчиком с последовательным переносом?
20. Поясните принцип построения делителей.

2. УСТРОЙСТВА ВВОДА, ВЫВОДА, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Большинства изделий цифровой электроники, с которыми Вам приходится работать, например калькуляторы, электронные часы, телефоны, персональные ЭВМ, представляют собой цифровые системы. В свою очередь, эти системы состоят из взаимодействующих друг с другом подсистем (модулей), реализующих какую-то свою функцию. Несмотря на существование разнообразных цифровых изделий, выполняемые ими функции являются типовыми. Это обмен данными между внутренними модулями, получение (ввод) и вывод информации с периферийных (внешних по отношению к системе) устройств, преобразование и хранения ее.

Изучение подсистем мы начинаем с выяснения того, что представляют собой устройства хранения небольших порций цифровой информации, которые называются запоминающими регистрами. Благодаря таким цифровым устройствам осуществляется прием на временное хранение двоичных данных, «запоминание» их на определенное время и, в случае необходимости, по соответствующей команде, выдача их потребителю. Как устройства, обладающие временной памятью, регистры могут также хранить двоичное число позиционировать, т. е. сдвигать на определенное число позиций вправо или влево. Осуществление подобной функции мы наблюдаем при работе калькулятора, когда каждый раз, когда набирается новая цифра, с помощью регистра числа на индикаторе калькулятора сдвигаются влево. Регистры, обладающие таким полезным свойством, как перемещение по позициям двоичных чисел в электронике называют регистрами сдвига.

Затем мы приступим к изучению принципов сопряжения цифровых и аналоговых устройств. Сначала рассматриваются цифро - аналоговые преобразователи (ЦАП). ЦАП нужны для того, чтобы данные цифровых устройств могли быть использованы в аналоговых устройствах. Решение такой задачи необходимо, поскольку цифровые устройства «работают» с двоичным представлением величин, а многие исполнительные устройства электроники с аналоговыми сигналами. Аналого – цифровые преобразователи, сокращенно АЦП, наоборот, предназначены для по-

лучения (ввода) с датчиков или других источников так называемых аналоговых сигналов, изменяющихся непрерывно между двумя уровнями напряжения, и преобразования этих сигналов в двоичный код.

В заключение мы перейдем к изучению запоминающих устройств, часто называемых памятью. Мы рассмотрим состав, структуру, организацию запоминающего устройства, способы ввода информации в устройство (процесс «записи») и извлечения ее из него (процесс «чтения»).

2.1. Регистры

Регистры обычно рассматриваются как устройства для временного хранения многоразрядных двоичных чисел небольшого объема (несколько байт). Они широко распространены в цифровой электронике. Для цифровой техники необходимы устройства, которые бы на некоторое время могли принимать информацию, «запоминать» ее, и, по требованию, выводить ее в виде, удобном для потребителя.

Для хранения n -разрядного числа необходимо иметь в составе регистра систему n -триггеров. Каждый из них фиксирует один бит информации. По этой причине считается, что деление цифровых схем на триггеры и регистры памяти достаточно условно, так как любой триггер, в принципе, можно назвать одноразрядным регистром памяти.

Регистр – это цифровое устройство, представляющее собой систему триггеров, работающих согласованно, единообразно, выполняющее функцию по хранению и преобразованию многоразрядных двоичных слов.

Если представить регистр в виде объединенных в единую конструкцию последовательности элементарных ячеек □□□□□□□□, позволяющих внутри себя размещать один бит информации (0 или 1), а, в целом, размещать двоичное слово (байт), то регистр может выполнять следующие операции над двоичными числами (словами):

1. Формировать на выходе двоичное слово «все нули -00000000» (сброс регистра в ноль);
2. Формировать на выходе двоичное слово «все единицы -11111111» (установить состояние регистра все единицы);
3. Осуществить прием по входу и хранение определенного двоичного числа, например 01001101;

4. Осуществить выдачу на выход двоичного числа из регистра в прямом (например, 01001101) или инверсном коде (10110010);

5. Выполнить преобразование записанного двоичного числа из параллельной формы в последовательную и наоборот;

6. Осуществить сдвиг хранимого в регистре двоичного числа на заданное число позиций (разрядов) вправо или влево.

Регистры на схемах обозначают прямоугольником с надписью RG (от ReGister).

Для ввода данных в регистр могут быть использованы входы, помеченные следующими символами.

SI (Serial Input) – вход для двоичной информации, представленной в последовательной форме.

DS (Data Serial) – вход для двоичных данных, представленных в последовательной форме.

PI (Parallel Input) - вход для двоичной информации, представленной в параллельной форме.

Для вывода данных из регистра могут быть использованы выходы, помеченные следующими символами.

SO (Serial Output) – выход для двоичной информации, представленной в последовательной форме.

PO (Parallel Output) - выход для двоичной информации, представленной в параллельной форме

В общем случае в цифровой электронике могут быть использованы регистры типа SI/PO (с последовательным входом и параллельным выходом), SI/SO (с последовательным входом и последовательным выходом), PI/SO (параллельной записью данных и последовательным выходом двоичных данных), PI/PO (параллельной записью данных и параллельным выводом информации).

Параллельные регистры PI/PO обычно применяются для хранения информации, представленной в виде параллельного двоичного кода. Последовательные регистры SI/PO, PI/SO применяются для преобразования последовательного кода в параллельный или параллельного в последовательный. Универсальные регистры могут совмещать в себе функции последовательного и параллельного регистров.

Все регистры в зависимости от способа приема и выдачи информации условно можно поделить на следующие типы: регистры памяти и регистры сдвига.

Регистрами памяти называют регистры с параллельным приемом и выдачей, а все остальные – сдвигающими (сдвигowymi) регистрами. В свою очередь, по направлению сдвига (передачи) информации различают однонаправленные и реверсивные регистры.

Регистры могут быть асинхронными потенциальными или синхронными (тактируемыми). По аналогии с тем, как асинхронные потенциальные триггеры, независимо от их типа (R-S, D-L и др.) называют триггерами – защелками (Latch) или фиксаторами, так и асинхронные регистры памяти в литературе называют регистрами – защелками или фиксаторами, так как в них фиксируется последнее, записанное в него, значение двоичного слова. Регистры – фиксаторы необходимы для того, чтобы логические сигналы не изменялись в течение некоторого интервала времени.

Совокупность синхронных триггеров некоторого типа с общим тактовым входом называется синхронным регистром памяти.

Простейшим параллельным регистром памяти класса PI/PO является асинхронный потенциальный регистр (рис.2.1).

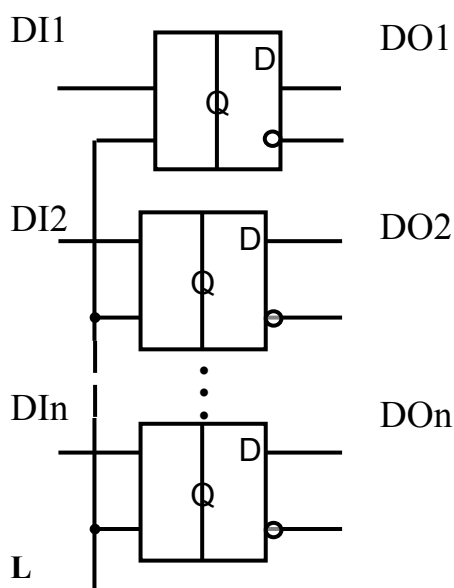


Рис. 2.1. Параллельный асинхронный регистр памяти на основе DL - триггеров

Он осуществляет функции параллельного приема (данные DI1, DI2, ...DIn) и выдачи (данные DO1, DO2, ...DOn) двоичной информации. Такие регистры выполняются на D-L триггерах (триггерах, называемых

«прозрачными» и фиксаторами). Как известно, D-L - триггер при $L = 1$ выдает на своем прямом выходе сигнал $Q_n^+ = DI_n$, определяемый информационным сигналом на информационном входе. Соответственно, любое изменение информационного сигнала DI_n , при наличии сигнала загрузки, сразу же появляется на выходе. Поэтому триггер «прозрачен» и фактически является элементом, выполняющим функцию повторителя.

С другой стороны, в триггере фиксируется последнее значение сигнала DI_n в момент перехода управляющего сигнала (сигнала загрузки) с 1 на 0 (с активного уровня на неактивный). Поэтому в литературе D-L триггер называют фиксатором или защелкой.

Ввод двоичного числа и фиксация информации, содержащейся на входах DI_1, DI_2, \dots, DI_n , происходит по сигналу L (Load – загрузка). Вывод двоичного числа осуществляется с выходов DO_1, DO_2, \dots, DO_n . В общем случае, регистр памяти может иметь высокоимпедансные выходы (выходы с Z - состояниями). Для вывода информации в этом случае подается сигнал разрешения OE (Output Enable).

Синхронные (тактируемые) регистры памяти представляют собой набор синхронных триггеров с независимыми информационными входами. Триггеры объединяются лишь управляющими сигналами (синхронизации, разрешения записи, выдачи, высокого импеданса и др.). Ввод (запись) и вывод (считывание) информации производится одновременно во всех разрядах параллельным кодом. Ввод обеспечивается синхронизирующим импульсом. С приходом очередного такого импульса происходит обновление записанной информации.

Если входная информация парафазная, т.е. каждая переменная поступает одновременно в прямом и инверсном виде, используются RS - или JK -триггеры (рис. 2.2,а), если однофазная, – D -триггеры (рис. 2.2.б). Для обеспечения правильной и синхронной работы в таких регистрах могут использоваться двухтактные MS – триггеры. Считывание информации с выходов может происходить в прямом и обратном кодах, т.е. с прямых и инверсных выходов триггеров.

Синхронные регистры имеют тактовый вход C (Clock – часы, время, такты). Наклонная стрелка у таких входов указывает, что данный вход динамический. Он реагирует на фронт тактового сигнала.

Параллельные синхронные регистры памяти на основе D – триггеров могут иметь асинхронные входы установки нуля (рис. 2.3).

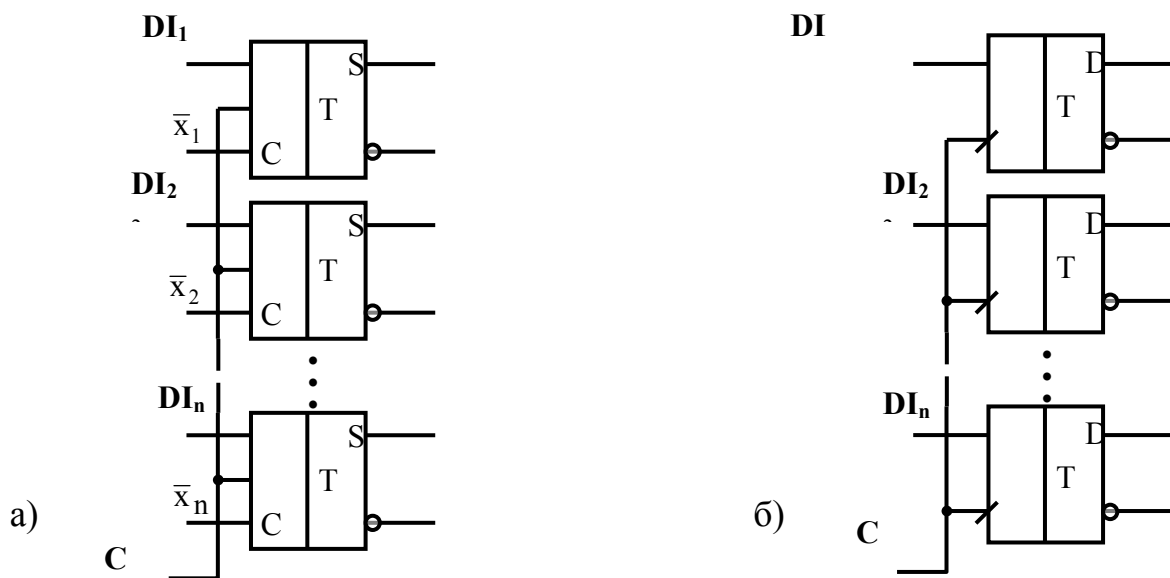


Рис. 2.2. Параллельные синхронные регистры памяти на основе синхронных RS и D - триггеров

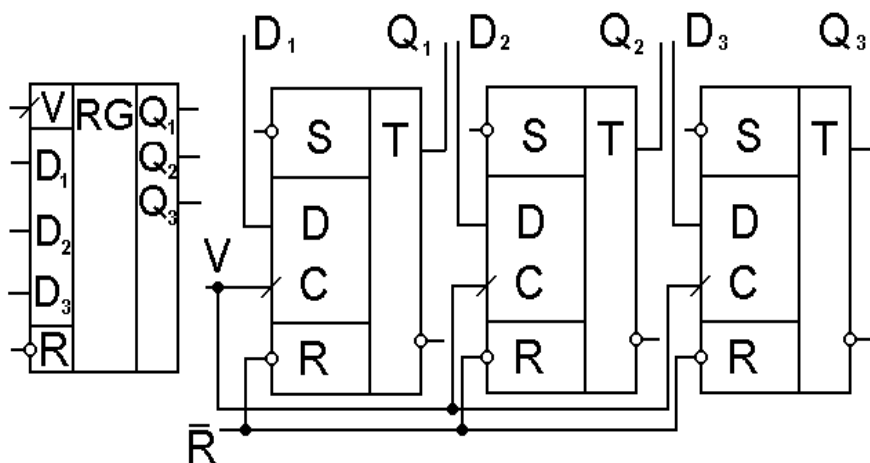


Рис. 2.3. Параллельные синхронные регистры памяти на основе синхронных D – триггеров с входом установки регистра в состоянии «все нули»

В регистрах, предназначенных для работы на информационную магистраль (шину), об устройстве которой будем говорить несколько позже, в качестве выходных (буферных) каскадов используются элементы с тремя состояниями (рис. 2.4), управляемые сигналом разрешения считывания ERD. Типовым примером может служить микросхема 133ИР15 (рис. 2.4).

Это четырехразрядный регистр памяти с однофазными информационными входами D_1, D_2, D_3, D_4 , запись через которые производится по перепаду 0 – 1 синхронизирующего сигнала C' , если на обоих входах разрешения E низкое напряжение. Подача единичного уровня хотя бы на один вход \bar{E} переводит регистр в режим хранения. Для считывания хранящейся в регистре информации на оба входа \overline{ERD} подается низкое напряжение, в противном случае выходы отключаются, что соответствует высокоимпедансному состоянию. Нарращивание разрядности регистра памяти достигается параллельным соединением управляющих входов нескольких микросхем.

Большую долю регистров, используемых в электронике, представляют регистры сдвига. Такие регистры, помимо операции хранения, осуществляют преобразование последовательного двоичного кода в параллельный, а параллельного в последовательный. С их помощью решаются задачи позиционирования двоичных данных, умножения и деления двоичных чисел.

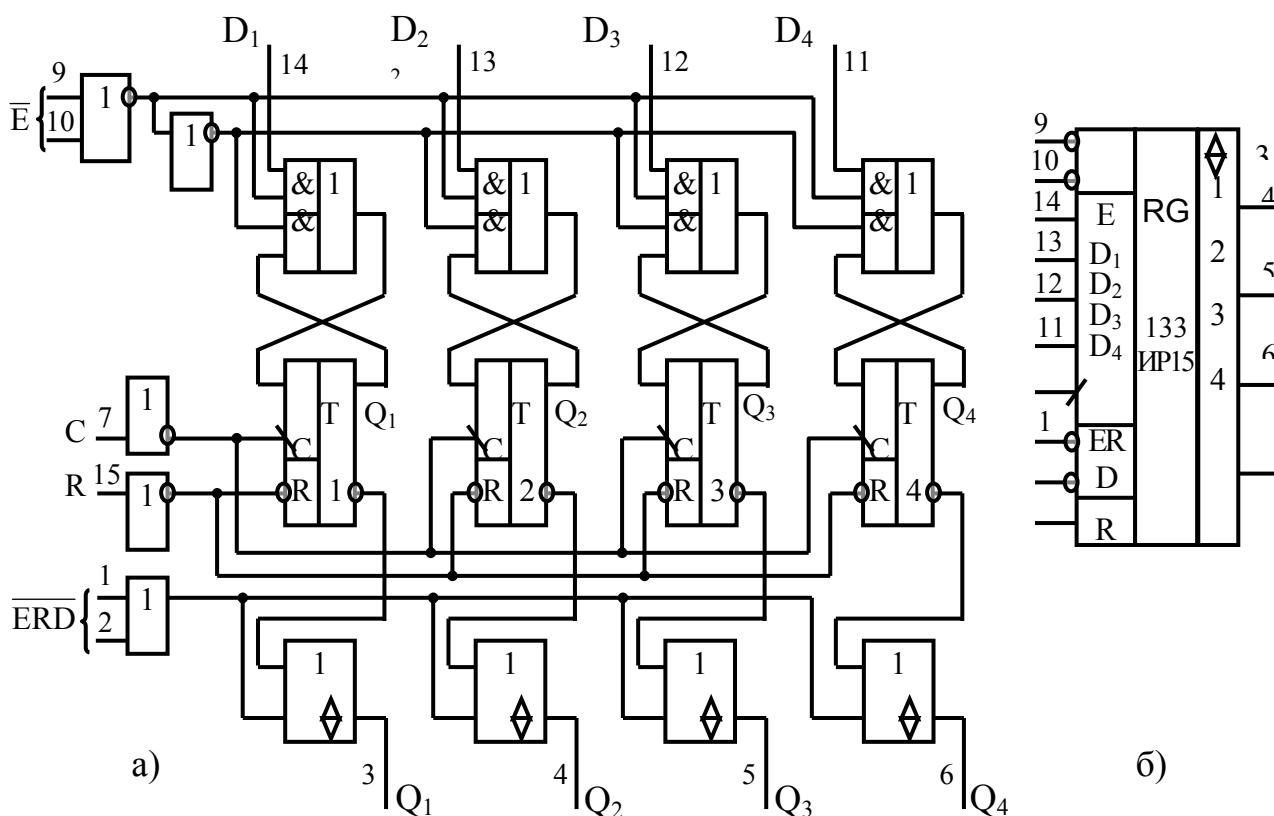


Рис. 2.4. Устройство (а) и условное обозначение на схемах (б) параллельного синхронного регистра памяти с тремя состояниями выхода

Сдвигающие регистры обладают свойством сдвигать (перемещать) записанную в них информацию влево (в сторону старших разрядов) или вправо (в сторону младших разрядов) на заданное число разрядов. Поэтому триггеры в них соединяются последовательно. Сущность сдвига состоит в том, что с приходом синхронизирующего импульса происходит перезапись содержимого триггера каждого разряда в соседний разряд. Число сдвигов определяется числом поступивших синхронизирующих импульсов.

Строятся регистры на триггерах с динамическим входом синхронизации или с внутренней задержкой. Это условие является обязательным. В противном случае при поступлении синхронизирующего сигнала информация может передвинуться не на один разряд, а на столько, сколько раз успеют переключиться триггеры за время действия этого сигнала.

На рис. 2.5 показаны схема, условное графическое обозначение и временные диаграммы работы трехразрядного сдвигающего регистра на D-триггерах. Он реализует способ последовательного приема и последовательной (параллельной) выдачи информации.

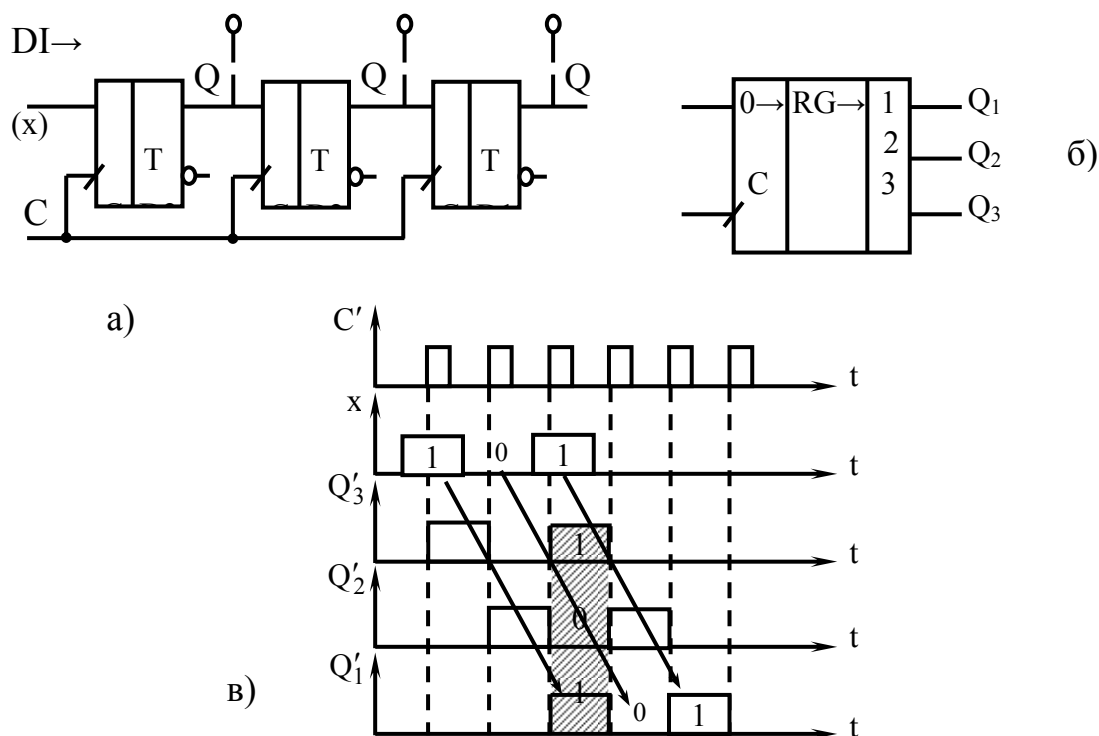


Рис. 2.5. Синхронный трехразрядный сдвигающий регистр на основе синхронных D – триггеров и временные диаграммы его работы

Предполагается, что входная информация поступает младшими разрядами вперед, т.е. входным триггером является триггер старшего разряда, а содержимое регистра в последовательном коде считывается с выхода Q_1 триггера младшего разряда. По каждому фронту импульса C' хранящаяся в i -м триггере двоичная переменная переписывается в $(i - 1)$ -й триггер. Поскольку входы C динамические, последующие изменения уровней напряжения на входах D в пределах данного сигнала $C' = 1$ не приводят к новым переключениям триггеров. Таким образом, при поступлении одного импульса C' информация в регистре сдвигается на один разряд вправо: переменная x со входа $D1 \rightarrow$ записывается в триггер $D3$, предыдущее содержимое его перемещается в триггер $D2$, а предыдущее содержимое $D2$ – в $D1$.

Для полной загрузки регистра новой информацией необходимо подать три (по числу разрядов регистра) синхронизирующих импульса. Последующие импульсы C' обеспечивают выдачу записанной информации с выхода триггера $D1$.

Если импульсы синхронизации поступают непрерывно с периодом T_c , то выходной сигнал Q'_1 повторяет входной x с задержкой на nT_c (здесь $n = 3$), и регистр выступает в роли устройства дискретной задержки цифровой информации.

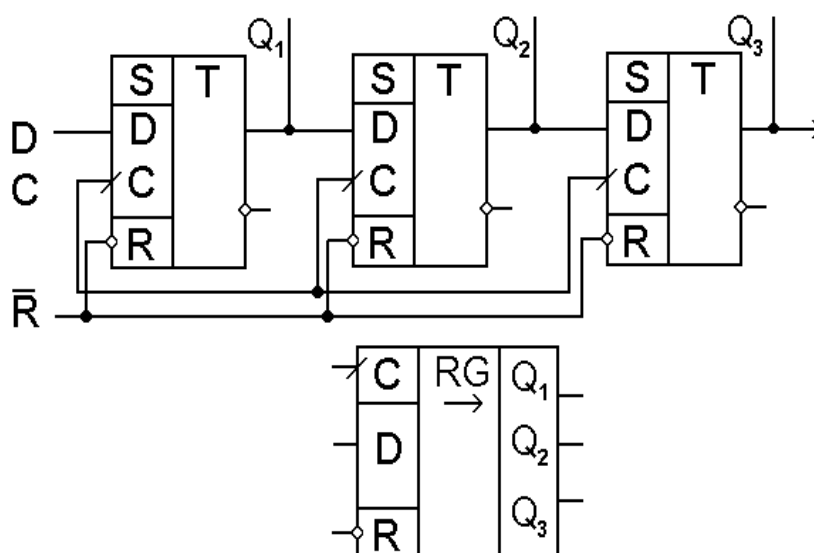


Рис. 2.6. Синхронный трехразрядный сдвигающий регистр с входом установки регистра в состояние «все нули»

Выходы Q триггеров обычно имеют внешние выводы (пунктирные линии на рис. 1.5,а), с которых можно снимать записанную информацию параллельном виде. Иначе говоря, такой регистр может служить преобразователем последовательного кода в параллельный.

Сдвигающие регистры могут иметь вход R, позволяющий устанавливать регистр в состояние «все нули» (рис. 2.6).

Чтобы изменять направление сдвига, не меняя последовательности поступления входных информационных сигналов, используют реверсивные регистры.

Функциональные возможности регистров значительно расширяются при введении режима параллельной записи информации. Такие регистры дополнительно могут выполнять функции регистров памяти, а также преобразователей параллельного кода в последовательный. На рис. 2.7 показана схема такого регистра.

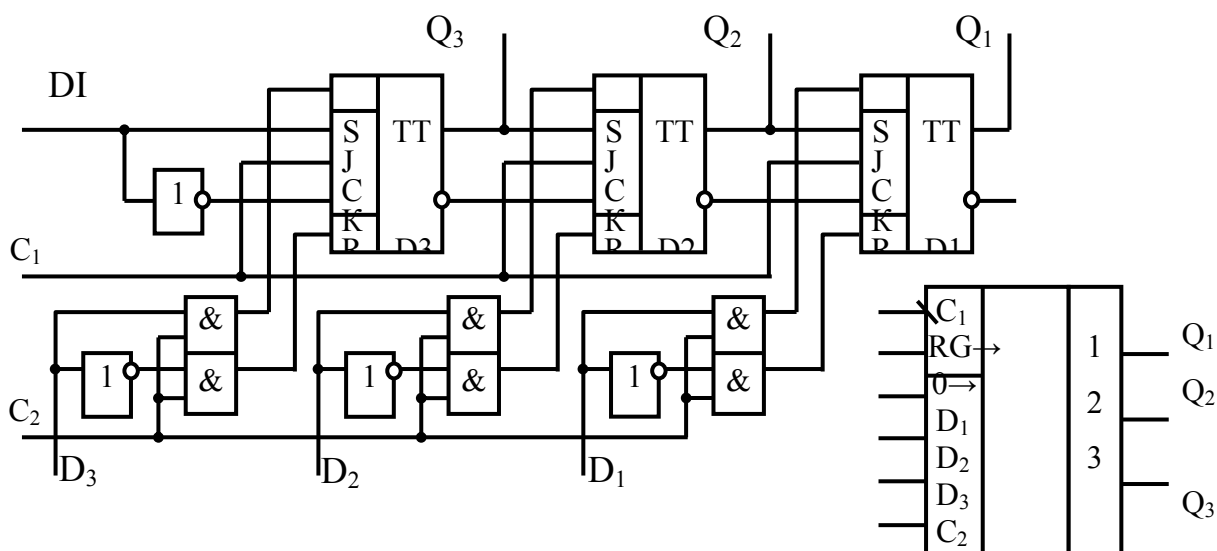


Рис. 2.7. Синхронный трехразрядный сдвигающий регистр с возможностью параллельной записи данных

Он собран на JK-триггерах с асинхронными входами S и R. Параллельная запись двоичной информации осуществляется с помощью коммутаторов, управляемых входными переменными D'_i . В зависимости от значения D'_i команда записи C'_2 проходит на вход S или вход R i-го триггера. В режиме сдвига исполнительным сигналом служит C'_1 . Одновременное поступление синхронизирующих сигналов C'_1 и C'_2 недопустимо.

Для того, чтобы сигналы C'_1 и C'_2 не воздействовали на регистр при их случайном совпадении, т.е. исключалось наложение различных режимов работы, во многих практических схемах вводится управление режимами.

Например, в регистре 133ИР1, схема которого изображена, на рис. 2.8,а, режимы устанавливает сигнал E' . При $E'=1$ информационные входы триггеров, работающих благодаря инверторам ЛЭБ...ЛЭ10 в режиме D-триггера, подключены к входным шинам параллельной записи $D_1...D_4$, а входы синхронизации триггеров – к шине сигнала C'_2 .

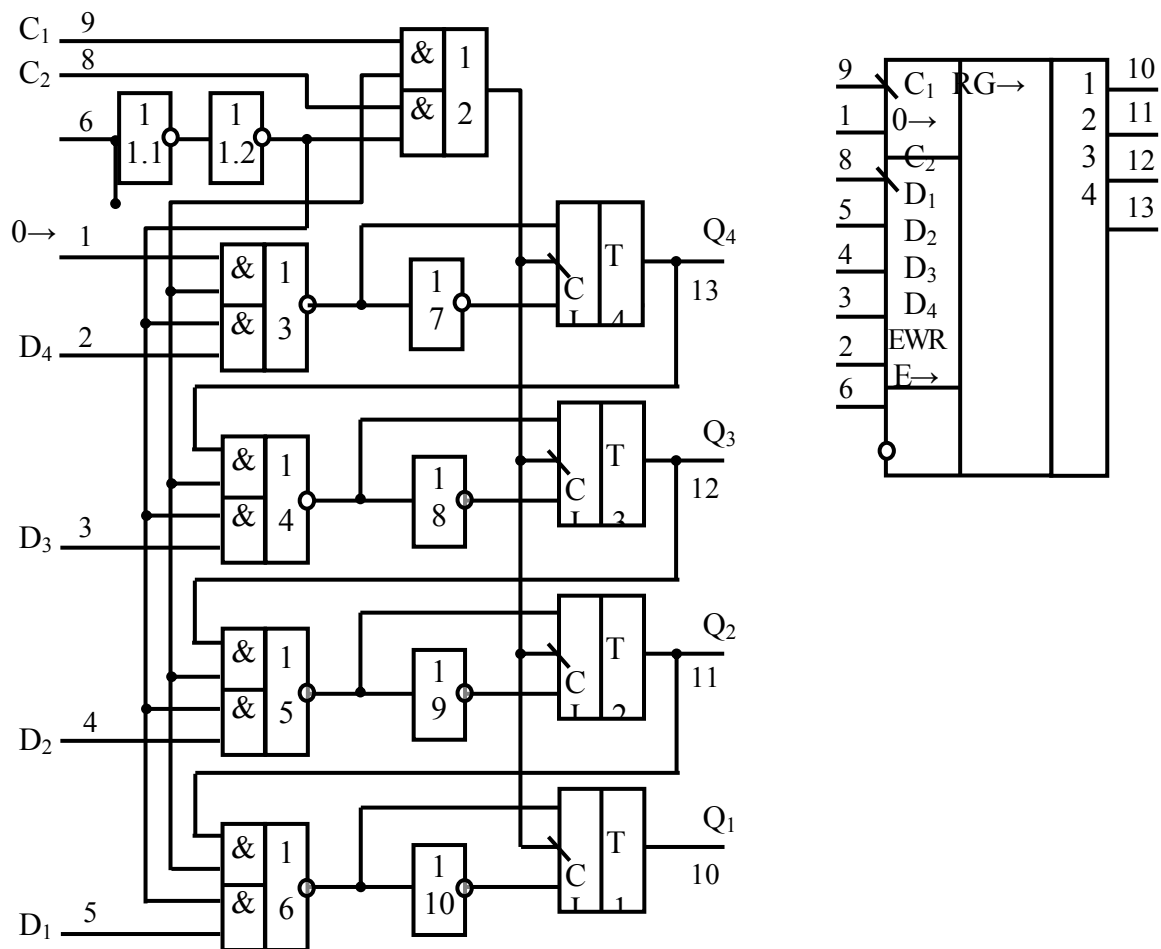


Рис. 2.8. Синхронный четырехразрядный сдвигающий регистр с возможностью параллельной записи данных и со схемой управления режимами

Если $E'=0$, информационные входы триггеров подключены к выходам предыдущих триггеров, а внешняя информация воспринимается по входу $0 \rightarrow$ в виде последовательного кода. При этом работа триггеров

синхронизируется импульсами C'_1 . Сигналы на других входах регистра могут быть любыми.

Многие современные регистры, выполненные в виде ИС, содержат выходные ключи с высокоимпедансным состоянием, что упрощает сопряжение с информационными магистралями. Потребительские возможности регистров ещё выше, если ключи двунаправленные. Введение ключей также во входные цепи регистра позволяет существенно упростить организацию двунаправленной передачи информации между двумя магистралями, причем с возможностью предварительной обработки ее. Такой обработкой может быть сдвиг двоичного числа на m разрядов влево или вправо. Если при этом не происходит потеря знаков числа (что возможно, когда разрядность регистра выше разрядности числа), то сдвиг равноценен соответственно умножению или делению числа на 2^m .

Типовым примером регистра с возможностью двунаправленной передачи может служить ИС 564ИР6 /25/.

Область применения сдвигающих регистров не ограничивается примерами, приведенными выше. Она значительно шире. Так, регистр может стать кольцевым счетчиком при подключении входа $0 \rightarrow$ к прямому выходу последнего триггера. Если в один из разрядов регистра ввести логическую единицу или ноль, то эта единица или ноль с каждым импульсом синхронизации C' будет переходить от триггера к триггеру по замкнутому кольцу с циклом, равным числу триггеров (n). В результате на выходах триггеров формируются импульсные последовательности, смещенные относительно друг друга на период следования импульсов C' . Период следования импульсов в каждой последовательности в n раз больше, чем период следования импульсов C' .

Если на вход $0 \rightarrow$ подавать сигнал с выхода дешифратора, выделяющего определенные состояния регистра, получается генератор кодовых последовательностей.

Подключив вход $0 \rightarrow$ к инверсному выходу последнего триггера, можно увеличить коэффициент пересчета кольцевого счетчика в два раза ($K_n = 2n$). В таком счетчике все триггеры последовательно переходят в единичное состояние, а затем также последовательно в нулевое и т.д. Поэтому для получения сдвинутых импульсных последовательностей необходим специальный дешифратор. Особенность дешифратора

состоит в том, что на каждое состояние счетчика с любой разрядностью требуется конъюнктор всего лишь на два входа.

Для обслуживания отдельных и оконечных устройств посредством информационной магистрали (шины) используют шинные приемо – передатчики, которые также называют двунаправленными драйверами (Bus Driver) «без интеллекта». Они необходимы особенно в тех случаях, когда триггеры регистров выполнены по n –МОП технологии и их нагрузочная способность мала. В таких приемо – передатчиках для временного хранения данных используются асинхронные потенциальные и синхронные регистры памяти. В состав приемо- передатчика может входить сдвигающий регистр, который не только хранит данные, но и преобразовывает последовательные данные в параллельные.

Уже отмечалось, что современный этап развития цифровой техники характеризуется широким применением относительно дешевых микроконтроллеров. В состав микроконтроллера (МК) современной архитектуры обязательно входит большое число (порядка 100) регистров. На рис. 2.9 показана структурная схема одного из таких микроконтроллеров.

В МК все арифметические и логические операции выполняются в арифметико – логическом устройстве (АЛУ – ALU). Обслуживают работу АЛУ 32 (однобайтных - 8 битовых) рабочих (общего назначения) регистра (X, Y, Z,...), напрямую связанные с АЛУ. В МК типа AVR в течение единственного системного такта АЛУ может извлечь из регистров два операнда, выполнить над ним арифметическую или логическую операцию и сохранить результат в регистре назначения. Производительность МК принято оценивать числом операций пересылки «регистр – регистр», которые могут быть выполнены в течение одной секунды. К примеру, у МК AT90S1200 производительность определяется величиной 12 MIPS (Million Instructions Per Second) -12 миллионов выполненных команд в течение одной секунды. Производительность контроллера PIC16 – 5 млн.опер/сек (MIPS).

Информацию, отражающую результат выполнения последней команды программы (арифметического или логического действия над операндами), содержит регистр кода состояния (STATUS REGISTER). Каждая ячейка памяти такого регистра, которая физически представляет собой триггер, содержащий на выходе 0 или 1, с точки зрения программиста, является «флагом». Этот «флаговый» 8 разрядный (по числу хранимых в нем специальных признаков результатов выполненных операций)

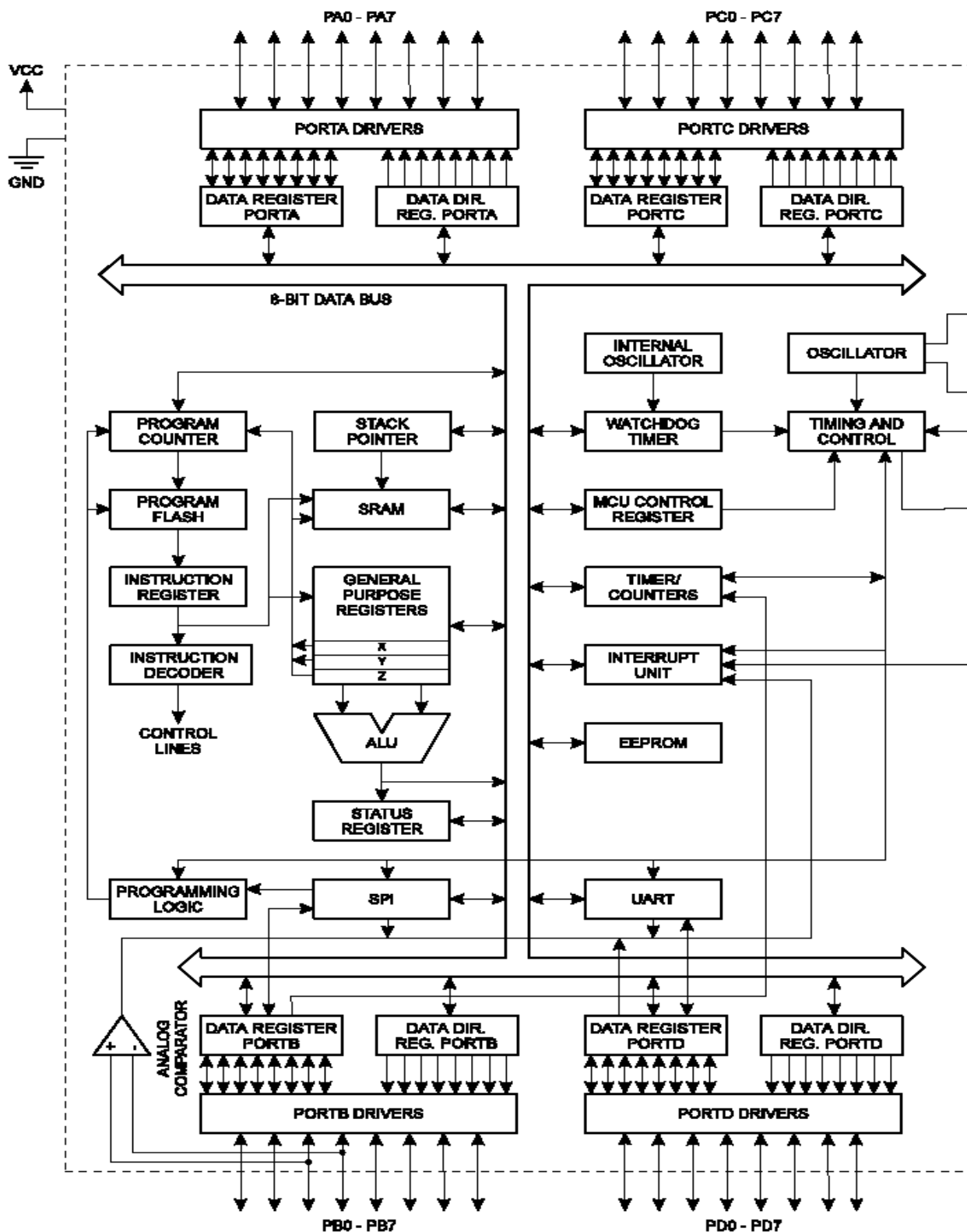


Рис. 2.9. Структурная схема микроконтроллера

регистр кода состояния содержит флаг переноса (указывает на переполнение после выполнения арифметической или логической операции),

нулевой флаг, флаг отрицательного результата, флаг знака и т. п. При этом флаг считается установленным, если флаговый разряд принимает значение 1, и сброшенным, если значение разряда 0. Состояния флагов необходимы пользователю (программисту) и используются при создании программ.

В состав МК входят также 64 регистра, которые называются регистрами специальных функций (ввода – вывода). Это регистры данных, статуса внутренних программируемых модулей ввода/вывода и пр. 8 регистров МК обслуживают так называемые порты.

Чтобы прояснить суть дела сделаем несколько отступлений от основной темы.

На корпусе МК имеются расположенные по периметру выводы (металлические ножки), посредством которых МК «взаимодействует» с внешними устройствами (рис. 2.10).

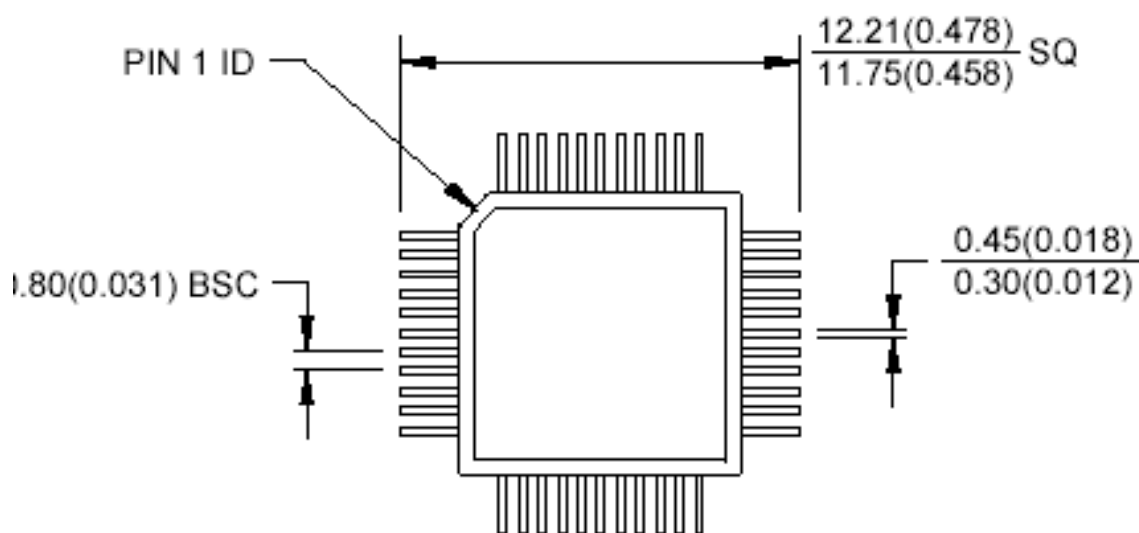


Рис. 2.10. Внешние выводы микроконтроллера

Информационно большинство МК соединены с внешними устройствами при помощи так называемых портов ввода – вывода.

Некоторые внешние выводы МК соединены с линиями (шиной, магистралью) по которым пересылается двоичная информация. Физически шина реализуется в виде параллельных проводящих полосок печатной платы или в виде «связанных» в жгут проводов. Формально под шиной подразумевается группа линий передачи сигналов, обладающая функциональной общностью. Например, соответствующая группа из 8 линий

может служить для передачи 8 разрядных двоичных данных (байта), где по каждой линии передается один разряд двоичного слова. Кстати, заметим, что и внутри МК имеются шины (показаны двойными линиями с общими стрелками), посредством которых передаются данные, адреса и сигналы управления между внутренними модулями.

Для подключения внешних устройств и осуществления посредством шин приема информации от внешних устройств и передачи данных от МК к внешним устройствам отдельные группы контактов объединяются по функциональному назначению в так называемые параллельные порты ввода /вывода. Эти порты предназначены для целостного приема и выдачи двоичной информации в виде байтов. В МК линии ввода/вывода создают двунаправленными и группируют в 8 разрядные порты. Порты данных обычно нумеруются в соответствии с буквами латинского алфавита: порт А (PORT A); порт В; порт С; порт D (рис. 2.10). Нумерация и назначение контактов I/O (вход /выход) МК и расположение четырех портов показаны на рис. 2.11. Все контакты I/O МК являются «двунаправленными», т. е. посредством их можно «принимать» информацию, к примеру, с датчиков, кнопок клавиатуры, и посылать сигналы управления, например, к двигателям, индикаторам на светодиодах или на жидких кристаллах. Говорят, что контакты I/O можно программно конфигурировать (другими словами - порт можно настраивать либо на прием либо на передачу).

Каждый порт (рис. 2.10) в своем составе имеет регистр данных (DATA REGISTER). В режиме ввода данных в МК логические сигналы на ножках (выводах, контактах I/O) порта в виде напряжений, соответствующих нулям и единицам, «записывается» в соответствующие разряды регистра данных порта. В режиме вывода, данные, записанные в регистр данных (например, при помощи программы), передаются в виде потенциалов на ножки МК (выводы, контакты I/O). Регистры данных являются «защелками» и имеют выходной буфер, повышающий их нагрузочную способность. Настраивается направление передачи данных (выполняется конфигурирование порта) программно, путем записи управляющего слова в специальный регистр, получивший название регистра направления передачи порта (DATA DIR. REGISTER). Причем каждому разряду порта данных поставлен в соответствие одноименный разряд регистра направления передачи. Нулевое значение разряда регистра

направления конфигурирует контакт I/O на ввод, единичное - на вывод двоичной информации.

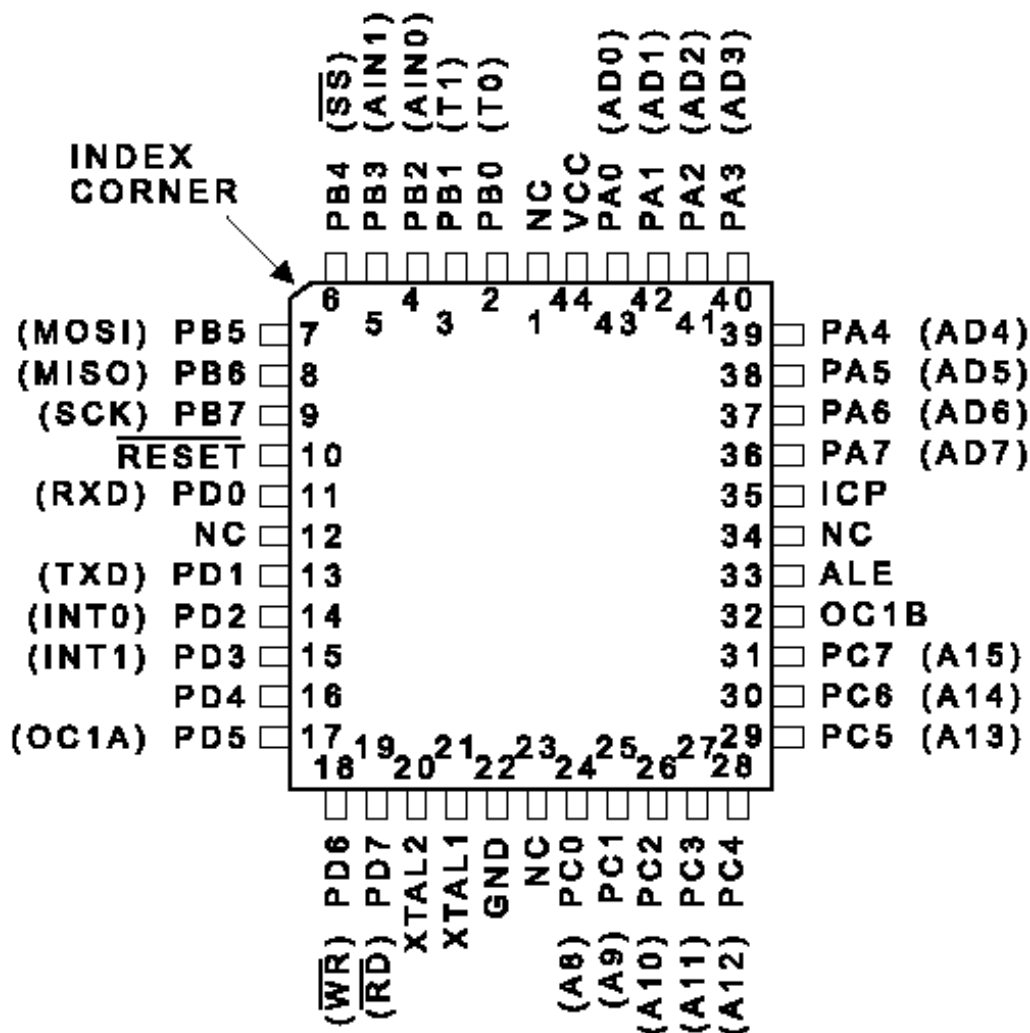


Рис. 2.11. Расположение портов микроконтроллера на внешних выводах

О назначении и выполняемых функциях других регистров МК можно найти в техническом описании МК.

В заключение обратим внимание на одно важное обстоятельство. Мы смотрели на регистры с точки зрения схемотехники. Нас интересовало то, на каких триггерах сделан регистр, какой ток он потребляет или отдает через свои выводы, как он сопрягается с другими устройствами с точки зрения уровней напряжения и т.п. Программисты, работающие с МК и оперирующие такими понятиями как команды и программы, смотрят на регистр как на один из программно доступных элементов, кото-

рый следует задействовать с точки зрения переработки информации. Их мало интересует схемотехника, им важнее выполняемые логические функции и какие при этом используются команды. Поскольку МК представляет, по существу, набор различных регистров, то каждому регистру, как программному объекту, ставится в соответствие свой «адрес» - двоичный код, однозначно определяющий тот или иной программно доступный элемент в так называемом адресном пространстве (см. п.2.3). Понятие адресного пространства позволяет наглядно представить размещение адресов всех программно доступных элементов. Например, 32 рабочим регистрам поставлены в соответствие адреса от 00h до 1Fh адресного пространства (h – в шестнадцатеричном представлении). К ним можно адресоваться как к любым другим программно доступным элементам. Регистры ввода вывода также имеют свои адреса. Программно легко осуществить «перезапись» информации с одного регистра в другой. К примеру, по команде *mov Rd, Rr*, будет выполнено копирование содержимого регистра Rd в Rr. Для доступа к регистрам ввода/вывода используют команды *in, out* ввода /вывода. По команде *out* один байт из какого-нибудь одного из 32 рабочих регистров переписывается в указанный регистр ввода/вывода. Команда *in* считывает содержимое одного из регистров ввода/вывода в указанный рабочий регистр.

2.2. Цифро-аналоговые и аналогово-цифровые преобразователи

2.2.1. Цифро-аналоговые преобразователи

Цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) называют устройство, обычно являющееся интегральной схемой, которое служит для преобразования входного сигнала заданного в цифровом коде (цепочки битов, двоичного слова) в аналоговый выходной сигнал (чаще всего в напряжение).

ЦАП, по сути является декодирующим устройством, на вход которого поступает цифровой сигнал N , а с выхода снимается аналоговый сигнал Y , связанный с входным соотношением:

$$Y = N \cdot q, \quad (2.1)$$

где q – чувствительность (цена младшего разряда) преобразователя.

В интегральных ЦАП входным сигналом, как правило, является двоичный позиционный код. Выходным сигналом обычно является постоянное напряжение. Такие ЦАП называются преобразователями кода в напряжение (ПКН). В соответствии с (2.1) выходное напряжение ПКН можно представить в виде:

$$U_{\text{вых}} = N \cdot U_0, \quad (2.2)$$

где U_0 – цена младшего разряда ПКН.

Число N в двоичной системе счисления представляется следующим выражением:

$$N = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i2^i, \quad (2.3)$$

где a_i – значение разрядов входного кода (0 или 1);

n – число разрядов входного кода.

Поэтому выходное напряжение ПКН в соответствии с (2.2) имеем:

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i2^i U_0. \quad (2.4)$$

Таким образом, преобразование кода в напряжение заключается в суммировании эталонов напряжения $2^i U_0$, пропорциональных весам разрядов входного кода. В суммировании принимают участие только те эталоны, для которых $a_i = 1$.

При последовательном возрастании значений входного кода N выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ образует ступенчатую функцию (рис. 2.12,а). Такая зависимость называется статической характеристикой преобразования $U_{\text{вых}} = f(N)$. Она определяет основные статические параметры ПКН.

У идеального ПКН все ступеньки характеристики преобразования имеют одинаковые значения U_0 и средние точки ступенек расположены на идеальной прямой 1 (рис. 2.12,а). Важным параметром ЦАП является разрешающая способность. Абсолютное значение разрешающей способности ЦАП равно цене младшего разряда:

$$U_o = \frac{U_{\text{вых } m}}{2^n - 1}, \quad (2.5)$$

где $U_{\text{вых } m}$ – максимальное выходное напряжение преобразователя.

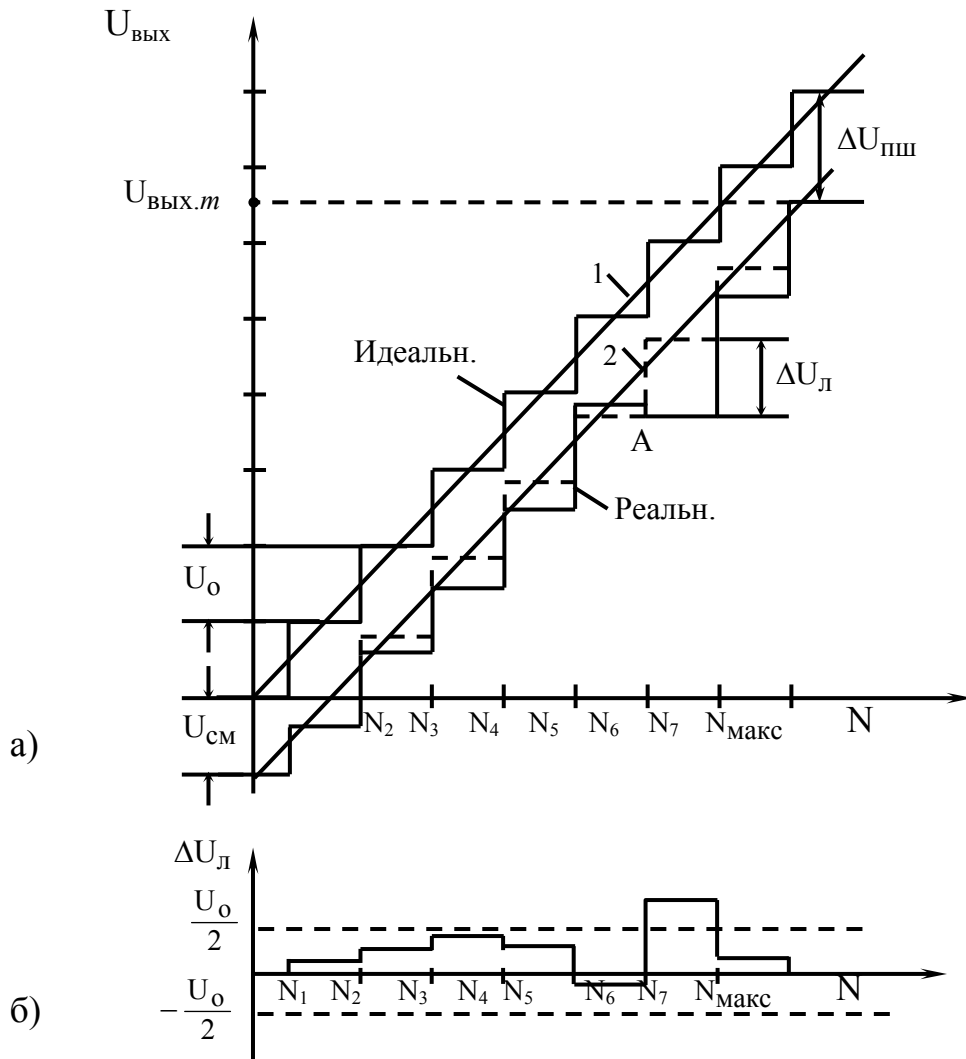


Рис. 2.12. Статическая характеристика ЦАП $U_{\text{вых}} = f(N)$

Указанная разрешающая способность является потенциально возможной и характеризует только идеальные ПКН.

Наличие различных погрешностей узлов реальных ЦАП приводит к тому, что их статические характеристики преобразования существенно отличаются от идеальных (рис. 2.12,а). Это вызывает погрешности преобразователя и ухудшение его разрешающей способности.

Для количественного описания суммарной инструментальной погрешности вводится ряд параметров.

Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы (погрешность полной шкалы) $\Delta U_{пш}$ определяет отклонение значения выходного напряжения $U_{вых\ m}$ от номинального (расчетного) при максимальном входном коде $N_{макс}$ (рис. 2.12,а). Погрешность полной шкалы приводится в справочных данных в единицах младшего разряда

Погрешность смещения нуля на выходе $U_{см}$ – характеризует значение $U_{вых}$ при нулевом значении входного кода (рис. 2.12,а).

Дифференциальная нелинейность $\delta_{лн}$ – характеризует отклонение разности значений двух выходных напряжений, соответствующих двум соседним кодам, от цены младшего разряда.

Погрешность нелинейности $\Delta U_{лн}$ – характеризует идентичность приращений (ступенек) выходного сигнала во всем диапазоне преобразования. Она определяется как максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от линии абсолютной точности. Линия проводится через точки на характеристике, соответствующие минимальному и максимальному значениям входного кода (рис. 2.12,а). Абсолютное значение погрешности нелинейности измеряется в единицах младшего разряда. Погрешность нелинейности (рис. 2.12,б) является наиболее важной характеристикой ПКН и, как правило, не должна выходить за пределы $\pm U_0 / 2$. В противном случае характеристика преобразования может быть немонотонной. Это означает, что при подаче входного кода, требующего увеличения выходного напряжения, оно может уменьшиться (участок А характеристики реального ПКН на рис. 2.12,а).

Суммарная статическая погрешность ПКН в основном определяется рассмотренными выше составляющими. В ряде случаев она может быть уменьшена за счет компенсации погрешностей полной шкалы и смещения нуля. Это достигается изменением коэффициента усиления и балансировкой выходного усилителя преобразователя.

Из динамических параметров ПКН наиболее существенными являются время установления выходного напряжения и максимальная частота преобразования.

Время установления выходного напряжения $t_{уст}$ – интервал времени от момента поступления входного кода до момента установления выходного напряжения с заданной точностью.

Максимальная частота преобразования $f_{с, макс}$ – наибольшая частота дискретизации (поступления входных кодов), при которой параметры ПКН соответствуют заданным значениям.

Наряду с рассмотренными характеристиками ПКН в справочных данных приводятся параметры входного кода и предельные эксплуатационные параметры.

Если на входе ПНК цифровое двоичное число состоит из цепочки k – битов, то аналоговую величину на выходе ЦАП можно получить путем суммирования (с определенным весом) на общую нагрузку частичных токов (напряжений), подключаемых к нагрузке посредством ключей управляемых цифровым кодом. Функциональная схема ЦАП, построенного по такому принципу, приведена на рис. 2.13.

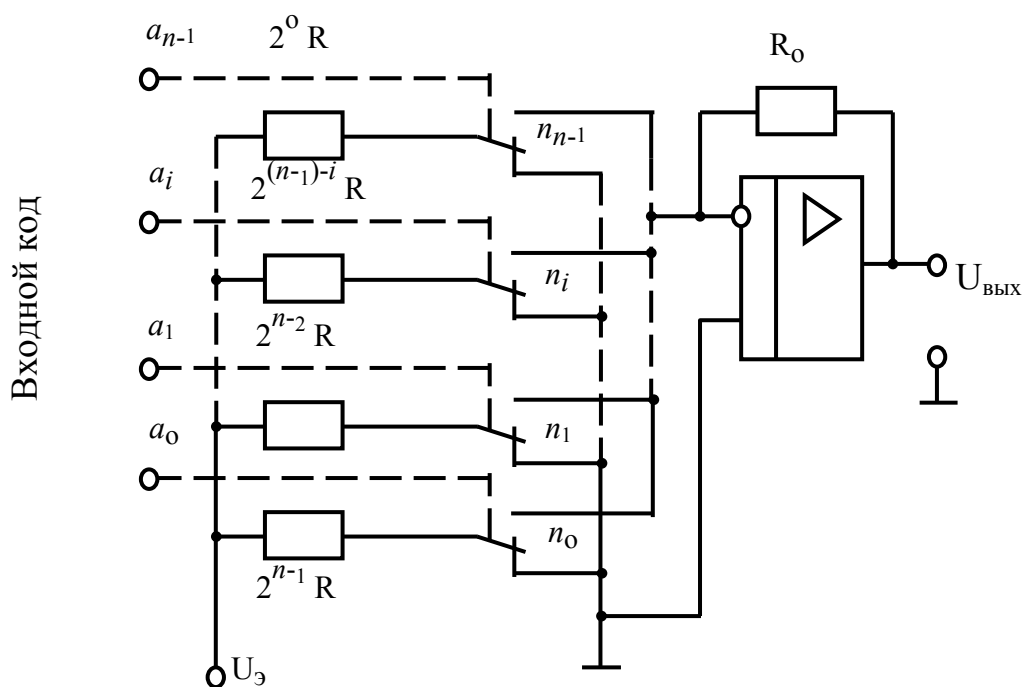


Рис. 2.13. Простейшая схема, поясняющая принцип работы ЦАП с суммированием токов

Схема состоит из набора резисторов, называемых резистивной матрицей, источника напряжения, суммирующего усилителя, набора ключей

(переключателя), которые включаются и выключаются в соответствии со значениями цифрового кода, подсоединяя вход усилителя, то к точке нулевого потенциала, то к источнику через резистор. В качестве источника электрического сигнала в нем используется источник стабилизированного напряжения $U_{\text{э}}$. Преобразователь состоит из n переключателей тока ($\Pi_0 \dots \Pi_{n-1}$). Сопротивления матрицы резисторов, "взвешены" по двоичному закону от $2^0 R$ в старшем $n - 1$ разряде до $2^{n-1} R$ в младшем (нулевом) разряде. Сумматор токов выполнен на операционном усилителе (ОУ).

На управляющие входы переключателей $\Pi_0 \dots \Pi_{n-1}$ подается входной код, на коммутируемые входы – стабилизированное напряжение $U_{\text{э}}$ (через делитель, элементами которого являются весовые резисторы матрицы).

Принцип действия такого ЦАП основывается на работе аналогового n -входового сумматора на ОУ. Коэффициент передачи по каждому входу определяется значением весового резистора матрицы, который подключается к инверсному входу ОУ соответствующим переключателем.

Для определенности возьмем ЭДС источника равным 3 В, резисторы матрицы $R = 18,7$ кОм, $2R = 37,5$ кОм, $4R = 75$ кОм, $8R = 150$ кОм. Величина резистора обратной связи $R_0 = 10$ кОм.

При нулевом значении входного кода ($a_i = 0$) ключи замкнуты на общий провод (точку нулевого потенциала), входное напряжение суммирующего усилителя равно нулю и $U_{\text{вых}} = 0$. Если, в соответствии с логической единицей в младшем разряде, ключ через резистор $8R = 150$ кОм подключит источник напряжения, то в соответствии с логикой работы суммирующего усилителя напряжение на его выходе будет $3 \cdot 10 / 150 = 0,2$ В. Нетрудно, рассуждая аналогично, получить напряжение на выходе ЦАП при других значениях входного двоичного слова (табл. 2.1).

Если рассуждать в общем виде, то при $a_i = 1$ во входном коде, i -й переключатель подключит к входу сумматора весовой резистор со значением $2^{(n-1)-i} R$, по которому будет протекать ток:

$$I_i = \frac{a_i U_{\text{э}}}{2^{(n-1)-i} R}, \quad U_{\text{вых } i} = I_i R_0 = \frac{a_i U_{\text{э}} R_0}{2^{(n-1)-i} R}. \quad (2.6)$$

Таблица 2.1

Пояснение принципа работы ЦАП с суммированием токов

Цифровой код				Выход
2^3	2^2	2^1	2^0	Вольты
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0,2
0	0	1	0	0,4
1	1	1	1	2,8
1	1	1	1	3

В общем случае при произвольном значении входного кода:

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=0}^{n-1} U_{\text{вых } i} = \frac{U_{\text{э}} R_o}{2^{(n-1)} R} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i = \frac{U_{\text{э}} R_o}{2^{(n-1)} R} N. \quad (2.7)$$

Как следует из выражения (2.7), выходное напряжение ПКН пропорционально значению входного кода N .

Коэффициент пропорциональности определяет цену младшего разряда данного преобразователя:

$$U_o = \frac{U_{\text{э}} R_o}{2^{n-1} R}, \quad (2.8)$$

которая зависит от соотношения сопротивлений резистора R_0 в цепи обратной связи ОУ и максимального весового резистора матрицы. Если на вход ПКН поступает максимальный входной код ($a_i = 1$ во всех разрядах), то переключатели $\Pi_0 \dots \Pi_{n-1}$ подключат все весовые резисторы ко входу сумматора. При этом максимальное значение выходного напряжения:

$$U_{\text{вых макс}} = \frac{U_{\text{э}} \cdot R_o}{2^{n-1} R} (2^n - 1). \quad (2.9)$$

Схема ЦАП с весовым суммированием токов имеет два существенных недостатка:

1. В ней используются резисторы высокой точности исполнения с большим диапазоном значений (необходимо использовать сопротивлений различных номиналов, максимальный перепад которых равен 2^{n-1} (от R до $2^{n-1}R$)). Кроме того, отношение рассеиваемых мощностей на граничных весовых сопротивлениях составляет 2^{n-1} . Реализовать такую матрицу сопротивлений в интегральном исполнении практически не представляется возможным. Поэтому в таких схемах резисторы изготавливаются отдельно от остальной части ЦАП, обычно выполняемой в виде интегральной схемы.

2. Точность цифро – аналогового преобразования невелика, поскольку при таком широком диапазоне сопротивлений и рассеиваемых мощностей трудно выдержать строго двоичные соотношения между сопротивлениями.

Чтобы избежать указанных недостатков используют различные технические решения.

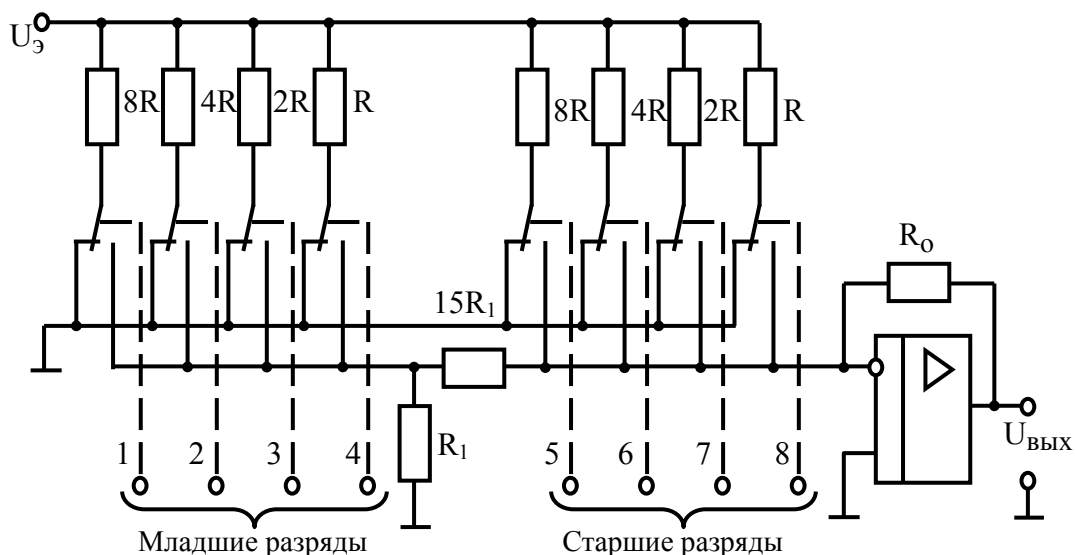


Рис. 2.14. Схема, поясняющая принцип работы ЦАП, в котором переключатели и резисторы группируются в четверки с сопротивлениями весовых резисторов R , $2R$, $4R$, $8R$

А. Переключатели и резисторы группируются в четверки с сопротивлениями весовых резисторов R , $2R$, $4R$, $8R$ и максимальным соотношением разрядных токов 8, как показано на рис. 2.14.

Ток преобразователя младших разрядов до выхода делится с помощью резистивного делителя $16 : 1$. В преобразователе имеется лишь четыре резистора с различными весовыми сопротивлениями, что значительно уменьшает проблемы, связанные с согласованием разрядных токов. Для обеспечения одинаковой температурной зависимости сопротивлений весовых резисторов и резистора обратной связи R_o , последний, как правило, выполняется в составе матрицы резисторов. Рассмотренный принцип построения матрицы весовых резисторов широко применяется в интегральных ЦАП, например, в 12-разрядном ПКН К594ПА1.

Б. ЦАП с резистивной матрицей $R - 2R$ лестничного типа, которые, по сравнению с предыдущим способом, получили ещё более широкое распространение.

Функциональная схема ПКН на матрице резисторов $R - 2R$ приведена на рис. 2.15.

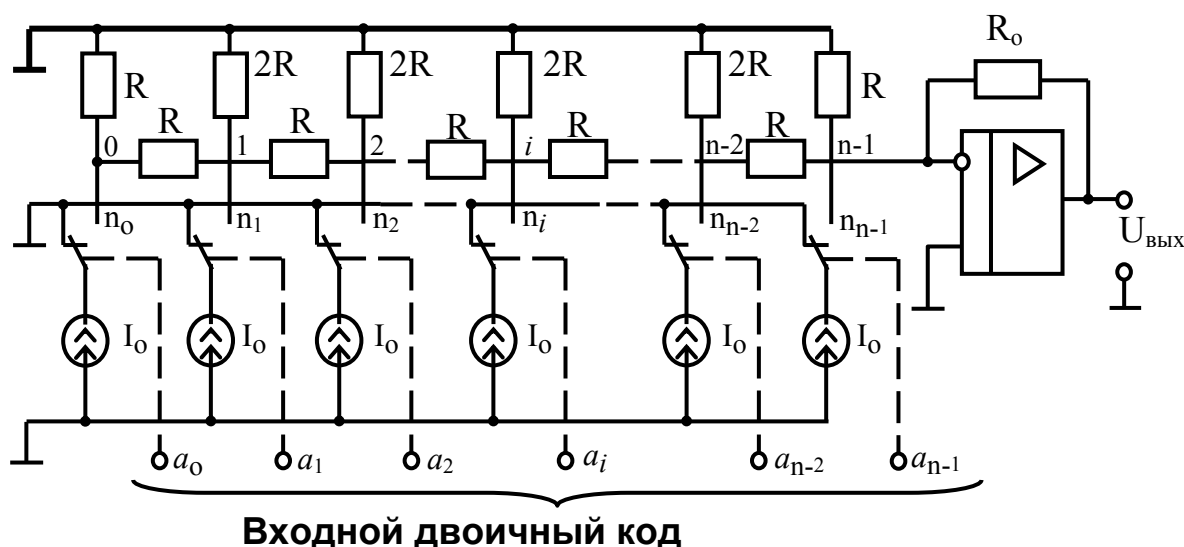


Рис. 2.15. Схема, поясняющая принцип работы ЦАП, на матрице резисторов $R - 2R$

В качестве источников эталонного сигнала в преобразователе применены n генераторов стабильного тока I_o . Кроме них в ПКН входят n переключателей тока, матрица резисторов $R - 2R$ и буферный усилитель (ОУ, охваченный отрицательной обратной связью), предназначен-

ный для исключения влияния сопротивления нагрузки R_H на параметры преобразователя. Матрица резисторов $R - 2R$ состоит только из двух номиналов R и $2R$. Расположение резисторов напоминает расположенную горизонтально «лестницу». Обратите внимание, что номиналы вертикальных резисторов «лестницы» ровно в 2 раза больше горизонтальных резисторов.

Особенностью матрицы резисторов является то, что общее сопротивление между любой i -й точкой матрицы и общей шиной равно $\frac{2}{3}R$, а потенциал, приложенный к i -й точке, в каждой последующей справа (или слева) точке, по правилу делителя напряжения будет уменьшаться в два раза (рис. 2.16).

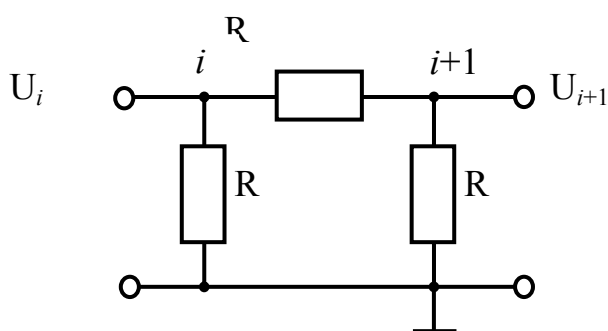


Рис. 2.16. Эквивалентная схема матрицы $R - 2R$ в i -й точке

Такой ЦАП работает аналогично простейшему ЦАП. Входной двоичный код поступает на переключатели $\Pi_0 \dots \Pi_{n-1}$. Если во всех разрядах $a_i = 0$, то выходы всех стабилизаторов тока I_0 подключены к общей шине, и выходное напряжение ПЧН равно нулю. При наличии единицы в i -м разряде входного кода переключатель Π_i подключает генератор тока I_0 к i -й точке матрицы. Так как внутреннее сопротивление стабилизаторов тока значительно больше сопротивления R резисторов матрицы, то независимо от положения других переключателей, сопротивление в i -й точке матрицы равно $\frac{2}{3}R$. Поэтому, когда замкнут только i -й переключатель, в точке с номером i создается падение напряжения:

$$U_i = a_i \frac{2}{3} R I_0 \quad (2.10)$$

Это напряжение в каждой последующей $i + 1$ -й точке делится пополам (рис. 2.16). При этом на выходе буферного усилителя ПКН создается напряжение:

$$U_{\text{вых } i} = \frac{U_i \cdot K}{2^{(n-1)-i}} = \frac{a_i 2R I_o K}{3 \cdot 2^{(n-1)-i}}, \quad (2.11)$$

где K – коэффициент передачи буферного усилителя.

Поскольку матрица резисторов является линейной цепью, то в случае, когда замкнуто произвольное число переключателей, выходное напряжение ПКН можно вычислить как сумму:

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=0}^{n-1} U_{\text{вых } i} = \frac{2}{3} R I_o K \frac{1}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i. \quad (2.12)$$

При использовании в качестве буферного усилителя операционного усилителя (рис. 2.15), коэффициент передачи которого определяется отношением сопротивления обратной связи R_o и выходного сопротивления матрицы $R_M = \frac{2}{3} R$, выходное напряжение ЦАП с резистивной матрицей $R - 2R$ лестничного типа будет:

$$U_{\text{вых}} = \frac{I_o R_o}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i. \quad (2.13)$$

Цена младшего разряда преобразователя:

$$U_o = \frac{I_o R_o}{2^{n-1}} \quad (2.14)$$

практически не зависит от параметров резисторов матрицы. Сопротивление резисторов матрицы можно выбрать такой величины, которые относительно просто можно реализовать в интегральных схемах. Малые сопротивления резисторов матрицы $R - 2R$ в сочетании с быстродействующими переключателями тока позволяют создавать ПКН с временем установления единицы-десятки наносекунд. Матрица резисторов $R - 2R$

практически легко согласуется с интегральной полупроводниковой технологией и в большинстве случаев является основой многоразрядных интегральных преобразователей.

В самых различных устройствах систем управления и измерения часто возникает задача преобразования двоичного кода во временной интервал. Известно большое количество устройств, выполняющих такую операцию. Наибольшее распространение получили преобразователи кода во временной интервал на основе двоичного счетчика и на сочетании двоичного счетчика и цифрового компаратора. ЦАП, выходным сигналом которого является временной интервал, называется преобразователем кода во временной интервал (ПКВ).

В ПКВ на основе двоичного счетчика может использоваться суммирующий или вычитающий счетчики, имеющие входы предварительной записи кода. Функциональная схема ПКВ на основе суммирующего двоичного счетчика приведена на рис. 2.17а.

В состав преобразователя входит двоичный счетчик, RS -триггер, логический элемент И и формирователь выходного импульса.

Перед началом преобразования в счетчик записывается дополнительный код N_0 преобразуемого числа N . $N_0 = 2^n - N$, где n – число разрядов входного кода. Преобразование начинается с поступлением импульса начала интервала U_n (рис. 2.17б), который устанавливает RS -триггер в единичное состояние. При этом через логический элемент И на вход счетчика поступает импульсы эталонной частоты с периодом следования $T_э$, которые, как правило, синхронизированы с импульсами U_n . С поступлением N импульсов эталонной частоты происходит переполнение счетчика ($N_d + N = 2^n$). По сигналу переполнения с выхода переноса или старшего разряда счетчика формируется импульс конца временного интервала U_k (рис. 2.17 б). Он задержан относительно импульса U_n на N периодов импульсов эталонной частоты. Следовательно, временной интервал $T_n = T_э N$ пропорционален входному коду. Коэффициент пропорциональности (цена младшего разряда) равен периоду следования эталонных импульсов $T_э$.

Работа ПКВ на основе вычитающего счетчика отличается тем, что в счетчик предварительно записывается прямой код числа N . Момент окончания временного интервала фиксируется при обнулении счетчика.

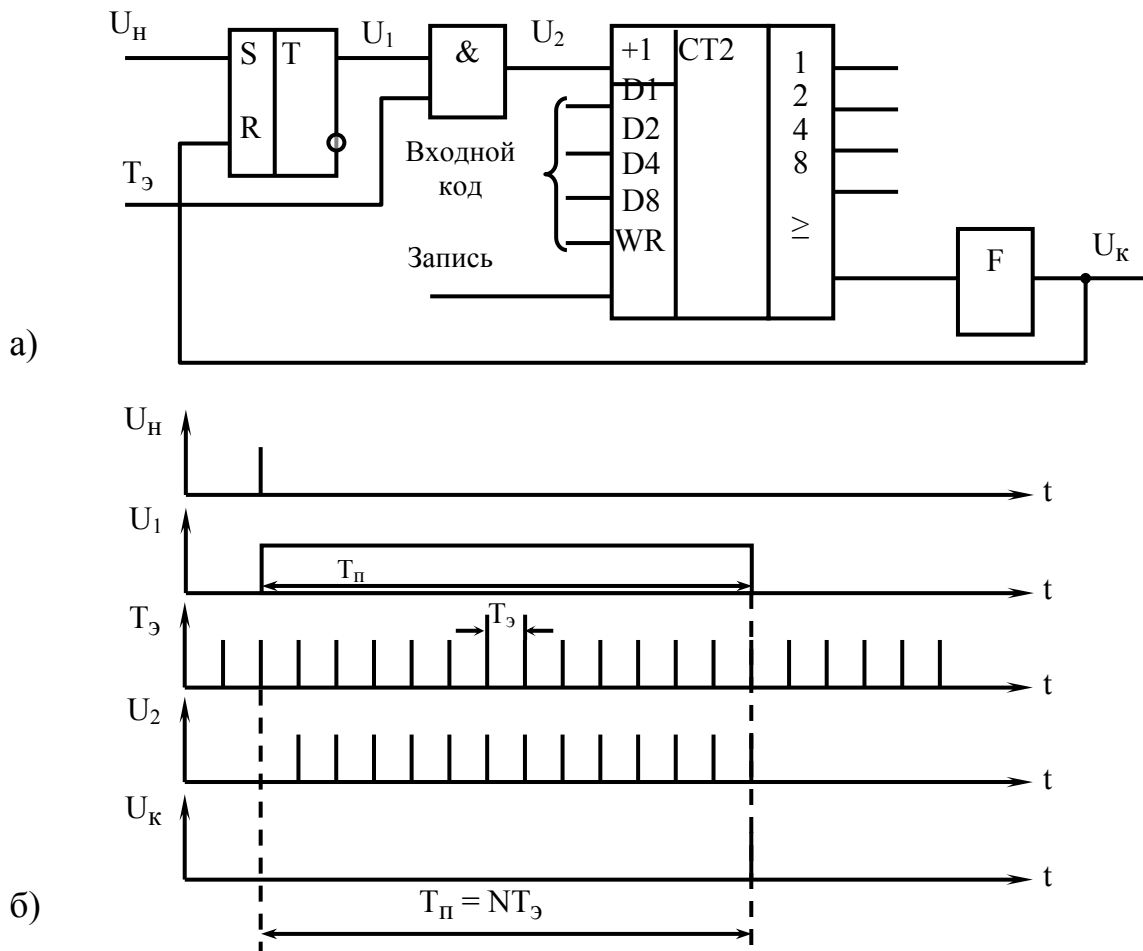


Рис. 2.17. Схема, поясняющая принцип работы ЦАП на основе суммирующего счетчика

Функциональная схема ЦАП основе счетчика и цифрового компаратора показана на рис. 2.18. В ее состав входит: RS-триггер, логический элемент И, двоичный счетчик, цифровой компаратор и регистр.

Перед началом преобразования счетчик устанавливается в нулевое состояние, а в регистр записывается входной код. По импульсу начала временного интервала U_H RS-триггер устанавливается в единичное состояние при этом открывается логический элемент И, и импульсы эталонной частоты поступают на счетчик. Код с выхода счетчика подается на цифровой компаратор, где сравнивается со входным кодом. При их равенстве цифровой компаратор вырабатывает сигнал равнозначности, из которого формируется импульс конца временного интервала. Этим же импульсом RS-триггер устанавливается в нулевое состояние, и счет

импульсов эталонной частоты прекращается. Временной интервал между импульсами U_H и U_K , $T_n = NT_э$.

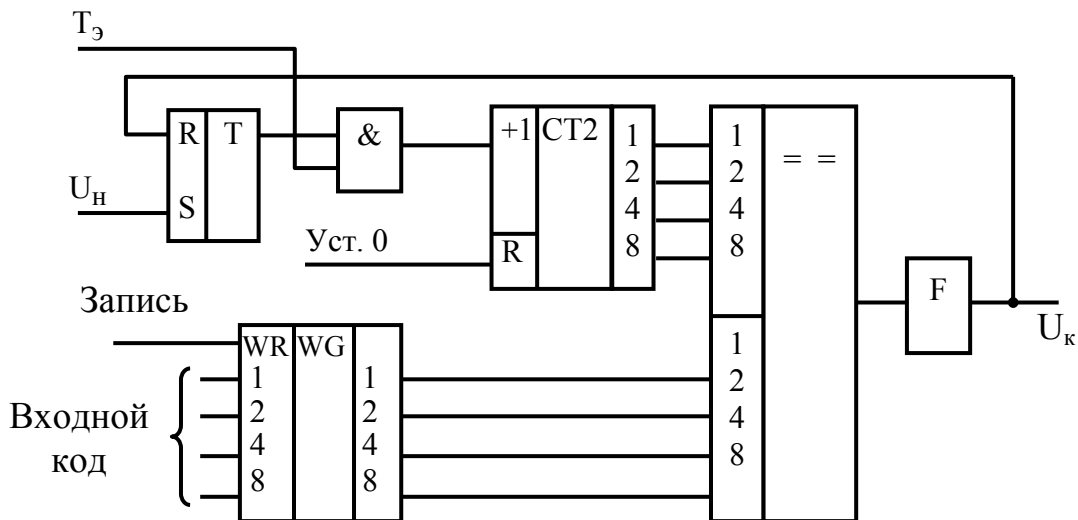


Рис. 2.18. Схема, поясняющая принцип работы ЦАП на основе счетчика и цифрового компаратора

Существует еще один способ преобразования имеющихся двоичных данных в аналоговые напряжения. Он получил распространение в микроконтроллерах, поскольку там он не требует больших затрат. Сущность такого способа заключается в изменении пропорционально цифровому значению коэффициента заполнения (величины равной отношению длительности импульсов к длительности промежутков между ними и обратной скважности) периодической последовательности прямоугольных импульсов напряжения, следующих с постоянной частотой $f_{ШИМ} = 1/T_{ШИМ}$. Если у такого широтно – импульсно модулированного сигнала с помощью фильтра нижних частот удалить гармонические составляющие переменного напряжения и выделить постоянное напряжение (постоянную составляющую сигнала), то усредненное значение будет пропорционально коэффициенту заполнения, а, следовательно, и цифровому значению кода. Такой способ в литературе называют цифро аналоговым преобразованием с использованием широтно – импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ сигнал очень легко реализовать с помощью микроконтроллера, поэтому данный способ представляет простую и экономичную альтернативу другим ЦАП.

Широтно – импульсный модулятор, как отмечалось ранее, реализуют с помощью генератора пилообразного напряжения и компаратора. До тех пор пока уровень управляющего сигнала, подаваемого на один вход компаратора, больше уровня пилообразного сигнала на другом входе, компаратор формирует на своем выходе напряжение положительной полярности (логическую единицу). Если уровень управляющего сигнала меньше «пилы», то выходе формируется логический ноль. Таким же образом, но в понятиях цифровой электроники, организовано формирование ШИМ – сигнала с помощью таймера – счетчика T/C1 микроконтроллера. Счетчик T/C1 выполняет подсчет поступающих на его вход импульсов циклически, т. е. от нуля до максимального значения, а затем вновь возвращается к нулю. Число импульсов все время заносится в регистр TCNTn. Это эквивалентно формированию в цифровом виде пилообразного сигнала (рис. 2.19).

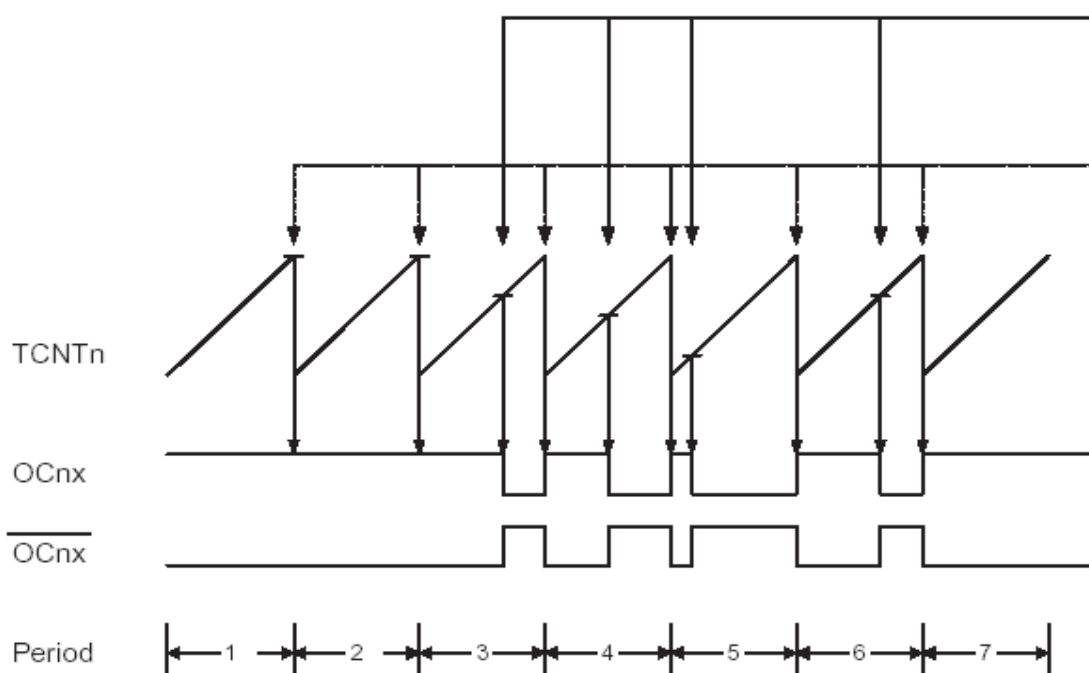


Рис. 2.19. Временные диаграммы, поясняющие принцип формирования ШИМ – напряжения при помощи микроконтроллера

Для сопоставления цифровых сигналов используется регистр сравнения RCOM. Значение задаваемого двоичного слова в него заносится программно. На рис. 2.19 эта двоичная величина условно показана в виде небольшой горизонтальной черточкой. Когда состояние счетчика,

храняемое в регистре TCN, совпадает с содержимым регистра RCOM на выводе микроконтроллера ОСпх устанавливается нулевой потенциал. Счетчик при этом продолжает выполнять подсчет до достижения максимального значения, после чего «сбрасывается» в нуль. Меняя заданное значение цифрового кода в регистре сравнения RCOM можно формировать импульсы различной ширины, как показано на рис. 2.19. Максимальное значение счетчика также задается программно. На выходе контроллера обычно формируется ШИМ и инвертируемый (противоположной полярности) ШИМ сигнал. Для формирования аналогового выходного напряжения используется, в простейшем случае, простой RC – фильтр нижних частот который подключается к выводу одного из портов микроконтроллера. Он, однако, недостаточно хорошо фильтрует амплитуды составляющих переменного напряжения, содержащихся в ШИМ сигнале, и удается достичь незначительной точности цифро – аналогового преобразования. Кроме того, недостатком простых RC – фильтров является зависимость их фильтрующих способностей от величины нагрузки. По названным причинам вместо простого RC – фильтра используют более сложные фильтры на операционных усилителях, например фильтр Баттерворта четвертого порядка. Точность такого ЦАП существенно увеличивается.

2.2.2. Аналогово – цифровые преобразователи (АЦП)

Многие физические параметры, такие как температура, давление, перемещение, напряжение, напряженность электрического поля и пр. являются аналоговыми величинами. Поэтому, как правило, информация о состоянии объекта управления поступает с датчиков в аналоговом виде. Обработка поступившей информации, ее анализ, формирование управляющего воздействия осуществляется в цифровом виде. Внедрение цифровой обработки органически связано с развитием технологии и производством широкой номенклатуры цифровых интегральных схем. Поэтому в электронике для сопряжения широко используются АЦП, которые преобразуют аналоговые сигналы в цифровой код.

В простейшем случае АЦП преобразует напряжение в двоичное слово. Если опять обратиться к табл. 2.1, то по аналогии формально можно сказать, что в АЦП при подаче на вход 0,4 В на выходе мы получим двоичное число 0010

В общем случае функцию, которую выполняет АЦП, можно определить как замена аналоговой непрерывной величины $x(t)$ цифровым, кодированным сигналом $N(i\Delta t)$, пропорциональным её мгновенным значениям в определенные моменты времени t_i , разделенные интервалом дискретизации Δt . Соответственно, процесс аналого-цифрового преобразования включает в себя дискретизацию по времени, квантование по уровню и кодирование результата. В соответствии с этим обобщенная структурная схема АЦП может быть представлена в виде, показанном на рис. 2.20.

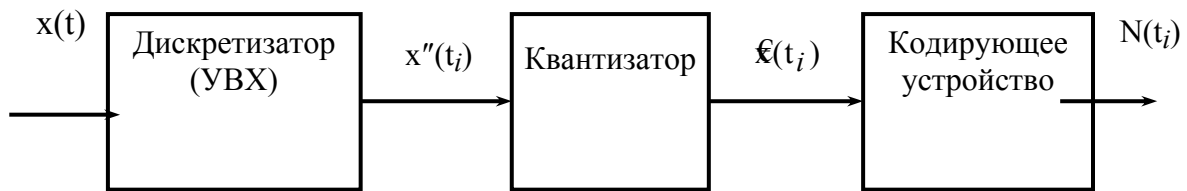


Рис. 2.20. Обобщенная структурная схема АЦП

В результате дискретизации непрерывная во времени аналоговая величина $x(t)$ преобразуется в выборки её дискретных значений $x'(t_i)$ в моменты дискретизации t_i . Временной интервал Δt между соседними выборками называется шагом дискретизации. Он может быть постоянным и переменным. Постоянный шаг Δt называется периодом дискретизации. Исходная аналоговая величина $x(t)$ и соответствующая ей дискретизированная величина $x'(t_i)$ показаны на рис. 2.20 а и б. Операцию дискретизации аналоговой величины можно выполнить с помощью аналогового ключа, который кратковременно замыкается в моменты дискретизации t_i .

АЦП является кодирующим преобразователем, на вход которого поступает аналоговый сигнал x_{ex} , а с выхода снимается цифровой двоичный код, представленный N символами, связанный с входным сигналом соотношением:

$$N = \frac{x_{ex}}{\Delta x}, \quad (2.15)$$

где Δx – шаг квантования преобразователя.

Среди АЦП наибольшее распространение получили преобразователи, у которых входным аналоговым сигналом является напряжение, а выходным цифровым сигналом – двоичный код. Такие преобразователи называют преобразователями напряжения в код (ПНК). В соответствии обобщенной схемой АЦП (рис. 2.21) в ПНК выполняется дискретизация и квантование входного напряжения и кодирование результата преобразования.

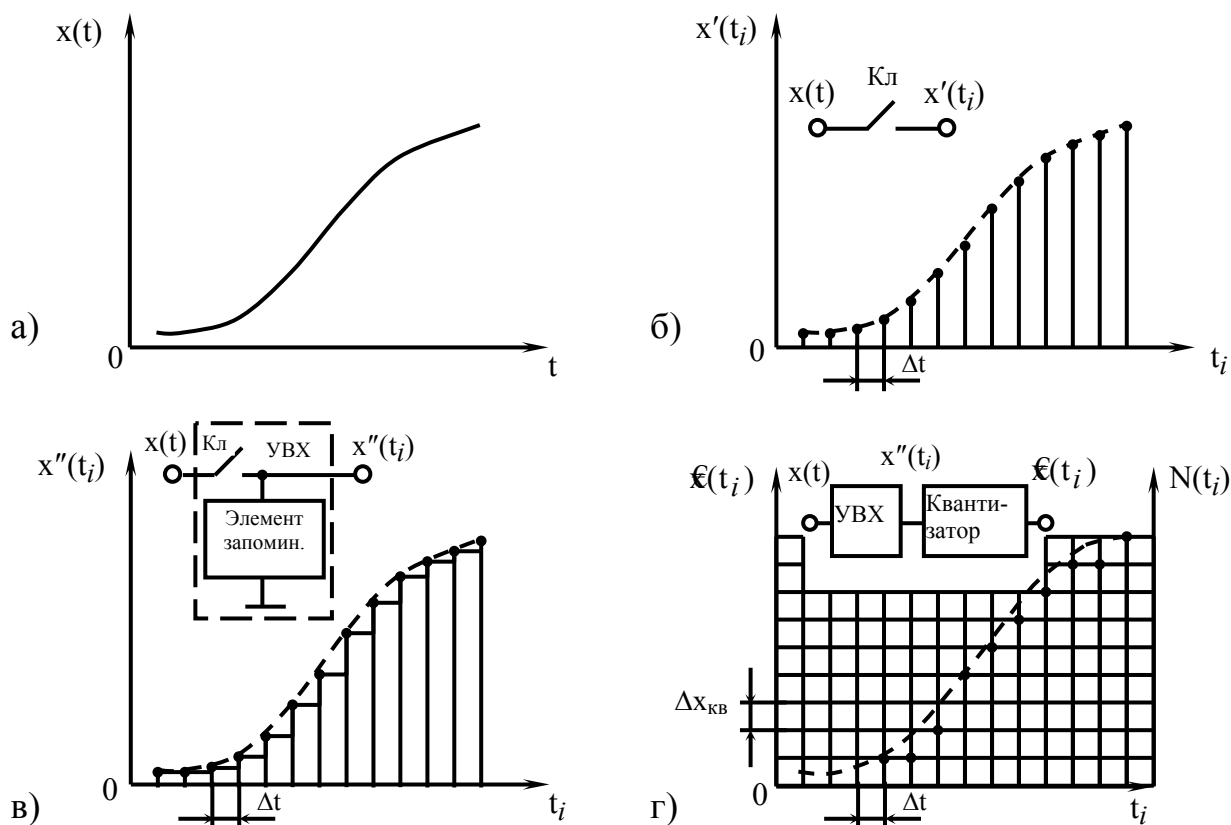


Рис. 2.21. Формы сигнала на входе и выходе основных узлов АЦП

При этом входному напряжению $U_{вх}$ ставится в соответствие цифровой двоичный код:

$$N = \frac{U_{вх}}{\Delta U_{кв}}, \quad (2.16)$$

где величина $\Delta U_{кв} = \frac{U_{вх.макс}}{2^n}$ является шагом квантования (квантом) n – разрядного преобразователя.

Статическая характеристика квантования ПНК $N = f(U_{вх})$ показана рис. 2.22. На ней диапазон мгновенных значений сигнала разделен на интервалы, называемые интервалами квантования. Каждому интервалу квантования поставлен в соответствие уровень квантования.

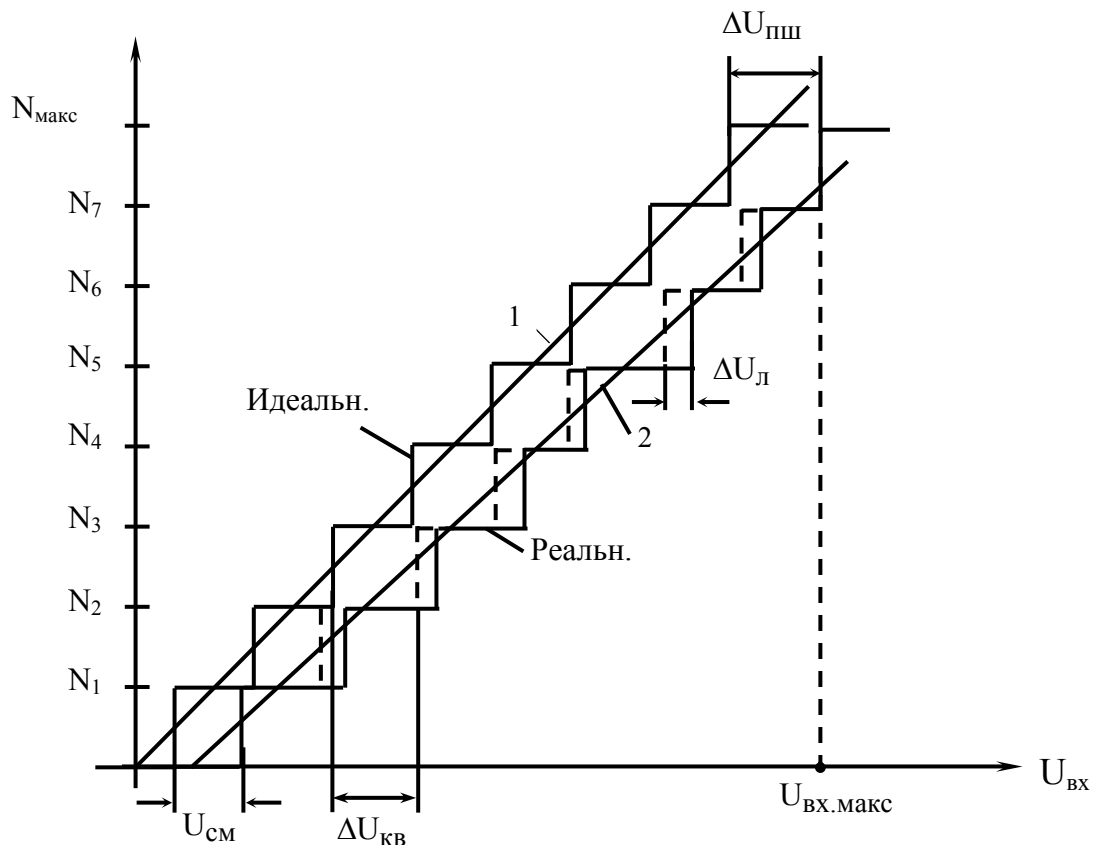


Рис. 2.22. Статические характеристики квантования идеального и реального ПНК

Основными параметрами ПНК являются: разрешающая способность, точность и быстродействие.

Разрешающая способность ПНК определяется числом разрядов выходного кода (максимальным числом кодовых комбинаций на выходе АЦП). Абсолютное значение разрешающей способности ПНК равно шагу квантования, который жестко связан с диапазоном изменения входного напряжения и числом разрядов n выходного кода:

$$\Delta U_{кв} = \frac{U_{вх.макс} - U_{вх.мин}}{2^n}, \quad (2.17)$$

где $U_{вх.макс}$ и $U_{вх.мин}$ – максимальное и минимальное значение входного напряжения.

Например, если требуется преобразовать аналоговый сигнал, изменяющийся в диапазоне $U_{вх.мин} = -1В, U_{вх.макс} - U_{вх.мин} = 1В$ с помощью 10 битовых слов ($2^n = 2^{10} = 1024$), то диапазон напряжений 2 В необходимо разделить на 1024 участка. Если все участки выбрать одинаковыми, то при переходе от одного участка к другому напряжение изменится на $\Delta U_{кв} = 0,001935 В$

Шаг квантования $\Delta U_{кв}$ характеризует потенциальную разрешающую способность преобразователя по уровню, т.е. наименьшее различимое приращение входной величины. Шаг квантования также определяет *методическую погрешность* аналого-цифрового преобразователя, возникающую в результате замены непрерывной аналоговой величины квантованными значениями (ближайшими уровнями квантования).

Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы $\Delta U_{пш}$ – отклонение значения входного напряжения от номинального (расчетного) при максимальном выходном коде $N_{макс}$ (рис. 2.1). Абсолютная погрешность полной шкалы в справочных данных приводится в единицах шага квантования:

$$\delta_{пш} = \frac{\Delta U_{пш}}{\Delta U_{кв}} . \quad (2.18)$$

Быстродействие ПНК характеризуется динамическими параметрами: временем преобразования $t_{пр}$ и максимальной частотой преобразования F_M .

Время преобразования $t_{пр}$ – интервал времени от момента заданного изменения сигнала на входе до появления на выходе соответствующего устойчивого кода. Выбор времени преобразования связан со скоростью изменения входного сигнала. Если потребовать, чтобы за время $t_{пр}$ входное напряжение изменялось не более, чем на шаг квантования $\Delta U_{кв}$, то:

$$t_{пр} \leq \frac{\Delta U_{кв}}{U'_{вх}}, \quad (2.19)$$

где $U'_{вх}$ – максимальная скорость изменения входного напряжения.

Если это требование не выполняется, то на входе ПНК необходимо включить устройство выборки и хранения, которое запоминает выборки входного напряжения в моменты дискретизации на время преобразования.

Максимальная частота преобразования F_M наибольшая частота дискретизации, при которой параметры ПНК соответствуют заданным значениям. Максимальная частота преобразования выбирается в зависимости от ширины спектра входного напряжения и требуемых качественных показателей системы, в состав которой входит ПНК.

Наряду с рассмотренными характеристиками и параметрами существуют параметры, определяющие внешние условия работы преобразователя, такие как: параметры выходного кода; динамический диапазон входного напряжения; параметры источников эталонного и питающего напряжений; предельные эксплуатационные параметры и другие.

По принципу преобразования ПНК подразделяются на преобразователи прямого действия и с промежуточным преобразованием. В ПНК прямого действия входное напряжение преобразуется непосредственно в цифровой код. В ПНК с промежуточным преобразованием напряжение преобразуется сначала в другую аналоговую величину (временной интервал, частоту и др.), которая затем преобразуется в двоичный код.

Основным признаком классификации ПНК является алгоритм его функционирования в процессе преобразования. Алгоритм отражает комплекс операций, посредством которых устанавливается численное соответствие между входной аналоговой величиной и выходным цифровым кодом.

С точки зрения понимания процесса преобразования, в первую очередь, представляет интерес схема параллельного АЦП. Упрощенная схема параллельного ПНК приведена на рис. 2.23.

Одновременное квантование входного сигнала осуществляется с помощью набора $2^n - 1$ компараторов напряжения, включенных параллельно источнику входного сигнала. Пороговые уровни компараторов

устанавливаются с помощью резистивного делителя состоящего из одинаковых сопротивлений в соответствии с используемой шкалой квантования. Индивидуальное опорное напряжение для каждого компаратора формируется резистивным делителем из эталонного напряжения $U_{э} = U_{вх.макс}$. Минимальное опорное напряжение имеет значение $U_{э} / 2^n$, максимальное – $U_{э} / 2^n \cdot (2^n - 1)$. Разность между опорными напряжениями двух ближайших компараторов равна шагу квантования $U_{кв} = \frac{U_{э}}{2^n}$. Вторые входы компараторов объединены, и на них подается входной сигнал $U_{вх}$.

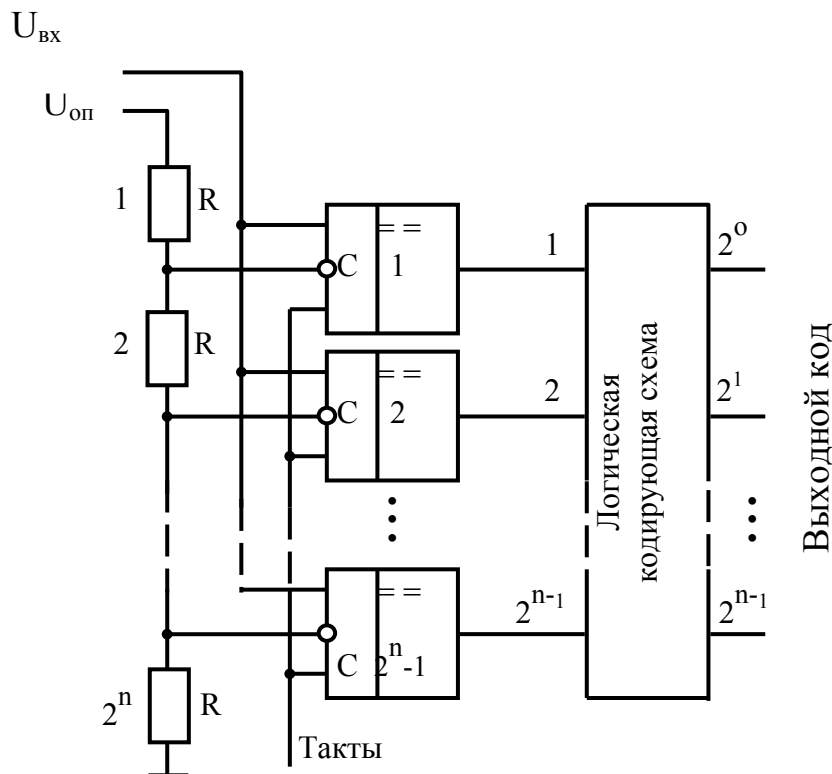


Рис. 2.23. Упрощенная схема параллельного АЦП

Входное напряжение $U_{вх}$ одновременно, с помощью $2^n - 1$ компараторов, сравнивается с набором опорных напряжений (эталонов). На выходах компараторов устанавливаются логические уровни, соответствующие соотношению сигналов на их входах в момент прихода фронта тактового (стробирующего) импульса. Состояние выходов компараторов

представляет собой $(2^n - 1)$ -разрядное слово унитарного кода. В результате на выходах получается квантованный сигнал. После окончания тактового импульса результат сравнения мгновенного значения $U_{вх}$ с набором эталонов хранится на выходах компараторов до прихода следующего тактового импульса. Для преобразования этого кода в двоичный n -разрядный используются логические кодирующие схемы. Поскольку каждая из $2^n - 1$ градаций входного сигнала оцифровывается отдельным компаратором, то время преобразования в таком ПНК определяется лишь временем переключения компаратора и логической кодирующей схемы и, следовательно, оно минимально возможное. Параллельные преобразователи являются в настоящее время самыми быстрыми. Длительность тактового импульса может составлять единицы наносекунд. Частота дискретизации у них может составлять 100 МГц. Однако высокое быстродействие параллельных ПНК достигается за счет значительных аппаратных затрат. Их объем практически удваивается с каждым новым разрядом. Обычно число разрядов параллельных преобразователей не превышает 8...10.

Параллельные ПНК выпускаются в интегральном исполнении. На рис. 2.24 приведена принципиальная схема преобразователя К1107ПВ4, построенного по параллельной схеме.

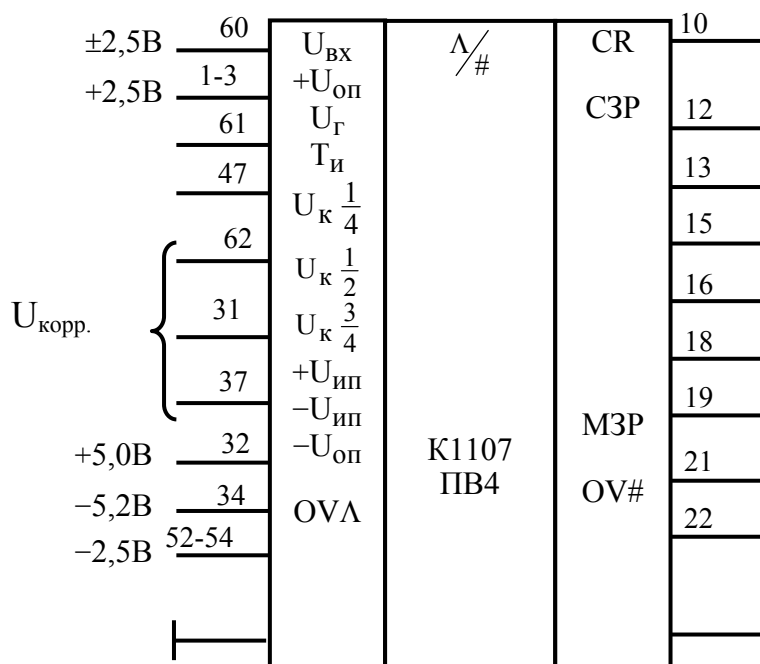


Рис. 2.24. Схема параллельного АЦП в интегральном исполнении

В ИС К1107ПВ4 предусмотрена возможность корректировки нелинейности характеристики квантования, для чего на выводы 37, 62 и 31 подаются уровни напряжения, соответственно, $1/4$, $1/2$ и $3/4 U_{оп}$. Компенсация напряжения смещения $U_{см}$ и погрешностей в конечных точках шкалы производится изменением опорных напряжений в пределах $\pm 0,1В$. Вывод 5 микросхемы служит для управления гистерезисом компараторов. Подача на этот вывод напряжения регулируемого от 0 до 2В позволяет управлять гистерезисом компараторов, что рекомендуется проводить для повышения стабильности работы ПНК на высокой тактовой частоте.

Среди АЦП широкое распространение получили времяимпульсные преобразователи (ВИП), в основу которых положен метод преобразования входного напряжения во временной интервал. Под временными интервалами понимают отрезки времени, задаваемые положением импульсов начала U_H и конца U_K , длительностью импульсов, периодом гармонических колебаний и другими способами.

Схема простейшего ВИП и временные диаграммы, поясняющие принцип преобразования, приведены на рис. 2.25. В нем временной интервал T_X преобразуется в код путем подсчета числа эталонных периодов $T_э$ счетных импульсов, укладывающихся в интервал T_X .

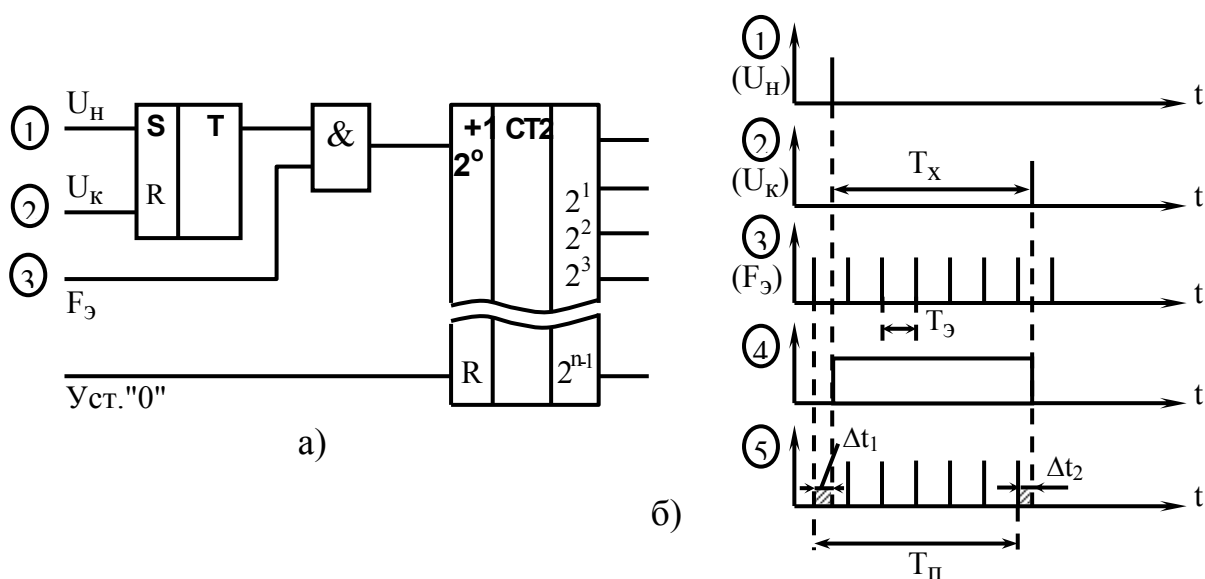


Рис. 2.25. Схема АЦП времяимпульсного преобразования и временные диаграммы, поясняющие принцип его действия

В состав преобразователя входят: *RS*-триггер; логический элемент И; двоичный счетчик импульсов. Входные импульсы U_H и U_K подаются на соответствующие входы *RS*-триггера, который вырабатывает импульс длительностью T_X . Этот импульс поступает на один из входов логического элемента И и разрешает прохождение импульсов с периодом $T_э$ на суммирующий вход счетчика. Число N импульсов, подсчитанное счетчиком за время T_X , соответствует временному интервалу T_n (рис. 2.25), который связан с $T_э$ равенством $T_n = NT_э$.

Преобразуемый интервал T_X отличается от интервала T_n и определяется соотношением:

$$T_x = NT_э - \Delta t_1 + \Delta t_2, \quad (2.20)$$

где Δt_1 и Δt_2 – погрешность, обусловленная отсутствием синхронизации импульсов U_H и U_K с эталонными импульсами.

Величины Δt_1 и Δt_2 – характеризуют погрешность квантования (методическую погрешность) одноканального ПВК:

$$\Delta t_{кв} = \Delta t_1 - \Delta t_2. \quad (2.21)$$

Инструментальная погрешность ПВК последовательного счета обусловлена только нестабильностью периода следования импульсов эталонной частоты $T_э$.

При использовании генераторов с кварцевой стабилизацией (относительная нестабильность $10^{-6} \dots 10^{-8}$) инструментальную погрешность в большинстве случаев можно не учитывать.

Рассмотренные ПВК последовательного счета применимы только для преобразования больших временных интервалов $T_x \gg T_э$. Для преобразования малых временных интервалов, меньших или соизмеримых с $T_э$, они непригодны.

Для преобразования малого временного интервала используется изменение масштаба времени, при котором исходный временной интервал как бы умножается на заданный коэффициент преобразования масштаба времени K_n . Значение K_n выбирается таким, чтобы получен-

ный временной интервал $T'_x = K_n \cdot T_x$ можно было преобразовать в цифровой код одноканальным ПВК с необходимой точностью.

Распространение среди АЦП получили преобразователи последовательного приближения, в которых эталонные напряжения получают с помощью ЦАП включенного в цепь обратной связи.

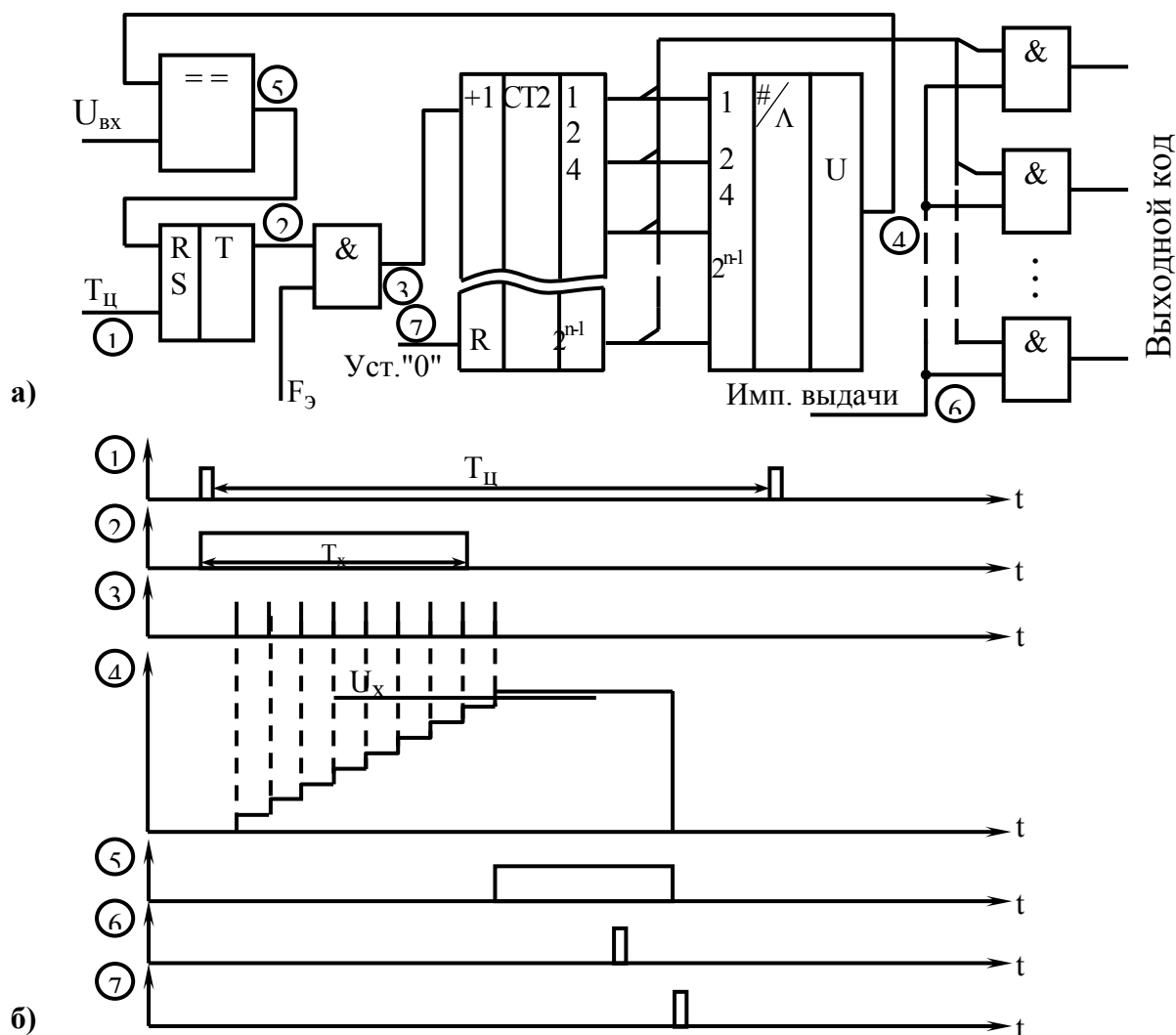


Рис. 2.26. Схема АЦП последовательного приближения со ступенчатым развертывающим напряжением

Функциональная схема одного из вариантов ПНК и временные диаграммы, поясняющие принцип работы приведены на рис. 2.26. Импульс запуска $T_{ц}$, определяющий начало цикла преобразования, устанавливает RS-триггер в единичное состояние. Уровень логической единицы с выхода триггера разрешает прохождение через логический элемент И

импульсов эталонной частоты на вход счетчика. Последовательно увеличивающийся код с выхода счетчика с помощью ЦАП преобразуется в ступенчатое напряжение, изменяющееся по линейному закону. Величина ступени равна шагу квантования $\Delta U_{кв}$. При превышении выходным напряжением ПКН входного напряжения $U_{вх}$ компаратор срабатывает, устанавливает RS-триггер в нулевое состояние и блокирует прохождение эталонных импульсов на вход счетчика. Число импульсов N , записанных в счетчик, будет равно количеству квантов $\Delta U_{кв}$, необходимых для уравнивания входного напряжения:

$$N = \frac{U_{вх}}{\Delta U_{кв}} \quad (2.22)$$

Перед началом очередного цикла преобразования осуществляется выдача кода потребителю и установка счетчика в нулевое состояние.

Достоинством ПНК последовательного счета является сравнительная простота и высокая точность, основным недостатком – низкое быстродействие.

ПНК последовательного счета со ступенчатым разворачивающим напряжением легко преобразуется в *ПНК следящего типа*. Для этого необходимо заменить суммирующий счетчик на реверсивный и использовать прямой и инверсный выходы компаратора для управления режимом счета. Функциональная схема следящего ПНК приведена на рис. 2.27.

На входы компаратора подается входное напряжение $U_{вх}$ и напряжение с выхода ПКН $U_{пкн}$. В зависимости от знака разности между $U_{вх}$ и $U_{пкн}$ импульсы эталонной частоты поступают на суммирующий или вычитающий вход счетчика. Если $U_{вх} > U_{пкн}$ содержимое счетчика будет увеличиваться, а при $U_{вх} < U_{пкн}$ – уменьшаться. При достижении равенства входного напряжения и напряжения обратной связи с выхода ПКН, в следящей системе устанавливается динамическое равновесие и выходной код ПНК будет колебаться вокруг соответствующего входному напряжений среднего значения с точностью до единицы младшего разряда (рис. 2.27). Если в этом состоянии входное напряжение начнет из-

меняться, то выходной код преобразователя будет отслеживать его с погрешностью, не превышающей единицы младшего разряда.

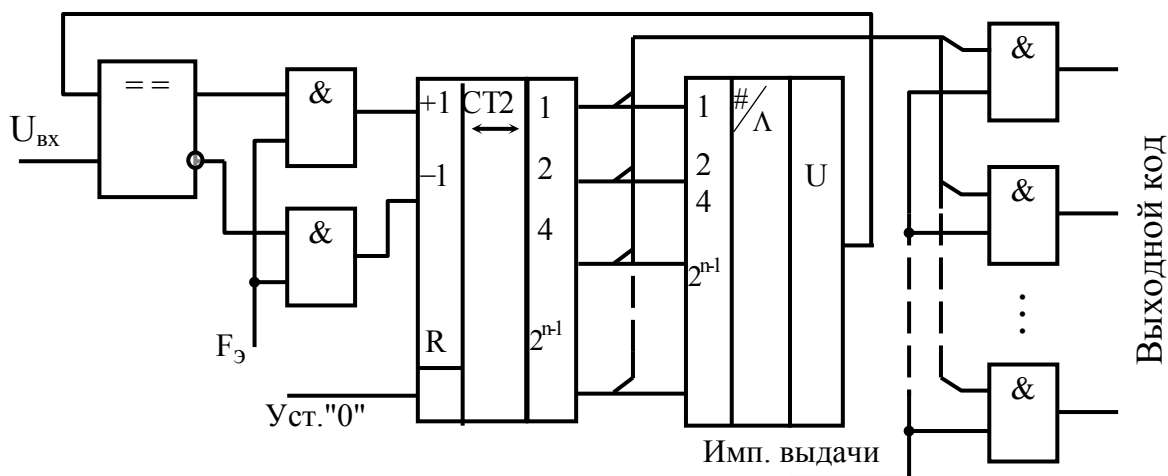


Рис. 2.27. Схема АЦП последовательного приближения следящего типа

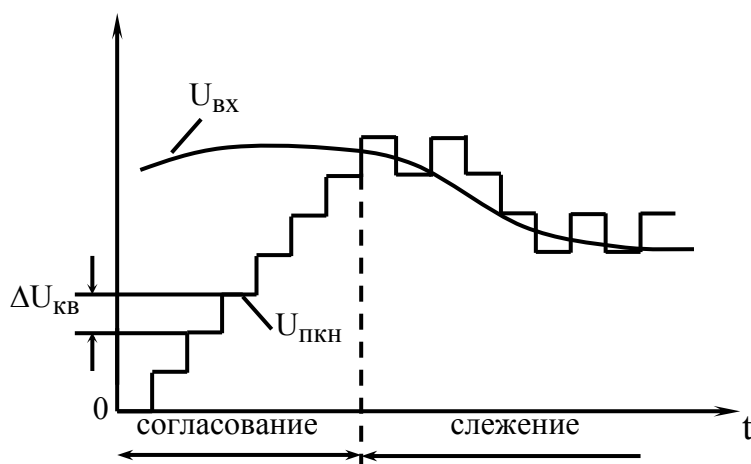


Рис. 2.28. Временные диаграммы работы АЦП последовательного приближения следящего типа

Указанное значение погрешности обеспечивается в том случае, если между скоростью изменения входного напряжения $U'_{вх}$ и шагом квантования выполняется соотношение:

$$U'_{вх} \cdot T_{э} \leq \Delta U_{кв}, \quad (2.23)$$

где $T_{э}$ – период следования эталонных импульсов.

Для осуществления точного аналого-цифрового преобразования изменяющихся сигналов часто возникает необходимость запоминания и хранения на период дискретизации значений выборок сигнала. Ключ с элементом запоминания называют устройством выборки и хранения (УВХ). Такое устройство позволяет фиксировать значения выборок изменяющегося аналогового сигнала на время его преобразования.

Устройства выборки и хранения аналоговых сигналов осуществляют фиксацию мгновенных значений сигналов, соответствующих моментам дискретизации, на время, необходимое для их обработки.

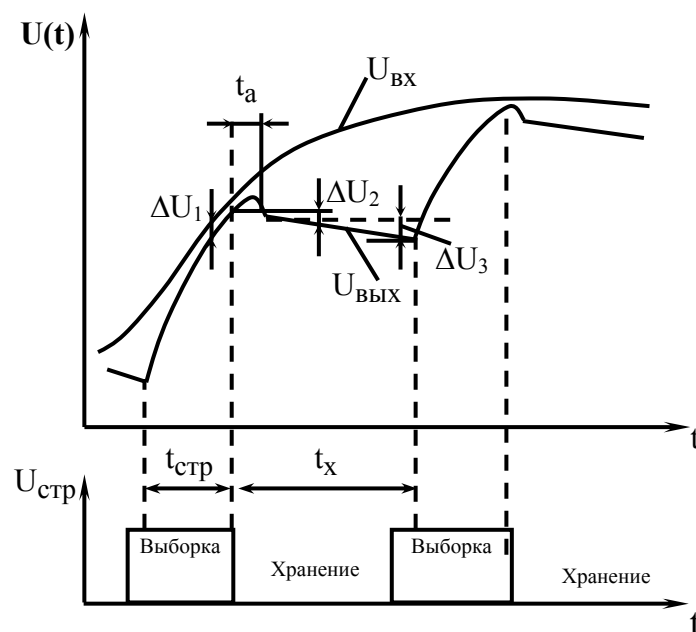


Рис. 2.29. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы и основные параметры устройства выборки - хранения

Такие устройства позволяют осуществить точную временную привязку выходного кода АЦП к реальному моменту снятия отсчета. Во время $t_{\text{ст}}$ действия стробирующего импульса производится выборка мгновенного значения входного напряжения (в виде напряжения на конденсаторе) и отнесение его к моменту окончания импульса. На интервале между стробирующими импульсами ($t_{\text{х}}$) осуществляется хранение значения выборки (рис. 2.29).

Наиболее точными и компактными устройствами кратковременного хранения аналоговых сигналов являются схемы, основанные на принципе хранения заряда на накопительном конденсаторе (рис. 2.30). На этом

принципе построено большинство УВХ в дискретном и интегральном исполнении.

Когда ключ К, управляемый напряжением стробирования $U_{СТ}$, замкнут (режим выборки), конденсатор С экспоненциально с постоянной времени τ_3 заряжается (или разряжается), до значения $U_{ex}(t)$. Значение постоянной времени цепи заряда накопительного конденсатора $\tau_3 = C (R_{вых} + R_{пр})$, где $R_{вых}$ – выходное сопротивление источника сигнала, а $R_{пр}$ – сопротивление замкнутого ключа, выбирается таким, чтобы за время действия стробирующего импульса напряжение на конденсаторе установилось с заданной точностью.

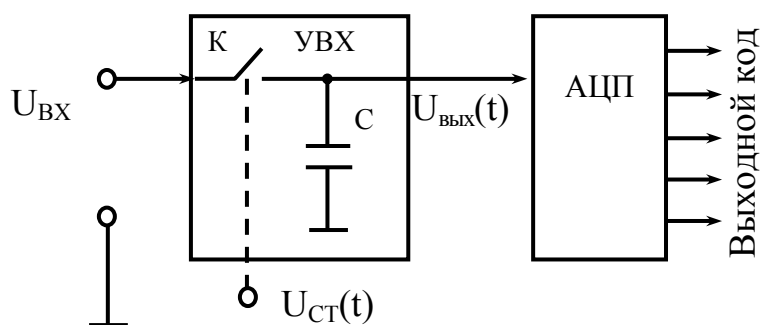


Рис. 2.30. Упрощенная схема устройства выборки – хранения

Как правило, $\tau_3 = t_c$. Это достигается соответствующим подбором емкости конденсатора и включением на входе УВХ буферного усилителя с малым выходным сопротивлением, например, повторителя напряжения на ОУ.

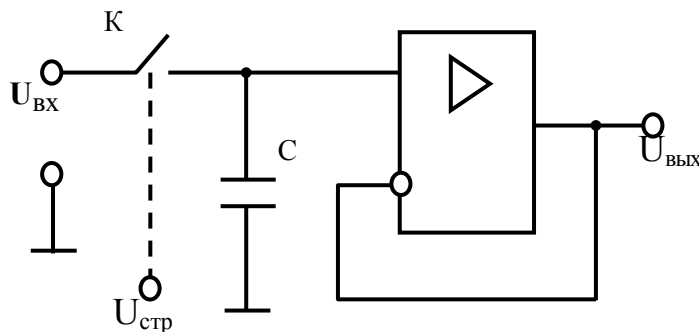


Рис. 2.31. Схема устройства выборки – хранения с повторителем напряжения на операционном усилителе

При размыкании ключа (режим хранения) заряд на конденсаторе медленно изменяется из-за наличия тока утечки ключа и тока нагрузки. Для уменьшения влияния тока нагрузки на спад напряжения на конденсаторе в режиме хранения, сигнал на нагрузку передается через буферный усилитель, имеющий высокое входное и низкое выходное сопротивление. В качестве буферного усилителя можно также использовать повторитель напряжения на операционном усилителе (рис. 2.31).

Во многих современных микроконтроллерах (МК) реализованы интегрированные в полупроводниковую микросхему (встроенные) АЦП. Они предназначены для ввода в МК аналоговых сигналов с датчиков физических величин и преобразования этих сигналов в двоичный код с целью последующей программной обработки цифровой информации. Если рассматривать их с общих позиций, то они характеризуются следующим:

А. Имеют до 8 входных каналов, что позволяет посредством многоканального аналогового коммутатора (мультиплексора) подключать ко входу АЦП один из 8 источников входных аналоговых сигналов. Выбранный источника сигнала задается программно.

Б. В кристалл АЦП интегрирована схема выборки – хранения, обеспечивающая постоянство выходного напряжения во время цикла преобразования.

В. АЦП может работать как в режиме одиночных преобразований так и циклически.

Г. Обычно АЦП имеют в своем составе встроенный источник опорного напряжения. Однако, при желании, можно использовать внешнее опорное напряжение. АЦП может также иметь систему калибровки, повышающую точность его работы.

Д. Результат аналогово – цифрового преобразования входного напряжения в АЦП представляется в виде десятиразрядного двоичного числа в регистре данных.

Фрагмент структурной схемы типового АЦП микроконтроллера показан на рис. 2.32. Многоканальный аналоговый коммутатор (INPUT MUX) служит для подключения одного из источников аналоговых сигналов (подключенных к физическим контактам ADCn). Выбор источника осуществляется посредством записи номера канала в соответствующие разряды специального регистра управления.

АЦП работает по принципу последовательного приближения. Напряжение соответствующего датчика, выбранное аналоговым мультимплексором, попадает на устройство выборки – хранения (изображено символом в виде трапеции справа внизу рис. 2.32). На него подаются стробирующие импульсы и напряжение на выходе УВХ $U_{ИЗМ}$ остается неизменным всю продолжительность преобразования. Начало преобразования задает сигнал «ПУСК». Схема управления (CONVERSION LOGIC) АЦП по этому сигналу записывает в свой внутренний регистр число $10\ 0000\ 0000_B$, которое подается на внутренний ЦАП (10 bit DAC). ЦАП преобразует его в аналоговое напряжение U_{DAC} , при этом на выходе 10 bit DAC формируется напряжение, равное половине опорного. Компаратор (COMPARATOR) сравнивает значение напряжения с выхода 10 bit DAC U_{DAC} , с аналоговым напряжением полученным с УВХ $U_{ИЗМ}$. Если $U_{DAC} < U_{ИЗМ}$, то схема управления формирует следующий код, в котором сохраняется старший разряд, а в предпоследний разряд записывается единица $11\ 0000\ 0000_B$. Тем самым U_{DAC} увеличивается и «приближается» к искомому значению. В противном случае, когда $U_{DAC} > U_{ИЗМ}$, схема управления формирует код, в котором старший разряд сбрасывается в логический нуль, а в предпоследний разряд записывается единица $01\ 0000\ 0000_B$. U_{DAC} уменьшается и «приближается» к искомому значению. Аналогичные действия выполняются в последующих тактах преобразования. Процедура приближения повторяется для оставшихся разрядов десятичного двоичного числа U_{DAC} . В результате область вокруг определяемого числа сужается и, в конце концов, за 10 шагов такого «взвешивания» ЦАП будет содержать значение аналоговой величины $U_{ИЗМ}$ в двоичном 10 битовом представлении. Соответственно, точно такое же число будет во внутреннем регистре схемы управления (CONVERSION LOGIC) АЦП. В конце цикла преобразования это число переписывается в регистр данных АЦП (на схеме не показан).

АЦП может работать в режиме одиночных преобразований, при котором каждое новое преобразование выполняется отдельно, или в циклическом режиме. В первом случае, начало преобразования необходимо инициировать пользователем, в последнем - АЦП работает непрерывно, при этом каждый новый цикл начинается автоматически сразу же после записи измеренного значения в регистр данных

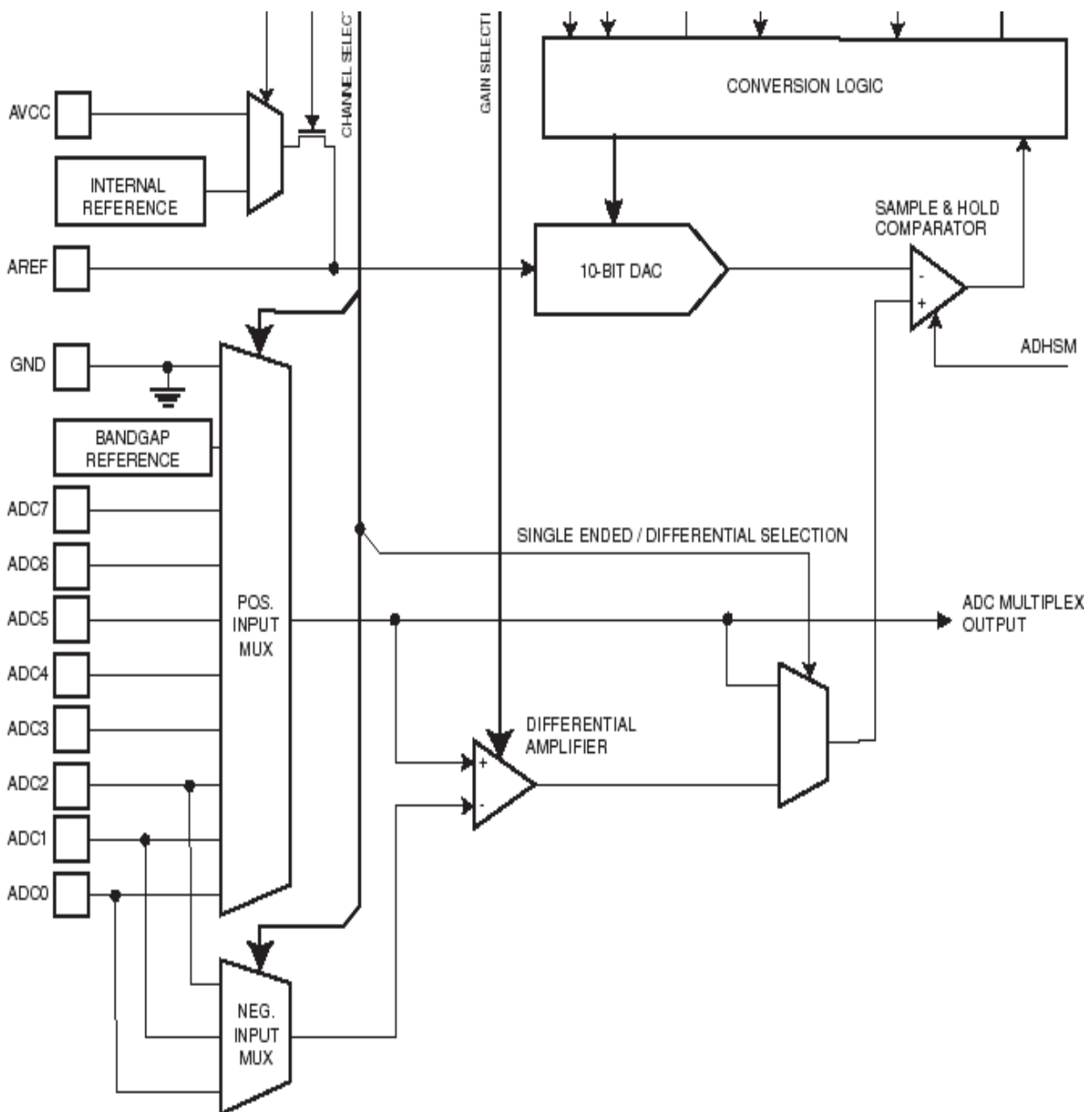


Рис. 2.32. Фрагмент структурной схемы типового АЦП микроконтроллера

Пример использования встроенного в микроконтроллер АЦП показан на рис. 2.33. Входной аналоговый сигнал подается на один из контактов AIN1 порта PB1, который сконфигурирован на ввод информации.

Схема, показанная на рис. 2.34 демонстрирует использование микроконтроллера в качестве времяимпульсного преобразователя.

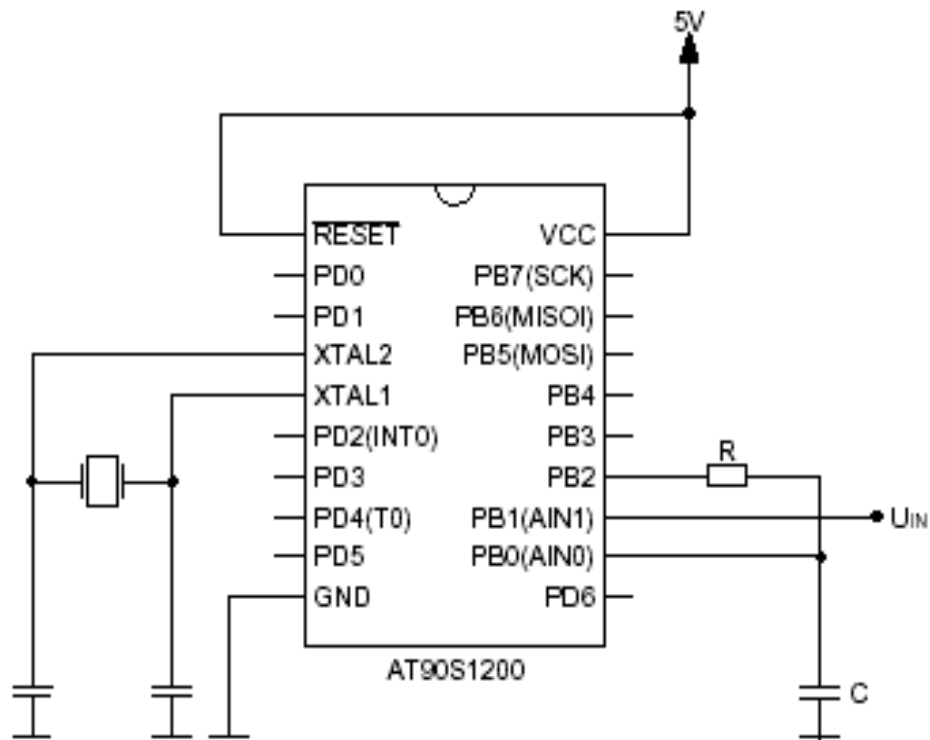


Рис. 2.33 Схема использования встроенного АЦП микроконтроллера

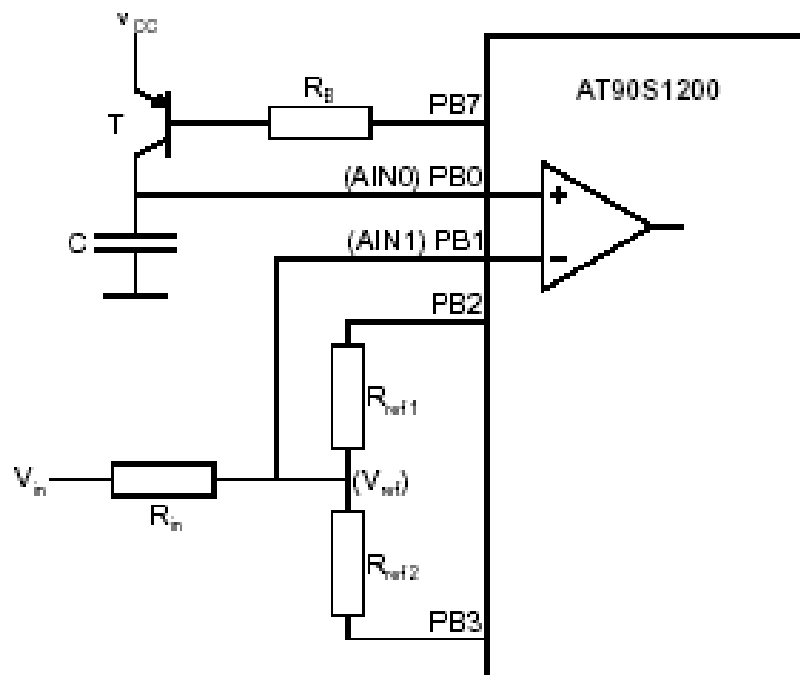


Рис. 2.34 Схема использования микроконтроллера основу работы аналогово – цифрового преобразователя положен метод преобразования входного напряжения во временной интервал.

При этом основу работы АЦП положен метод преобразования входного напряжения во временной интервал. Конденсатор заряжается постоянным током от источника тока на транзисторе. По этой причине напряжение на входе AIN0 порта PB0 линейно нарастает. Контакт AIN1 порта PB1 сконфигурирован на ввод аналогового сигнала. С помощью компаратора величина входного сигнала преобразуется во временной интервал. Величина интервала определяется с помощью таймера/счетчика. В микроконтроллерах с помощью таймера/счетчика можно также реализовать АЦП, функционирующие по методу двойного интегрирования. Этот способ имеет много достоинств. В частности, он пригоден для создания АЦП обеспечивающих очень высокое подавление помех на некоторых частотах (связанных с силовой питающей сетью). При этом следует иметь в виду, что скорость преобразования у них мала.

Следует иметь в виду, что АЦП интегрирования имеют и ряд других недостатков.

Во-первых, нелинейность переходной статической характеристики операционного усилителя, на котором выполняют интегратор, заметным образом сказывается на интегральной нелинейности характеристики преобразования АЦП высокого разрешения. Для уменьшения влияния этого фактора АЦП изготавливают многотактными. Например, 13-разрядный AD7550 выполняет преобразование в четыре такта.

Другим недостатком этих АЦП является то обстоятельство, что интегрирование входного сигнала занимает в цикле преобразования только приблизительно третью часть. Две трети цикла преобразователь не принимает входной сигнал. Это ухудшает помехоподавляющие свойства интегрирующего АЦП.

В-третьих, АЦП многотактного интегрирования должен быть снабжен довольно большим количеством внешних резисторов и конденсаторов с высококачественным диэлектриком, что значительно увеличивает место, занимаемое преобразователем на плате и, как следствие, усиливает влияние помех.

Эти недостатки во многом устранены в конструкции так называемых сигма-дельта ($\Sigma\Delta$) АЦП. Они в своей работе используют то, что между выборками сигнала имеет место корреляция (взаимосвязь) и, на этом основании, можно прогнозировать следующий отсчет сигнала по предыдущему значению. При этом формируется сигнал, представляю-

щий собой предсказание значения следующей выборки, а разность между значениями выборок является ошибкой предсказания. В SD АЦП преобразователь переводит в цифровую форму разность между двумя выборками аналогового сигнала. Использование кодирования разностей сигналов требует меньше разрядов, так как диапазон их изменений меньше диапазона самих значений выборок. Своим названием эти преобразователи обязаны наличием в них двух блоков: сумматора (обозначение операции - У) и интегратора (обозначение операции - Д). Принцип, заложенный в такого рода преобразователях (усреднение результатов измерения на большом интервале времени), позволяет уменьшить погрешность, вносимую шумами, а, следовательно, увеличить разрешающую способность. Основные узлы АЦП - это сигма-дельта модулятор и цифровой фильтр. Схема n-разрядного сигма-дельта модулятора первого порядка приведена на рис. 2.35. Работа этой схемы основана на вычитании из входного сигнала $U_{вх}(t)$ величины сигнала на выходе ЦАП, полученной на предыдущем такте работы схемы. Полученная разность интегрируется, а затем преобразуется в код параллельным АЦП невысокой разрядности. Последовательность кодов поступает на цифровой фильтр нижних частот.

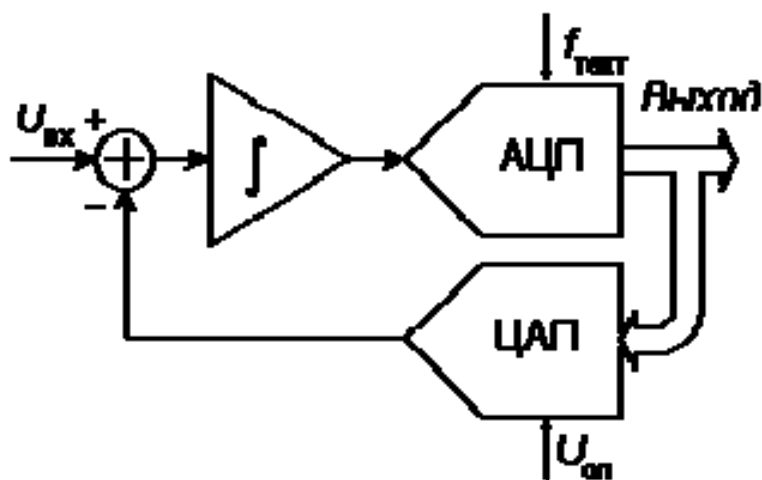


Рис. 2.35. Структурная схема, поясняющая устройство сигма – дельта модулятора

В отличие от АЦП других видов, в которых отсчеты преобразуемого аналогового сигнала берутся в точках его дискретизации и являются мгновенными значениями в этих точках, в SD АЦП отсчеты берутся на интервалах дискретизации и являются средними значениями преобра-

зубевого сигнала на этих интервалах. Выходной сигнал SD-модулятора – синхронизированная последовательность нулевых и единичных (со значениями "0" и "1") импульсных посылок, общая частота следования которых равна тактовой частоте $f_{\text{ТАКТ}}$. С этой точки зрения сигма-дельта модулятор представляет собой преобразователь "напряжение-частота" с непрерывным интегрированием и уравниванием заряда, синхронизируемый в тактовыми импульсами с частотой $f_{\text{ТАКТ}}$. Высокая точность SD АЦП объясняется, прежде всего, высокой разрядностью и линейностью преобразования без применения многоуровневых пороговых устройств, а также эффективной фильтрацией преобразуемого сигнала.

Наиболее широко в составе ИМС используются однобитные сигма-дельта модуляторы, в которых в качестве АЦП используется компаратор, а в качестве ЦАП – аналоговый коммутатор (рис. 2.36).

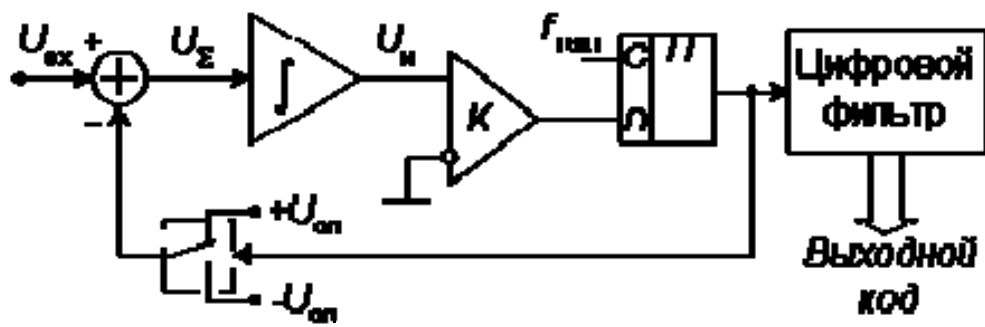


Рис. 2.36. Структурная схема, поясняющая устройство однобитного сигма – дельта модулятора

Операцию нахождения разности между выборками выполняет устройство суммирования, которое служит для определения разностного сигнала ошибки между входным сигналом опорным напряжением, формируемым в зависимости от состояния триггера.

Положительное значение ошибки приводит к формированию на выходе компаратора К логической единицы, а отрицательное - к формированию нуля. По тактовому сигналу логический сигнал с выхода компаратора фиксируется в триггере и задает положение ключа, подсоединяющего источники опорного напряжения. В зависимости от знака ошибки интегратор увеличивает или уменьшает напряжение, подаваемое на вход компаратора. К примеру. Пусть в момент времени $t=0$ на выходе компаратора формируется сигнал логической единицы. С приходом так-

тового импульса она записывается в триггер. Ключ подключает источник положительной полярности и на выходе сумматора устанавливается положительное напряжение. Под действием этого напряжения на выходе интегратора будет расти компенсирующее напряжение, которое за период одного такта достигнет величины, называемой шагом квантования. Необходимо параметры интегратора выбрать таким образом, чтобы прирост напряжения «догонял» входное напряжение. Если прирост напряжения превысит входной сигнал, то на выходе компаратора появиться сигнал, который переключит триггер в нулевое состояние, изменится полярность источника и компенсирующее напряжение начнет уменьшаться. Тем самым сигма-дельта модулятор отслеживает изменения входного сигнала и на его выходе формируются импульсы, частота которых пропорциональна входному сигналу. Нетрудно догадаться, что если входной сигнал изменяется очень быстро, то компенсирующее напряжение не успевает отслеживать изменения входного напряжения наступает перегрузка кодера.

Сравнение сигма-дельта АЦП с АЦП многотактного интегрирования показывает значительные преимущества первых. Прежде всего, линейность характеристики преобразования сигма-дельта АЦП выше, чем у АЦП многотактного интегрирования равной стоимости. Это объясняется тем, что интегратор сигма-дельта АЦП работает в значительно более узком динамическом диапазоне, и нелинейность переходной характеристики усилителя, на котором построен интегратор, сказывается значительно меньше. Емкость конденсатора интегратора у сигма-дельта АЦП значительно меньше (десятки пикофарад), так что этот конденсатор может быть изготовлен прямо на кристалле ИМС. Как следствие, сигма-дельта АЦП практически не имеет внешних элементов, что существенно сокращает площадь, занимаемую им на плате, и снижает уровень шумов.

Для сравнения АЦП отметим следующее. 24-разрядный сигма-дельта АЦП AD7714 изготавливаемый в виде однокристалльной ИМС в 24-выводном корпусе, потребляет 3 мВт мощности и стоит примерно 14 долларов США, а 18-разрядный АЦП восьмитактного интегрирования HI-7159 потребляет 75 мВт и стоит около 30 долларов. К тому же сигма-дельта АЦП начинает давать правильный результат через 3-4 отсчета после скачкообразного изменения входного сигнала, что при величине первой частоты режекции, равной 50 Гц, и 20-разрядном разрешении

составляет 60-80 мс, а минимальное время преобразования АЦП HI-7159 для 18-разрядного разрешения и той же частоты режекции составляет 140 мс. В настоящее время ряд ведущих по аналого-цифровым ИМС фирм, полностью перешли в области АЦ-преобразования высокого разрешения на сигма-дельта АЦП. Сигма-дельта АЦП высокого разрешения имеют развитую цифровую часть, включающую микроконтроллер. Это позволяет реализовать режимы автоматической установки нуля и самокалибровки полной шкалы, хранить калибровочные коэффициенты и передавать их по запросу внешнего процессора. Ведущие мировые производители обеспечивают поставку на рынок самых разнообразных моделей АЦП, способных удовлетворить современным предъявляемым требованиям. Выпускаются АЦП предназначенные для преобразования быстроизменяющихся сигналов, имеющие низкий уровень искажений сигналов и время преобразования от 20 нс до 2 мкс.

Как уже отмечалось, звуковой сигнал на выходе электроакустических преобразователей, является нестационарным процессом, представляет собой сложное по спектральному составу колебание, для которого, в общем случае, не удастся получить устойчивых статистических характеристик. Он представляет собой чередование сигналов различной формы, расположенных в случайном порядке, и пауз. При усилении такого сигнала, преобразовании его, передаче по каналам связи к звуковоспроизводящим устройствам от электронных устройств требуются такие характеристики и электроакустические параметры, которые бы позволяли слушателю комфортно воспринимать звуковую информацию. Соответственно, для достижения такого качества необходимы электронные устройства, позволяющие не отличать воспроизводимый электронным устройством сигнал от «живого» голоса человека, музыкального инструмента, оркестра или синтезатора музыки. Они должны, по крайней мере, обеспечивать следующее: динамический диапазон не хуже 90 дБ; коэффициент гармонических и интермодуляционных искажений менее 0,05 %; неравномерность амплитудно-частотной характеристики не более 0,5 дБ в полосе частот от 20 Гц до 20 кГц.

Реализовать на практике такие требования оказалось возможным только при внедрении «цифрового звука», цифровых методов и цифровой техники.

Вполне естественно, что производители, связанные с обеспечением работы аудиоаппаратуры, высококачественных домашних театров,

DVD – плееров, мобильных аудиосистем, телефонов, средств телекоммуникаций, связи, модемов, интернет – телефонии, слуховых аппаратов, для обеспечения указанных потребностей наладили выпуск широкой гаммы относительно недорогих устройств, реализующих аналогово – цифровое и цифро – аналоговое преобразование звуковых сигналов.

Рассмотренные ранее, как бы «классические» ЦАП и АЦП, не всегда и не вполне подходят для работы со звуковыми сигналами. Это связано со следующим.

Мгновенное значение каждой точки выбираемого сигнала определяется двоичным числом в n - битовом представлении. Точность преобразования сигнала связана с количеством уровней квантования. Чем больше количество уровней $N = 2^n$, тем меньше шаг квантования, больше точность передаваемого сигнала и тем ближе квантованное изображение к оригиналу. При этом количество разрядов двоичного кода n , требуемого для преобразователя, в первом приближении, зависит от величины динамического диапазона D сигнала:

$$n \geq \frac{D - 1.8}{6}. \quad (2.24)$$

Для достижения динамического диапазона звукового сигнала свыше 90 дБ в случае равномерного квантования количество разрядов преобразователя должно быть 16...18.

При наивысшей частоте звукового сигнала 22 кГц частота дискретизации (частота отсчета мгновенных значений непрерывного аналогового сигнала, выборки) составляет 44,1 кГц. Это соответствует временному интервалу около 22 мкс или, другими словами, каждые два отсчета отстоят друг от друга на 22 мкс. При этом скорость передачи данных (поток информации) составит $44,1 \times 10^3 \times 2 \times 16 = 1,41$ Мбит/с.

Такая высокая скорость передачи данных (последовательности бит в канале) не всегда приемлема в системах передачи и обработки информации. Если, к примеру, такой поток информации записывать на ленту магнитофона, то время звучания обычной компакт кассеты составит примерно 1,5 минуты. Понятно, что при работе со звуковыми сигналами необходимо предпринимать меры, чтобы максимально уменьшить скорость передачи бит в канале.

Так как уменьшение частоты дискретизации связано с существенным ухудшением качества преобразования сигнала, то единственный путь уменьшения скорости передачи бит в канале – сокращение числа бит в выборке.

Применительно к звуковым сигналам характерна ситуация, когда широко используются паузы и сигналы малой амплитуды. Музыкальный сигнал, к примеру, содержит помимо пауз в тактовом размере и генеральных пауз, перерывы в звучании музыкального произведения, звуки малой амплитуды, являющиеся важными для получения требуемого звучания. Из рис. 2.22 следует, что при очень малых сигналах, амплитуда которых близка или меньше шага квантования, относительная величина искажений квантования увеличивается. Отсутствие слабых сигналов на выходе АЦП может привести у слушателя, прослушивающего высококачественное музыкальное произведение (пиано – пианиссимо симфонического оркестра), к неприятным субъективным ощущениям.

Квантование с постоянным шагом по уровню или как еще говорят линейное квантование, не является экономичным способом преобразования сигнала, так как шаг квантования одинаков и для больших и малых уровней сигналов. При кодировании источника аналогового сигнала число бит на выборку можно уменьшить, приняв характеристику квантования нелинейной. Такую нелинейную характеристику можно получить на передающей стороне с помощью четырехполюсника - компрессора, установленного перед АЦП. На приемной стороне осуществляют обратную операцию экспандирование. Шаг квантования для больших уровней сигнала выбирается относительно большим и уменьшается с уменьшением уровня. При этом для обеспечения заданного динамического диапазона требуется меньшее число уровней квантования и соответственно, меньшее число разрядов. Неравномерное квантование обычно осуществляется путем разбиения динамического диапазона на сегменты, в каждом из которых производится равномерное квантование. Преобразования такого рода называют сегментным компандированием.

Достоинство компандирования состоит в уменьшении разрядности АЦП (число разрядов на отсчет равно 12) и, как следствие, в уменьшении цифрового потока. К его недостаткам относятся динамические искажения сигнала, сходные с интермодуляционными искажениями, заметными для человеческого слуха.

В линиях связи скорость цифрового потока часто понижают путем использования мгновенного компандирования, позволяющего при удовлетворительной передаче сигнала снизить число разрядов на отсчет до 12 и даже до 10.

Наибольшее распространение для кодирования звуковых сигналов получили так называемые сигма - дельта – кодеки, в которых используются так называемые дифференциальные методы квантования. Они представляют собой практически идентичные по аппаратной реализации устройства кодирования и декодирования, размещаемые на передающей и приемной стороне цифровой системы связи. В кодере источника аналоговый сигнал преобразуется в цифровую форму и на его выходе формируется последовательность цифровых символов. На приемной стороне цифровой сигнал поступает на вход декодера. Декодер переводит принятое цифровое представление сигнала в аналоговую форму.

Было установлено, что при временной дискретизации звукового сигнала с частотой, в два раза превышающей наивысшую частоту спектра сигнала, существует достаточно большая корреляция между соседними отсчетами (таблица 2.2). Корреляция возрастает с увеличением частоты дискретизации. Это позволяет предсказывать новые отсчеты по предшествующим отсчетам сигнала, и, сокращая избыточность, уменьшить скорость передачи цифрового сигнала.

Таблица 2.2

№	Род звукового сигнала	Коэффициент корреляции
1	Речь	0,972
2	Классическая музыка	0,99
3	Современная музыка	0,984
4	Симфоническая музыка	0,906

Идея предсказания заключается в том, что k - отсчет звукового сигнала может быть приблизительно предсказан суммированием с определенным весом некоторого числа предшествующих отсчетов звукового сигнала. Весовые коэффициенты являются медленно меняющимися, поэтому можно использовать не сами отсчеты, а их приращения. Для кодирования разностей значений выборок требуется меньше разрядов,

так как диапазон их изменений меньше диапазона самих значений выборок.

Специализированные модули АЦП, предназначенные для работы со звуковыми сигналами, часто называют «звуковыми картами» или «саундбластерами». Они обеспечивают возможность «оцифровки» входных аналоговых звуковых сигналов в 8 или 16 разрядном двоичном формате. Частота дискретизации входного сигнала обычно составляет 44 кГц.

2.3. Устройства хранения цифровой информации (внутренняя память)

В современной электронике устройства хранения информации играют очень важную роль. Запоминающие устройства выделяют в ряд самостоятельных устройств.

Устройства хранения цифровой информации или, по другому, запоминающие устройства (ЗУ), как и регистры памяти, служат для хранения и воспроизведения (чтения) двоичной информации. Однако в отличие от регистров они призваны хранить весьма большой объем информации (миллионы бит в одной БИС). Естественно, при небольшом числе выводов микросхемы требуется особая организация доступа к ячейкам памяти. Это обстоятельство и выделило

Многообразие полупроводниковых ЗУ можно классифицировать по ряду признаков.

По способу хранения информации ЗУ бывают статическими и динамическими. Статические ЗУ основываются на ячейках памяти, которые при включенном питании могут находиться в одном из двух устойчивых состояний сколь угодно долго. Примером такой ячейки является триггер.

По функциональному назначению различают оперативные ЗУ (ОЗУ или RAM) и постоянные ЗУ (ПЗУ или ROM).

Оперативная память (устройства памяти, объединенные со схемами управления), допускает запись и хранение переменных двоичных величин, которые не должны сохраняться после отключения рабочего напряжения. Она реализована в виде статической памяти (SRAM), которая обеспечивает не только хранение и выдачу информации, но и быстрое (оперативное) обновление её. SRAM используются они для временного хранения программ, данных и результатов промежуточных вычислений.

Записанная в ОЗУ информация может храниться только при подключенном к нему источнике питания. При отключении питания информация теряется.

Постоянные ЗУ могут только считывать заранее записанную информацию. Запись информации у них осуществляется путем изменения физических свойств участков кристалла, занимаемого ячейкой памяти, или изменением проводимости электрических цепей. Поэтому отключение питания не сказывается на содержании записанной информации. Используются ПЗУ для хранения долговременной информации.

По способу доступа к ячейкам памяти все ЗУ делятся на адресные и ассоциативные. В адресных ЗУ обращение к ячейкам памяти производится по их физическим координатам, задаваемым внешним двоичным кодом – адресом. Адресные ЗУ бывают с произвольным доступом, которые допускают любой порядок следования адресов, и с последовательным доступом, где выборка ячеек памяти возможна только в порядке возрастания или убывания адресов. Последние функционально похожи на сдвигающие регистры.

В ассоциативных ЗУ поиск информации производится по признакам, заключенным в хранимой информации.

Запоминающие устройства характеризуются большим перечнем параметров. Основными из них являются информационная емкость, время выборки и время записи.

Информационная емкость – это максимальное число бит данных, которые могут храниться в ЗУ. Определяется числом ячеек памяти в микросхеме. Информационная емкость часто представляется в виде произведения: "число слов" \times "разрядность слов", например 64К4, 1024К1.

Время выборки – интервал времени между моментом подачи сигнала выборки и появлением информации на выходе ЗУ при условии, что все остальные необходимые сигналы поданы.

Время записи – минимальное время совпадения управляющих сигналов на входах микросхемы, обеспечивающее запись данных.

Обобщенная структурная схема ЗУ приведена на рис. 2.37. Главным узлом здесь является накопитель или матрица памяти. Он представляет собой набор ячеек памяти, которые объединены в группы. Каждая группа ячеек может хранить одно m -разрядное информационное слово и имеет свой адрес. В ОЗУ в качестве ячеек памяти используются

различного рода триггеры. Двоичная информация, записанная в такую ячейку, может сохраняться в этой ячейке до тех пор, пока не будет снято напряжение питания.

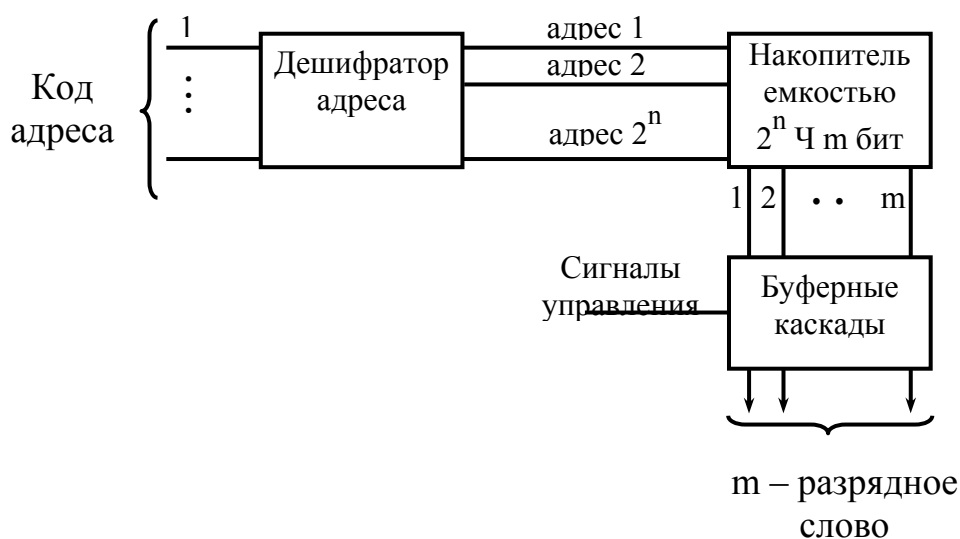


Рис. 2.37. Структурная схема, поясняющая устройство запоминающего устройства

Остальные узлы схемы – дешифратор адреса и буферные каскады играют вспомогательную роль, их иногда называют обрамлением памяти. Дешифратор преобразует код адреса в адресный сигнал обращения к одной из групп ячеек накопителя. Он позволяет уменьшить число внешних адресных выводов микросхемы. Буферные каскады, в зависимости от внешних сигналов управления, формируют выходные информационные сигналы, считанные с накопителя, а также могут переводить выходы ЗУ в высокоимпедансное состояние и совместно с дешифратором обеспечивать запись информации в накопитель.

Накопитель (матрица памяти), как и любая матрица, состоит из n строк. В состав каждой строки входит m запоминающих ячеек, которые, как целое, образуют m -разрядное слово. Информационная емкость накопителя при этом равна $N = n \times m$. Например, если $n = 16$, а $m = 8$, то $N = 128$ бит. При этом мы можем «обратиться» для осуществления записи и считывания информационных данных к каждой ячейке. Так как удобно оперировать байтами (8 бит), то удобно каждую строку считать как одно информационное двоичное слово. В этом случае набор ячеек

(строка) отведенных под одно слово, будет характеризоваться «адресом» являющимся номером строки.

Дешифраторы строк и столбцов позволяют выбирать необходимую строку накопителя и его соответствующий столбец (или сразу группу столбцов при оперировании байтами). При байтном представлении информации адресная шина, которая содержит 4 сигнальные адресные линии, позволит найти «адрес» одной из $2^4=16$ строк (линии адресной шины двоичных слов). При 16 сигнальных линиях адресной шины число возможных состояний адресной шины составит $2^{16}=65536 = 64$ килобайта. Упорядоченное множество кодов, посредством которых адресуются к двоичным словам накопителя, часто называют адресным пространством. Для наглядности это множество представляют в виде таблицы с n строками в каждой из которых содержится одно или двухбайтовое слово. Адреса имеют сквозную нумерацию. Фрагмент простейшего адресного пространства показан в виде таблицы 2.3.

Таблица 2.3

Фрагмент простейшего адресного пространства

Шестнадцатеричный адрес	Двоичное однобайтовое слово данных, находящееся по данному адресу								
00 _h									
01 _h									
02 _h									
FF _h									

При 16 линиях адреса удобно каждый адрес делить на два байта и каждый байт представлять в шестнадцатеричном представлении.

Старший двоичный разряд адреса делит адресное пространство на две равные части (верхнюю и нижнюю). Два старших разряда делит адресное пространство на 4 части. Часто такие участки называют банками данных, страницами памяти и пр. Отдельные сегменты памяти, как будет отмечено позже, устроены по - разному также физически (память программ реализована по флэш –технологии, внутренняя память для энергозависимых данных представляет память SRAM).

Каждому типу памяти в адресном пространстве отводится свой «участок» памяти (набор строк). В микроконтроллерах, к примеру, построенных по Гарвардской архитектуре, память программ и память данных разделены в адресном пространстве. Память программ 16 разрядная (двухбайтовая) и всегда находится на «кристалле». Память данных делится на внешнюю и внутреннюю, каждая из которых имеет свое пространство адресов. Пространство памяти SRAM можно увеличивать за счет подключения внешних блоков памяти. В микроконтроллерах для этой цели используются порты, которые применяются в качестве шин передачи данных и адресов.

Понятие адреса позволяет присваивать имена самым различным объектам- регистрам, портам, клавишам пульта управления и т. п. Обезличив физическую природу этих объектов, мы делаем их неотличимыми от ячеек памяти, для работы которых выделен класс адресных команд. Это дает возможность программного доступа к этим объектам. Их часто называют программно – доступными.

Пространство внутренней памяти объединяет все программно доступные ресурсы. В этой связи все регистры микроконтроллера имеют свой адрес в адресном пространстве. Например, 32 рабочим регистрам поставлены в соответствие адреса от 00_h до $1F_h$ в памяти SRAM.

При считывании байта данных из памяти SRAM микроконтроллера в рабочий регистр сначала через встроенную шину адреса вводится желаемый адрес SRAM. Количество адресных разрядов зависит от построения запоминающего устройства. После этого подается внутренний сигнал чтения. Затем содержимое ячеек памяти $D0...D7$, появившееся на внутренней шине данных, переносится (по фронту) в желаемый рабочий регистр. Если содержимое рабочего регистра должно быть записано в память SRAM, то сначала желаемый адрес подается на встроенную шину адреса, а содержимое рабочего регистра – на встроенную шину данных. Вслед за этим подается внутренний сигнал записи и по фронту сигнала байт с шины данных записывается в желаемую ячейку памяти.

На рис. 2.38 показано условное графическое обозначение одного из видов памяти, выполненной в виде микросхемы.

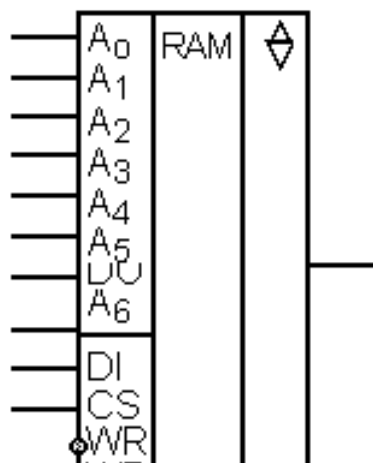


Рис. 2.38. Условное обозначение на схемах ОЗУ

Выбор режима хранения или режима запись – чтение обеспечивается сигналом CS' , который получил название сигнала выбора микросхемы. Один из уровней сигнала переводит ОЗУ в режим хранения (при этом сигналы на других входах могут быть любыми), а другой уровень – в режим запись – чтение. Уточнение операции (запись или чтение) выполняет сигнал WR' / WD' . Сигнал чтение WD' одновременно запрещает высокоимпедансное состояние для информационного выхода DO .

Помимо оперативных ЗУ используются энергонезависимые (постоянные) ЗУ. Постоянные ЗУ предназначены для хранения и выдачи информации, записанной в них заранее (до постановки в аппаратуру).

С точки зрения пользователей различают пять типов энергонезависимой памяти.

Масочные ПЗУ (mask ROM). В поле графического изображения такой памяти приводится обозначение ROM (read only memory – память только для чтения). Ячейки памяти mask ROM расположены в форме матрицы. Информация в mask ROM заносится при изготовлении ИС и определяется маской (фотошаблоном). Перепись информации потребителем невозможна. Такие ПЗУ самые дешевые и обеспечивают высокую надежность хранения информации.

Накопитель масочного ПЗУ представляет собой набор из 2^n строчных (входных) и m столбцовых (выходных) шин, в узлах которых могут находиться или отсутствовать приборы с односторонней проводимостью (диоды или транзисторы), обеспечивающие соответственно замыкание или размыкание узлов. На рис. 2.39 показана диодная масочная матрица-накопитель.

Здесь при возбуждении одной из адресных шин (на неё подается высокое напряжение с выхода дешифратора адреса) сигнал передается только в те выходные шины, которые связаны с данной адресной шиной диодами. Например, при обращении к накопителю по адресу 1 появится высокое напряжение на выходах, соответствующие первому (младшему), третьему и четвертому разрядам слова, т.е. код 01101.

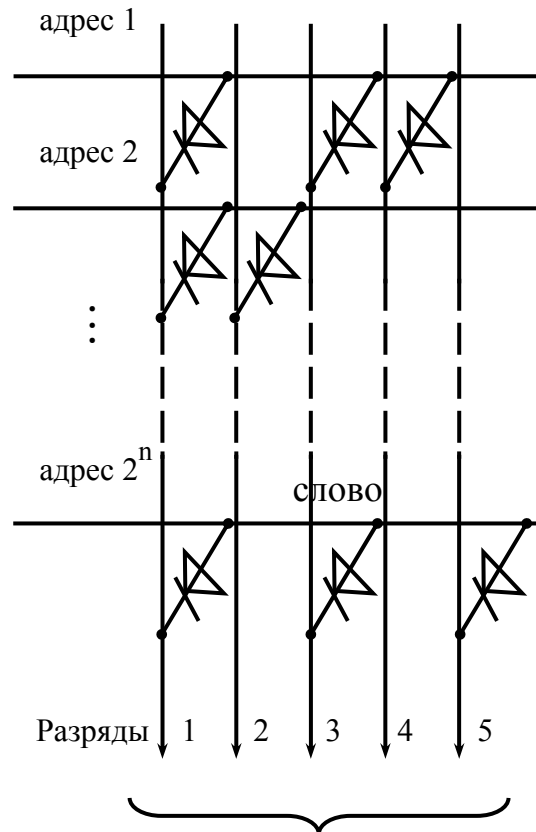


Рис. 2.39. Схема, поясняющая устройство масочного накопителя (ПЗУ)

Постоянные ЗУ однократно программируемые пользователем. Обозначаются OTPROM (*One –Time Programmable Read Only Memory*). Запись информации (программирование) выполняется потребителем один раз. Программируемый накопитель, в отличие от масочного, имеет во всех узлах диоды или транзисторы, которые соединяются к шинам через плавкие перемычки из материала с высоким удельным сопротивлением, например, нихрома (рис. 2.40). Запись информации осуществляется путем пережигания отдельных перемычек повышенным (десятки мА) током. Информационная емкость составляет единицы-десятки килобайт.

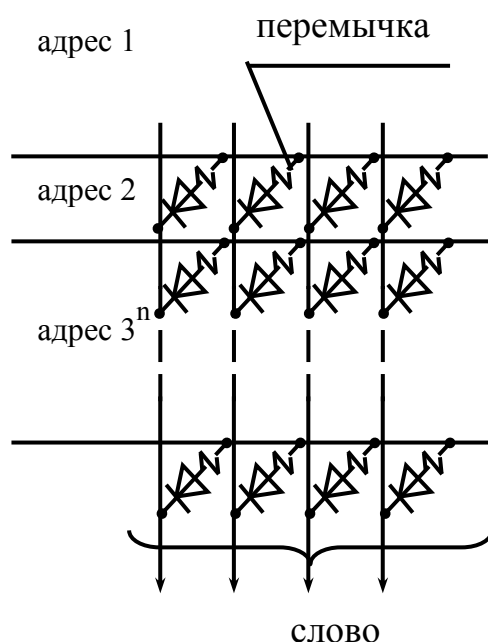


Рис. 2.40. **Схема, поясняющая устройство однократно - программируемого накопителя ПЗУ**

Постоянные ЗУ с возможностью многократного программирования (репрограммируемые ПЗУ) подразделяются на ПЗУ с электрическим способом записи и со стиранием с помощью ультрафиолетового облучения EPROM (Erasable Programmable ROM) и на ПЗУ с электрическим способом стирания и записи (EEPROM или E² PROM – Electrically Erasable Programmable ROM).

ПЗУ EPROM допускают многократное программирование пользователем. Технология программирования близка к технологии однократно программируемых ПЗУ. Перед каждым сеансом программирования для восстановления ячеек памяти весь модуль ПЗУ должен быть подвергнут стиранию при помощи ультрафиолетового облучения.

Электрически программируемые и электрически стираемые ПЗУ EEPROM допускают многократное программирование пользователем. Память такого типа используют для запоминания энергонезависимых данных и констант. Это очень удобно, к примеру, при калибровке измерительных приборов, работающих под управлением микроконтроллера. Максимальное число циклов стирания программирования порядка 10⁵. Технология программирования памяти EEPROM позволяет реализовать побайтовое стирание и побайтовое программирование, для чего к схеме должно быть приложено дополнительное напряжение.

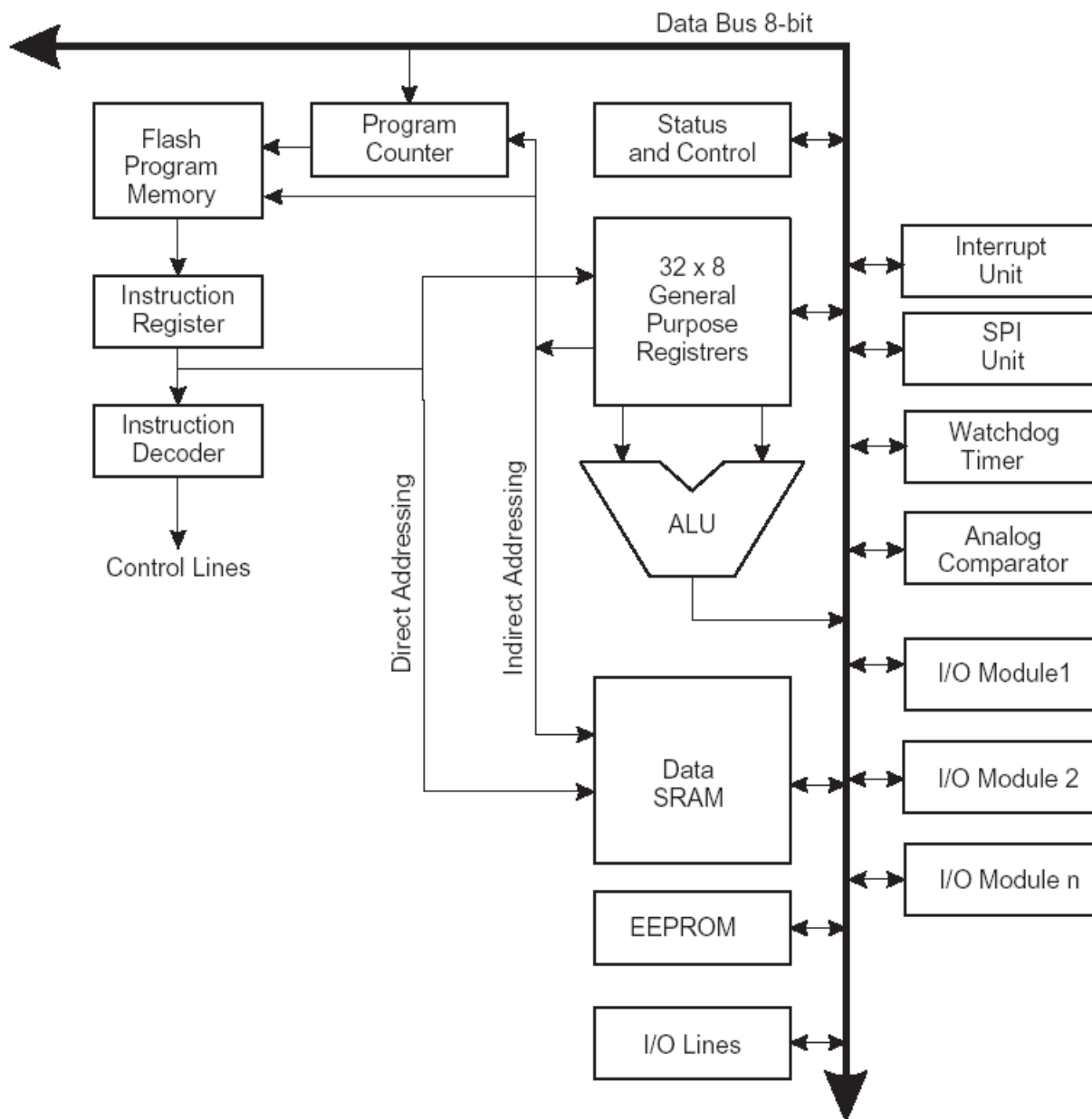


Рис. 2.41. Схема, поясняющая использование различных видов памяти в микроконтроллере

В микроконтроллерах в настоящее время для хранения памяти команд широко используют электрически программируемые и электрически стираемые ПЗУ типа FLASH. Описание работы одного элемента было приведено в предыдущем пособии. Запись информации в элемент накопителя заключается в избирательном сообщении заряда на затворы полевых транзисторов с «плавающим» затвором транзисторов. Гарантированное число циклов стирания /программирования порядка 10^5 . Га-

рантированный период хранения записанной информации примерно равен 10 годам.

Память FLASH стирается и программируется страницами адресного пространства или блоками. Страница, как правило, составляет 8, 16, 32 байта памяти. ПЗУ типа FLASH требует в процессе стирания/программирования приложения повышенного напряжения. Обычно такие ПЗУ содержат встроенные схемы повышающих преобразователей напряжения, которые называются генераторами накачки. Допускается включение и выключение генератора накачки программным путем. Пример использования различных видов памяти в составе микроконтроллера показано на рис. 2.41.

Контрольные вопросы

1. Что такое регистр и для чего он предназначен?
2. Какие операции над двоичными числами (словами) может выполнять регистр?
4. Какие устройства называют регистрами памяти?
5. Что такое синхронный регистр памяти?
7. Какие устройства называют регистрами сдвига и для чего они предназначены?
8. Для чего используют реверсивные регистры?
9. Что такое параллельный и последовательный порты ввода /вывода?
10. Какое устройство называют цифро – аналоговым преобразователем (ЦАП)?
11. Какие параметры вводятся для количественного описания суммарной инструментальной погрешности ЦАП?
12. Назовите наиболее существенными динамические параметры ПНК.
13. Поясните принцип работы ЦАП с суммированием токов.
14. Поясните принцип работы ЦАП на основе счетчика и цифрового компаратора.
15. Какой способ называют цифро аналоговым преобразованием с использованием широтно – импульсной модуляции?
16. Поясните обобщенную структурную схему АЦП.
17. Изобразите и поясните статические характеристики квантования идеального и реального ПНК.
18. Назовите и поясните основные параметры ПНК.

19. Приведите и поясните временные диаграммы работы АЦП последовательного приближения следящего типа.
20. Приведите и поясните упрощенную схему устройства выборки – хранения.
21. Поясните кратко преимущества и как функционируют сигма-дельта АЦП.
22. Поясните термин: сегментное компандирование.
23. Что такое статические ЗУ?
24. Что такое динамические ЗУ?
25. Приведите и поясните структурную схему, поясняющую устройство запоминающего устройства.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Вам уже известно, что для обеспечения функционирования электронных устройств необходимы источники электрической энергии. Привычнее всего, когда энергию, как говорят, для «питания», электронная аппаратура получает от промышленной сети переменного тока. Для «питания» ряда устройств используют также другие первичные источники, к примеру, аккумуляторы, которые преобразовывают неэлектрическую энергию в электрическую.

Довольно редко удается осуществить питание всех устройств непосредственно от источника первичной энергии. В большинстве случаев первичный источник или стандартная сеть по виду временной зависимости, разнообразен. Например, с энергетической точки зрения, он охватывает диапазон мощностей от долей ватта до сотен киловатт.

Современному специалисту, независимо от его узкой специализации, постоянно приходится иметь дело с вторичными источниками питания, с электрическими преобразователями, используемыми в различных изделиях.

Мы рассмотрим основные или, как говорят, классические звенья таких преобразователей. В частности, будут изучены такие устройства, как силовые трансформаторы, выпрямители, сглаживающие фильтры, которые применяются для преобразования энергии переменного электрического тока, потребляемой от первичной сети, в энергию с почти неизменным во времени законом изменения напряжения. Мы также будем говорить о стабилизаторах постоянного напряжения, которые необходимы для поддержания постоянства выходного напряжения источника питания.

Миниатюризация потребителей энергии, обострение проблемы энергосбережения, в частности, необходимость получения КПД с величиной, приближающейся к единице, привели к созданию вторичных источников, в которых используются ключевые режимы работы приборов и принцип импульсного регулирования. Мы изучим принципы построения импульсных источников вторичного питания с бестрансформаторным входом, основные звенья преобразователей такого рода - конверторы и инверторы.

Наряду с жесткими требованиями к качеству выходных напряжений, высокой стабильности и повышенной надежности, современным вторичным источникам электрического питания присуще наличие технических решений, позволяющих не вносить в первичную сеть помех, обеспечивать высокий «косинус фи», адекватно реагировать на возникновение различных аварийных ситуаций. Мы изучим принципы построения дополнительных блоков источников питания, позволяющих решать названные задачи. В частности, будут рассмотрены идеи, лежащие в основе работы корректоров мощности и устройств, чувствительных к уровню напряжения.

3.1. Общие сведения об электрических машинах постоянного тока

3.1.1. Принцип действия машины постоянного тока

Уже отмечалось, что для выработки электрической энергии используют электрические генераторы, которые преобразуют механическую энергию в электрическую. Широкое распространение таких генераторов в настоящее время в первичных источниках электропитания объясняется высоким коэффициентом полезного действия (КПД) подобных электро-механических устройств.

Для преобразования электрической энергии в механическую работу используются электродвигатели. В современном мире примерно 2/3 электрической энергии превращается в механическую работу различными электродвигателями. Убедительная победа электродвигателей в конкурентной борьбе с паровой машиной и двигателями внутреннего сгорания объясняется следующими преимуществами электродвигателей.

А. Значительно большим КПД электродвигателей по сравнению с другими типами двигателей (паровая машина 7...11%, двигатель внутреннего сгорания <35 %, электродвигатель – 85...95%).

Б. Удобством передачи электрической энергии к двигателю.

В. Большими возможностями по изменению скорости вращения вала двигателя.

В. Значительными возможностями по автоматизации процессов управления.

Г. Удобством эксплуатации, надежностью работы.

Генераторы и двигатели постоянного тока обладают свойством обратимости. Поэтому они имеют принципиально одинаковое устройство и называются электрической машиной постоянного тока. Если в машине происходит преобразование механической энергии в электрическую, то она называется генератором. Если же электрическая энергия преобразуется в механическую, то она становится электродвигателем.

Работа машины постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции и возникновении механических сил (называемых электромагнитными), действующих на проводник с током в магнитном поле. Простейшее устройство для преобразования электрической энергии в механическую показано на рис. 3.1.

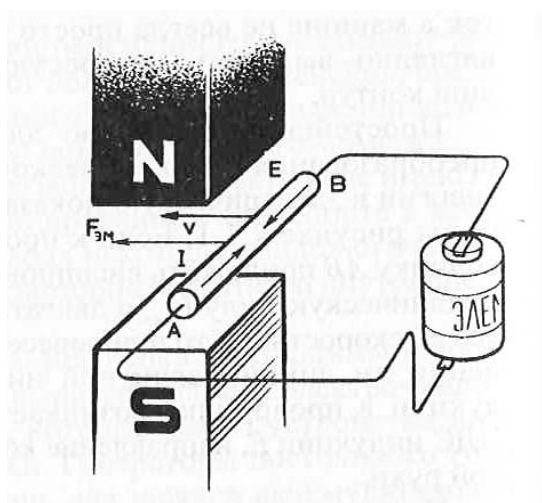


Рис. 3.1. Модель проводника с током, помещенным в магнитное поле, поясняющая возникновение силы

Проводник помещен между двумя магнитами, создающими магнитное поле. Силовой характеристикой этого магнитного поля является вектор индукции магнитного поля \vec{B} или, коротко, магнитная индукция. Направление вектора B совпадает с направлением прямой, проведенной от северного полюса N к южному полюсу магнита S . На проводник с током, помещенный в магнитное поле с индукцией B , как известно из физики (сила Ампера), действует сила:

$$\vec{F} = I(\vec{i} \times \vec{B}) = liB \sin \varphi, \quad (3.1)$$

где l – длина проводника;

I - сила тока;

α - угол между направлением тока и вектором B .

Направление силы, приложенной к проводнику, определяется по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая вектора магнитной индукции входила в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали бы направление тока, то отогнутый на 90° большой палец, укажет направление силы.

Проводник, движущийся под действием электромагнитных сил, совершает работу, и при этом электрическая энергия преобразуется в механическую.

Следует иметь в виду и то, что когда проводник с током поступательно движется, на его положительные и отрицательные заряды действует сила Лоренца, направленная в противоположные стороны, и происходит разделение зарядов. Положительные и отрицательные заряды накапливаются на противоположных концах проводника. Работа по перемещению зарядов вдоль проводника и разделению их это, как известно, электродвижущая сила, поэтому говорят, что в движущемся в магнитном поле проводнике индуцируется (наводится) электродвижущая сила (ЭДС). Направление возникшей ЭДС будет противоположно направлению тока, а также направлению приложенного напряжения. По этой причине возникающую ЭДС часто называют противоЭДС. Направление напряженности стороннего электрического поля (противоЭДС) в прямолинейном проводнике движущемся в магнитном поле, определяется правилом правой руки.

В электрических машинах используют вращательное движение проводников, что упрощает конструкцию машин. Устройство удобной для выяснения принципа действия машины постоянного тока с кольцевым якорем показано на рис. 3.2 – 3.4. Основными частями этой машины являются статор, ротор, и коллекторное устройство.

Статор (неподвижная часть машины) имеет вид полого стального цилиндра. На его внутренней поверхности укреплены два полюса с обмотками возбуждения (рис. 3.2). Здесь возбуждение магнитного поля осуществляется с помощью электромагнитов при протекании по обмотке тока возбуждения I_B , хотя, в принципе, могут применяться и постоянные магниты. Электромагнитное возбуждение в машинах позволяет не толь-

ко получить более сильное поле по сравнению с полем постоянных магнитов, но и управлять его интенсивностью путем изменения тока в обмотке возбуждения. Магнитный поток возбуждения прямо пропорционален намагничивающей силе ($I_B w_B$) и обратно пропорционален магнитному сопротивлению цепи (R_M):

$$\Phi = \frac{I_B w_B}{R_M}. \quad (3.2)$$

Обычно число витков w_B обмотки возбуждения делается большим (несколько тысяч), чтобы иметь малую мощность потерь на нагревание обмоток. Сердечник обмотки возбуждения собирают из пластин. Кроме того, сердечник к центру имеет расширение для уменьшения магнитного сопротивления воздушного зазора.

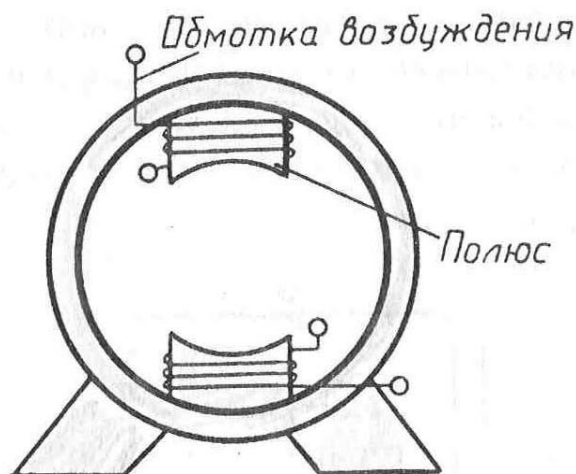


Рис. 3.2. Статор (неподвижная часть) машины постоянного тока

Ротор (вращающаяся часть машины) представляет стальное кольцо, плотно обмотанное по спирали изолированным проводом (рис. 3.3) и укрепленное на валу. Ротор в машинах постоянного тока обычно называется якорем.

Для подачи напряжения на обмотку якоря предназначен щеточно – коллекторный узел машины. Он состоит, в простейшем случае, из угольных щеток, прижимаемых к пластинам, и коллекторного устройства. Коллекторное устройство состоит из медных изолированных друг от

друга и от вала машины пластин, расположенных по цилиндрической поверхности. Коллектор закрепляется на валу якоря и вращается вместе с ним. Пластины коллектора соединяют с обмоткой якоря. На внешнюю часть пластин накладывают графитовые щетки, прижимаемые с помощью пружинки.

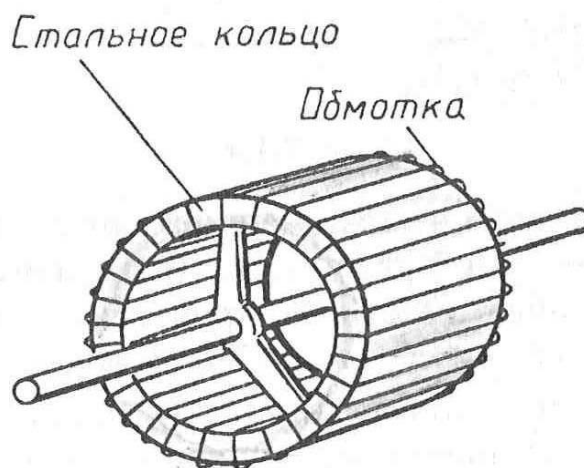


Рис. 3.3. Ротор (вращающаяся часть) машины постоянного тока

В некоторых электродвигателях щетки могут выполняться из благородных металлов и их сплавов, а коллекторы из золота и его сплавов, что позволяет получить стабильное сопротивление механизма щетка коллектор и обеспечить стабильную скорость вращения.

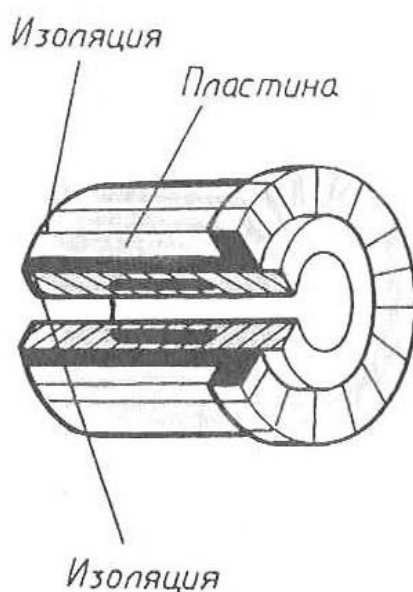


Рис. 3.4. Коллекторное устройство машины постоянного тока

Полная схема машины постоянного тока с кольцевым якорем показана на рис. 3.5. При вращении якоря проводники, расположенные на поверхности стального кольца (их называют активными и для большей наглядности они изображены в виде сечений большого диаметра, что позволяет в каждом сечении отметить направление ЭДС) пересекают линии магнитного поля и в них индуцируется ЭДС. Если мы «зачистим изоляцию» обмотки якоря и наложим на проводники в оголенных местах щетки по линии геометрической нейтрали, то обмотка якоря распадается на две параллельные ветви. При отсутствии внешней цепи напряжение на щетках будет равно ЭДС параллельной ветви. При вращении якоря витки обмотки непрерывно переходят из зоны действия одного полюса в зону действия другого. Направление ЭДС в каждом проводнике (витке) меняется на противоположное, но направление действия ЭДС во всей параллельной ветви сохраняется.

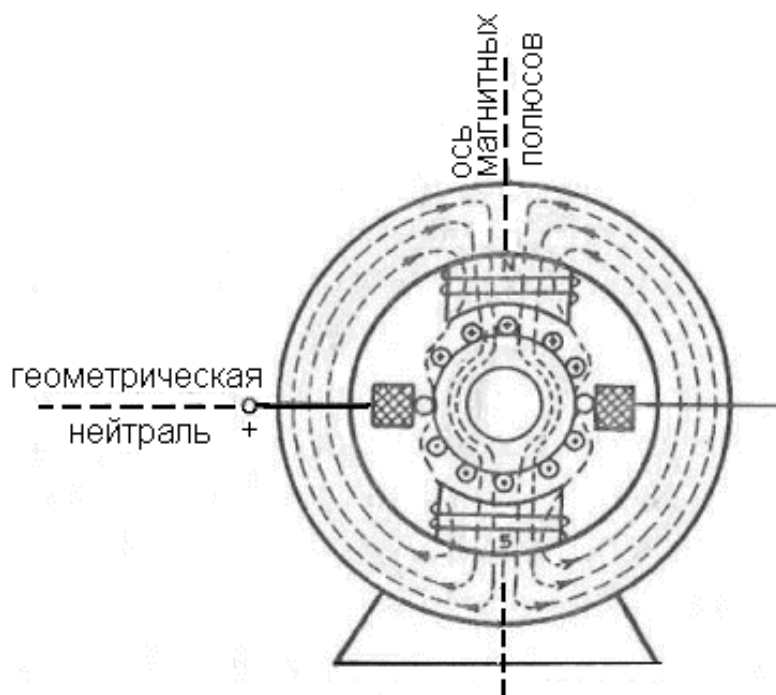


Рис. 3.5. Изображение полной схемы машины постоянного тока с кольцевым якорем

Практически нецелесообразно накладывать на зачищенную обмотку якоря щетки, так как будет происходить быстрый износ и щеток и проводов. Поэтому каждый виток обмотки соединяют с коллекторной пла-

стиной, а щетки накладывают на коллектор, который имеет очень гладкую цилиндрическую поверхность, обеспечивающую долговременную работу щеток. Число параллельных ветвей в обмотке якоря z зависит от числа полюсов в машине p .

Если на щетки якоря подать напряжение, то в обмотках якоря возникнет ток и якорь под влиянием электромагнитных сил придет во вращение. При вращении якоря направление токов в проводниках, находящихся в зоне как северного полюса, так и южного полюса будет сохраняться. Неизменными будут направления электромагнитных сил в зоне каждого полюса и направление действия электромагнитного момента.

При вращении якоря происходит непрерывное переключение витков (секций) якорной обмотки с одной параллельной ветви на другую. Этот процесс получил название коммутации. Коммутация в машине постоянного тока с кольцевым якорем сопровождается искрообразованием в коллекторе.

Помимо механических причин, обусловленных износом щеток и односторонним прилеганием их к коллектору, искрообразование может быть обусловлено также повышенным напряжением между соседними коллекторными пластинами, изменением величины и направления тока в переключаемой секции. Коммутируемая секция обладает индуктивностью L , поэтому, как уже неоднократно отмечалось, при изменении в ней тока возникает ЭДС самоиндукции, которая направлена навстречу нарастающему току. В конце периода коммутации ЭДС самоиндукции достигает особенно больших значений. ЭДС самоиндукции, в момент отрыва коллекторной пластины от щетки, имеет очень большое значение, что приводит к возникновению дугового разряда, разрушающего коллекторную пластину и щетку.

Для обеспечения безыскровой работы щеточно – коллекторного механизма необходимо скомпенсировать ЭДС самоиндукции. Наиболее эффективным методом решения такой задачи является создание в зоне коммутации дополнительного магнитного потока, зависящего от величины тока якоря. Такой поток можно создать, снабдив двигатель добавочными полюсами, установленными между основными полюсами возбуждения по линии геометрической нейтрали. Щетки, по – прежнему, также устанавливаются по этой линии и остаются в таком положении при всех нагрузках. Обмотка дополнительных полюсов соединяется последовательно с якорем, а число витков выбирается таким, чтобы магнитный по-

ток дополнительных полюсов, не только бы обеспечивал создание компенсирующей ЭДС, но и нейтрализовывал реакцию якоря. С этой целью магнитные потоки якоря и дополнительных полюсов должны иметь встречное направление.

3.1.2. Устройство и свойства коллекторного электрического двигателя постоянного тока

Современная машина постоянного тока отличается от машины с кольцевым якорем главным образом конструкцией якоря. У кольцевого якоря большая часть проводов обмотки является не активной (проводники, расположенные внутри стального кольца якоря) и не участвует в образовании ЭДС. Значительно лучше используется провод у обмотки якоря барабанного типа. Обмотка барабанного якоря укладывается на его поверхности, и торцевые (неактивные) проводники составляют небольшую величину от общей длины проводников. На вращающемся якоре (рис. 3.6) обмотки якоря размещены в пазах 8, каждая секция которых подключена к двум пластинам 9 коллектора.

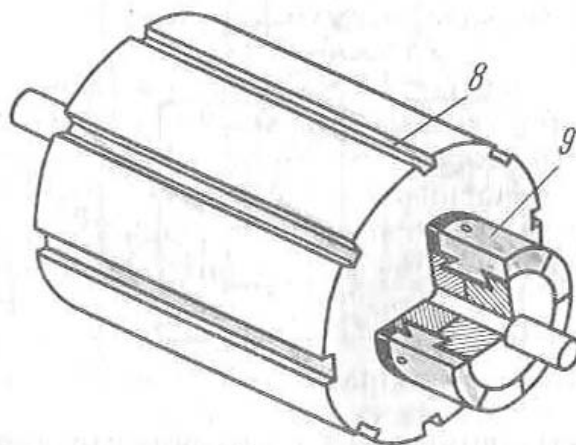


Рис. 3.6. Якорь (вращающаяся часть) барабанного типа машины постоянного тока

Полная схема современного коллекторного двигателя постоянного тока показано на рис. 3.7.

На статоре 5 электродвигателя, отлитом из стали, размещены электромагниты: основной полюс возбуждения 4 с катушкой 3 и дополнительный полюс 7. Статор машины. Полюсы возбуждения создают ос-

новной продольный магнитный поток, а дополнительные полюсы – поперечный магнитный поток для улучшения условий коммутации и уменьшения искрения под щетками. Якорь с пазами обозначен как 1. Якорь электродвигателя набирают из тонких дисков, наштампованных из тонкой электротехнической стали, так как вращаясь в магнитном поле, он подвергается перемагничиванию с частотой, определяемой частотой вращения. Медные пластины коллектора, разделенные изоляционными прокладками, собраны так, что образуют цилиндр. По внешней поверхности цилиндра скользят токосъемные угольные щетки. Коллектор закрепляется неподвижно на валу (оси) якоря и вращается вместе с ним. Обмотки возбуждения и якоря подключаются к сети постоянного тока, якорь вращается, с его вала в нагрузку передается механическая мощность.

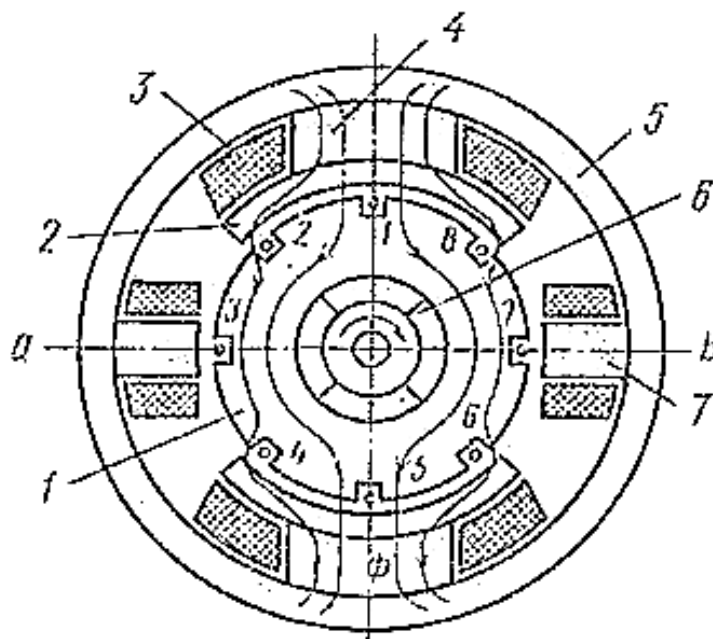


Рис. 3.7. Изображение полной схемы коллекторного электрического двигателя постоянного тока

Промышленность выпускает двигатели которые, по конструкции можно разделить на двигатели с ферромагнитным якорем и малоинерционные, не имеющие ферромагнитного сердечника якоря.

Двигатели с ферромагнитным якорем и обмоткой возбуждения, отличаются от рассмотренных обычных машин лишь тем, что имеют полностью шихтованную магнитную систему (якорь, полюса, станину), что

продиктовано стремлением уменьшить потери в стали и увеличить быстродействие в переходных режимах. Это двигатели серий СЛ, МИ, ПБС и др. Есть двигатели (серии ДП и ДПМ), в которых роль обмотки возбуждения выполняют постоянные магниты. Существуют двигатели, например серии МИГ, в которых обмотка якоря располагается не в пазах (их нет), а непосредственно на поверхности якоря, закрепляясь на ней с помощью специального клея и бандажей. "Беспазовое" исполнение обмотки значительно уменьшает ее индуктивность, улучшает коммутацию и увеличивает быстродействие. Недостатком гладкого якоря является большой немагнитный промежуток между ним и полюсом, что увеличивает размеры обмотки возбуждения.

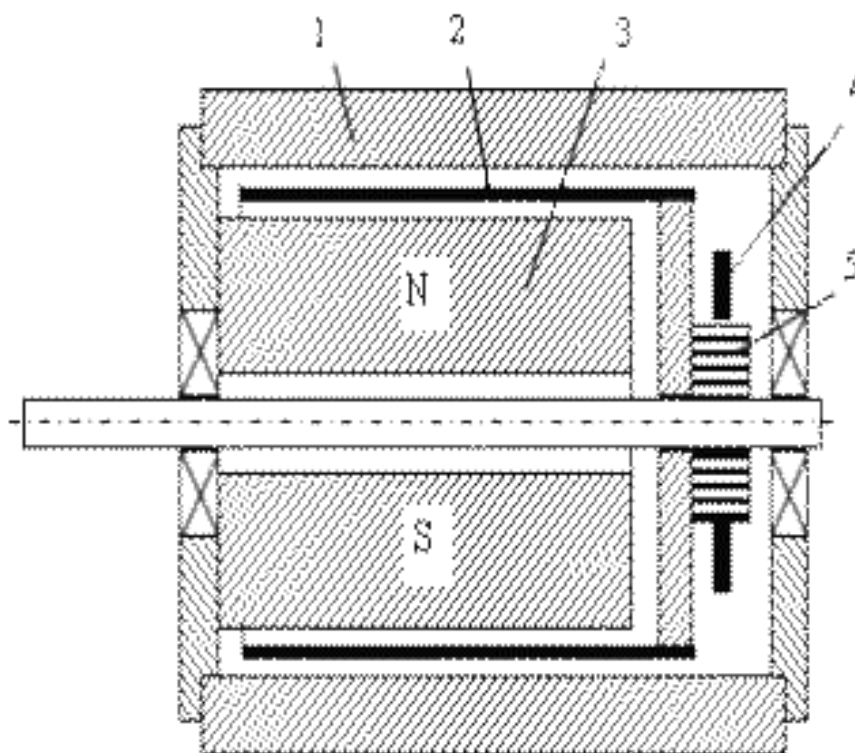


Рис. 3.8. Изображение полной схемы коллекторного электрического двигателя постоянного тока дисковым якорем и печатной обмоткой

Малоинерционные двигатели выпускаются двух типов: 1) с дисковым якорем и печатной обмоткой; 2) с полым немагнитным якорем и обычной обмоткой. Один из вариантов двигателя первого типа показан на рис. 3.8. В его состав входят: дисковый якорь 3, выполненный из тонкого изоляционного материала, на обеих сторонах которого фотохими-

ческим методом нанесена обмотка якоря²; щетки 5, непосредственно касающиеся оголенных проводников якоря. Как видно, здесь отсутствует отдельный коллектор.

Якорь малоинерционных двигателей примерно в 8 раз легче, а момент инерции в 5-10 раз меньше, чем у обычного двигателя. В результате их постоянные времени в 2-2,5 раза меньше. К тому же они имеют практически безыскровую коммутацию, поскольку их секции обладают меньшей индуктивностью. К недостаткам таких двигателей можно отнести большой воздушный зазор, а, следовательно, большие габариты по сравнению с обычными машинами.

Прежде чем далее изучать коллекторный электродвигатель, сделаем отступление и оговорим следующее.

Электродвигатель служит для создания движения рабочих органов различных исполнительных механизмов и машин. По этой причине он практически всегда входит в некую систему «двигатель – механизм рабочей машины». И, с этой точки зрения, электродвигатель, приводящий в движение какой-либо орган рабочей машины, следует рассматривать как некую сложную электромеханическую систему, в которой в постоянном взаимодействии находятся механическая и электрическая части. Это свидетельствует о том, что для цельности при изучении работы электродвигателя следует в единстве обращать внимание, как на вопросы, связанные с механикой двигателя, так и на вопросы, касающиеся электротехнических аспектов функционирования двигателя.

При изучении вопросов механики электродвигателя, движения его вала и соединенных с ним рабочих органов и исполнительных механизмов, используют известные из курса теоретической механики уравнения движения. Обычно при этом фокусируют внимание на рассмотрении полезных и вредных сил сопротивлению движения. Полезными являются те силы сопротивления движению, для преодоления которых как раз и предназначена данная машина. Эти силы определяются конструкцией рабочей машины и особенностями технологического процесса, в которой встроена данная машина.

Вредные силы обусловлены различными видами потерь. В основном это потери, создаваемые силами трения. Полезные и вредные силы создают момент статического сопротивления M_C движению вала электродвигателя.

В самом общем виде, как известно из курса теоретической механики, уравнение движения вала электродвигателя может быть представлено формулой:

$$M_J = M - M_C, \quad (3.3)$$

где M - развиваемый электродвигателем электромагнитный момент при подаче на него напряжения;

M_C - статический момент сопротивления движению, создаваемый рабочими органами за счет полезных и вредных сил;

M_J - динамический момент, определяющий направление движения вала и характер работы машины постоянного тока.

Определим электромагнитный момент M , развиваемый электродвигателем.

Как отмечалось, при протекании тока по обмотке якоря, из-за взаимодействия каждого активного проводника с магнитным потоком возбуждения, возникает электромагнитная сила (3.1), направление которой определяется правилом левой руки. Поскольку магнитная индукция меняется по окружности, то не все электромагнитные силы проводников будут одинаковыми и в разных точках поверхности якоря она будет различна. Имеет смысл использовать среднее значение. В воздушном зазоре двигателя индукция направлена по радиусу и, следовательно, нормальна к активным сторонам секций обмотки якоря. Поэтому усредненное значение магнитной индукции можно получить, разделив магнитный поток на площадь полюса:

$$B_{CP} = \frac{\Phi}{\tau}. \quad (3.4)$$

Тогда, среднее значение силы F_{CP} , действующей на каждый проводник длиной l , будет равно:

$$F_{CP} = B_{CP} l = \frac{\Phi l}{\tau}. \quad (3.5)$$

Соответственно, среднее значение момента силы (произведение модуля силы на плечо, как кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы), создаваемого одним проводником будет равно:

$$M_{\text{CP}} = F_{\text{CP}} \frac{D}{2} = \frac{\Phi I D}{2\tau}, \quad (3.6)$$

где D – диаметр якоря;

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} - \text{полюсное деление, а } p - \text{число пар полюсов электро-}$$

двигателя.

Подставляя значение τ , учитывая число параллельных ветвей и число проводников в якоре z , окончательно можно получить формулу для электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем:

$$M = C I_{\text{я}} \Phi, \quad (3.7)$$

где $C = \frac{pz}{2\pi a}$ - постоянная для данного двигателя;

$I_{\text{я}}$ - величина тока в якоре.

Из (3.7) следует, что электромагнитный момент, развиваемый двигателем пропорционален магнитному потоку, создаваемому полюсом и току якоря. Этот момент является вращающим (в генераторах – противодействующим).

Электродвигатели постоянного тока имеют две обмотки: обмотку возбуждения и обмотку якоря. Поэтому, чтобы изучать далее вопросы, касающиеся электротехнических аспектов функционирования электродвигателя, надо знать, как соединены в двигателе обмотки якоря и возбуждения.

Могут быть использованы следующие способы соединения обмоток якоря и возбуждения.

Обмотка якоря подключается к источнику питания постоянного напряжения (условно – к силовой сети). Обмотка возбуждения (ОВ) может подключаться к другому источнику постоянного напряжения и не иметь электрического соединения с обмоткой якоря. Такое соединение обмо-

ток (рис. 3.9а) позволяет реализовывать электродвигатель с независимым возбуждением.

ОВ может присоединяться непосредственно к щеткам, наложенным на коллектор. В этом случае обмотка якоря и обмотка возбуждения оказываются включенными параллельно.

Такие двигатели (рис.3.8б) называются электродвигателями с параллельным возбуждением. Полюсные катушки таких машин имеют много витков тонкого провода. При этих условиях ток в обмотке возбуждения будет малым, а тепловые потери – незначительными.

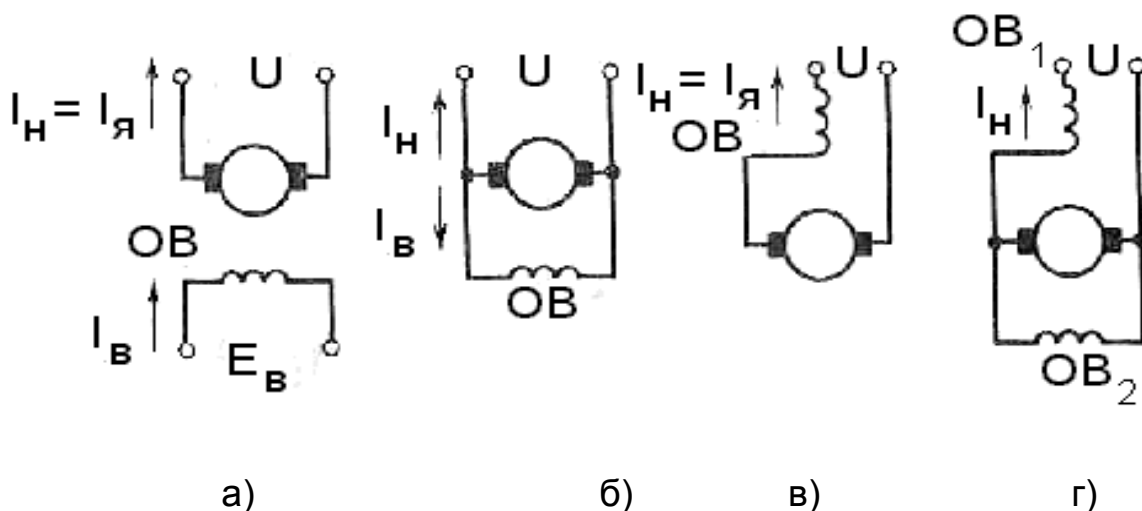


Рис. 3.9. Способы соединения обмоток в коллекторном двигателе постоянного тока

ОВ может быть соединена последовательно с якорем. В этом случае имеет место электродвигатель с последовательным возбуждением (рис. 3.8в). Сопротивление обмотки должно быть малым, поэтому полюсные катушки выполняются из толстого провода и они имеют мало витков. Необходимый магнитный поток обеспечивается за счет большого значения тока.

Если на каждый полюсный наконечник одеты две катушки, одна из которых включается параллельно с якорем, а другая – последовательно, то речь идет о электродвигателе постоянного тока со смешанным возбуждением (рис. 3.8г).

Способ соединения обмоток возбуждения и якоря оказывает существенное влияние на электрические и механические свойства (характере-

ристики) двигателя, поэтому вначале рассмотрим электродвигатель с независимым возбуждением.

Оставим пока вне внимания вопросы, касающиеся пуска (разгона) электродвигателя, торможения, изменения скорости вращения за счет скачкообразного изменения нагрузки, и рассмотрим так называемый установившийся режим работы двигателя постоянного тока. Такой режим соответствует состоянию работы двигателя, когда движущий момент, развиваемый двигателем на валу M равен моменту сопротивления движения M_C на том же валу.

Динамический момент, определяющий направление движения вала и характер работы машины постоянного тока $M_J = J \frac{d\omega}{dt}$, в этом случае равен нулю и, соответственно, производная $\frac{d\omega}{dt} = 0$. То есть движение вала совершается с постоянной угловой скоростью и момент инерции на валу равен J .

У электродвигателя с независимым возбуждением, при подключении его к сети, якорь (и, соответственно, вал) приходит во вращение и в двигателе устанавливается частота вращения вала ω . В установившемся режиме двигатель берет электрическую энергию от сети (мощностью $P_{дв}$), превращает ее в механическую работу и направляет ее к механизму рабочей машины, для осуществления полезной функции (воздействия на механизм), которой нужна механическая мощность P_M .

Для якорной обмотки (рис. 3.8а), согласно второго закона Кирхгофа, можно записать:

$$U_{я} - I_{я}R_{я} = E_{пэдс}. \quad (3.8)$$

Чтобы в машине постоянного тока осуществлялся режим двигателя, а не генератора, приложенное к зажимам якоря напряжение $U_{я}$ должно уравнивать падение напряжения не только на внутреннем сопротивлении якоря $I_{я}R_{я}$, но и величину противо-ЭДС $E_{пэдс}$.

Поэтому из (3.8) следует, что в силу малого сопротивления якоря $R_{я}$ (сопротивления проводов обмоток якоря, компенсационной обмотки и щеток) и малого падения напряжения на нем $I_{я}R_{я}$, в номинальном ус-

тановившемся режиме, когда нагрузка на валу соответствует паспортной, величина противо-ЭДС очень мало отличается от приложенного напряжения.

Можно показать, что значение противо-ЭДС в якоре определяется выражением:

$$E_{\text{пэдс}} = C\Phi\omega, \quad (3.9)$$

где - $C = \frac{pz}{2\pi a}$ - конструктивная постоянная для данного двигателя,

которая зависит от числа пар полюсов p , от числа пар параллельных ветвей z и числа стержней в якоре a .

При использовании компенсационной обмотки магнитный поток, в первом приближении, можно считать постоянным и равным номинальному (паспортному) $\Phi = \Phi_{\text{НОМ}}$.

Тогда при напряжении якоря равном напряжению силовой сети $U_{\text{я}} = U_{\text{СЕТИ}}$ из (3.8) и (3.9) следует:

$$U_{\text{СЕТИ}} - I_{\text{я}}R_{\text{я}} = C\Phi_{\text{НОМ}}\omega. \quad (3.10)$$

Отсюда следует, что угловая скорость вращения двигателя определяется выражением:

$$\omega = \frac{U_{\text{СЕТИ}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} - \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (3.11)$$

Первый член в выражении ω_0 характеризует идеальную угловую скорость двигателя в режиме холостого хода $I_{\text{я}} = 0$, когда момент сопротивления движению на валу равен нулю.

Второй член выражения $\Delta\omega$ определяет падение скорости при данном токе якоря и конкретной величине момента сопротивления движению на валу.

Для характеристики работы двигателей в рассмотрение вводят электромеханическую характеристику (регулировочную характеристику), как зависимость угловой скорости вращения вала ω электродвигателя

от величины тока, потребляемого электродвигателем (якорем электродвигателя) при постоянном напряжении на двигателе.

На рис.3.9. представлена электромеханическая (регулирующая) характеристика двигателя, которая показывает, как меняется частота вращения вала двигателя в зависимости от тока якоря при неизменном (постоянном) напряжении на якорных выводах двигателя.

Проанализируем ее свойства для электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, когда напряжение возбуждения подается на обмотку полюсов, а напряжение сети (управления) - на обмотку якоря.

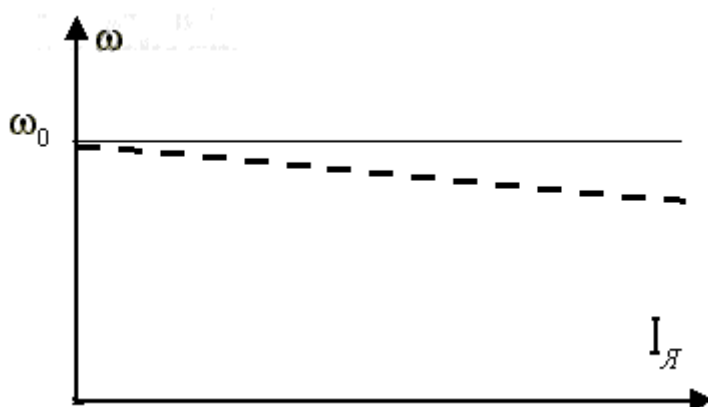


Рис.3.9. График электромеханической (регулирующей) характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Важным достоинством регулирующей характеристики такого двигателя является ее линейность. Это позволяет относительно просто осуществлять регулировку частоты вращения вала за счет изменения тока (в простейшем случае переменным резистором, включенным последовательно в цепь якорной обмотки, хотя такой способ не экономичен). Небольшой наклон этой характеристики свидетельствует о том, что при осуществлении стабилизации тока якоря в двигателе постоянного тока удастся получить равномерное вращение вала с неизменной и весьма стабильной угловой частотой.

Из (3.7) для электромагнитного момента и (3.8) следует, что ток якоря, в установившемся режиме, связан с моментом, развиваемым электродвигателем, следующими соотношениями:

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} - E_{\text{пЭДС}}}{R_{\text{я}}} = \frac{M}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = \frac{M_{\text{ВР}} + M_{\text{ПОЛ}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} \Rightarrow,$$

$$I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{ВР}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} + \frac{M_{\text{ПОЛ}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = I_{0\text{ХХ}} + \frac{M_{\text{ПОЛ}}}{C\Phi}. \quad (3.12)$$

Последнее уравнение свидетельствует о том, что при отсутствии полезной нагрузки на валу двигателя (холостой ход) ток якоря электродвигателя мал и определяется действием вредных сил $M_{\text{ВР}}$. При возрастании полезной нагрузки $M_{\text{ПОЛ}}$ увеличивается и ток якоря.

Подставляя ток якоря (3.12) в (3.11) определяем, что скорость углового вращения вала двигателя в установившемся режиме равна:

$$\omega = \frac{U_{\text{СЕТИ}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} - \frac{I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{C\Phi_{\text{НОМ}}} = \omega_0 - \frac{MR_{\text{я}}}{(C\Phi_{\text{НОМ}})^2}. \quad (3.13)$$

Для полного описания работы двигателей в установившемся режиме, помимо электромеханической характеристики, в рассмотрение вводят также механическую характеристику, как зависимость угловой скорости вращения вала ω электродвигателя от момента, развиваемого электродвигателем, при постоянном напряжении на двигателе.

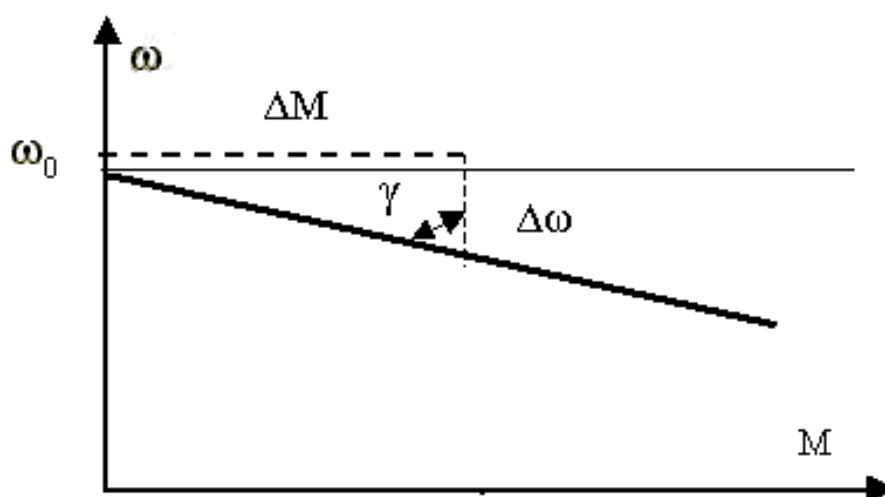


Рис. 3.10. График механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

На рис. 3.10. представлена механическая характеристика двигателя, которая показывает, как меняется частота вращения вала двигателя в зависимости момента на валу при неизменном (постоянном) напряжении на якорных выводах двигателя.

У двигателя с независимым возбуждением магнитный поток не зависит от тока якоря, поэтому такой двигатель, в идеале при $R_{\text{я}}=0$, при любой нагрузке имел бы одну и ту же угловую частоту вращения (его механическая характеристика была бы горизонтальной). При отличных от нуля сопротивлениях якоря $R_{\text{я}}$ с ростом момента на валу частота несколько уменьшается. Из-за этого механическая характеристика представляет собой ниспадающую линию, которая имеет небольшой отрицательный наклон.

Сравнительная характеристика двигателей производится по так называемой «жесткости» их характеристик, которая определяется коэффициентом «жесткости β »:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} = \operatorname{tg}\gamma. \quad (3.14)$$

Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением имеют «жесткие» механические характеристики. Это означает, что при $M=M_{\text{н}}$ падение скорости $\Delta\omega$ у них не превышает более 10 % от ω_0 . У абсолютно жестких характеристик $\gamma = 90^\circ$, $\beta \rightarrow \infty$. Электрические двигатели с жесткими механическими характеристиками используют там, где необходима практически постоянная частота при колебаниях величины механической нагрузки (к примеру, в металлорежущих станках, ножницах гильотинного типа для резки бумаги, в гибочных и пакетирующих механизмах).

Не приводя выкладок и доказательств, отметим следующее.

Механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением в основном подобна характеристике двигателя с независимым возбуждением, так как ток в обмотке возбуждения в этом случае постоянен и определяется напряжением сети и сопротивлением обмотки возбуждения. Двигатель параллельного возбуждения не только имеет «жесткую» механическую характеристику, но и позволяет плавно экономично в широких пределах изменять скорость вращения вала двигателя.

Регулирование скорости вращения производится исключительно изменением тока возбуждения, который составляет примерно 7 % от общего тока двигателя. При этом потери энергии в переменном регулировочном резисторе малы.

Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением (рис. 3.11) более «мягкая», т. е. частота вращения якоря резко снижается при возрастании момента на валу (механической нагрузки).

Это характерная особенность двигателя последовательного возбуждения. Связано это с тем, что при большой нагрузке ток якоря велик и значительная часть напряжения, приложенного к двигателю, падает на сопротивлении обмотки возбуждения. Так как противо-ЭДС, наводимая в обмотке якоря должна уравновешивать $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, а для этого требуется небольшая частота вращения, так как требуемая противо-ЭДС невелика, а магнитный поток, определяемый током якоря, велик.

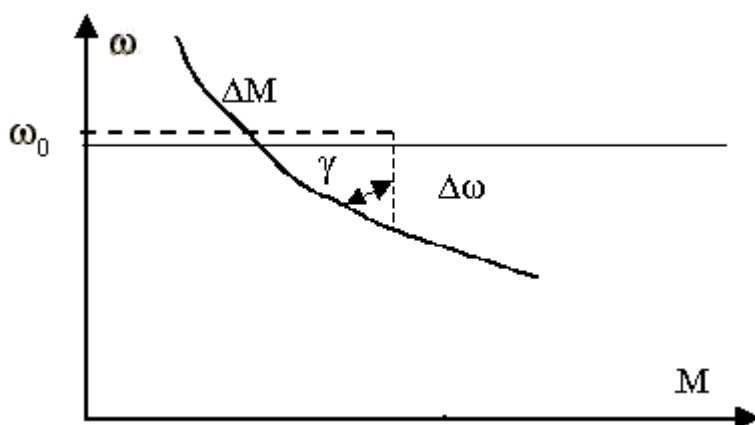


Рис. 3.11. График механической характеристики двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Если сравнить между собой двигатели последовательного и параллельного возбуждения, которые имеют одинаковое значение номинальной мощности, одинаковое число оборотов при номинальной нагрузке и рассчитаны на одинаковое напряжение, то при одинаковом пусковом токе двигатель последовательного возбуждения разовьет больший момент, чем двигатель параллельного возбуждения, «легче возьмет с места» и создаст большие ускорения. Двигатели с последовательным возбуждением целесообразно применять там, где требуются большие усилия при разгоне (к примеру, в крановых механизмах).

Следует иметь в виду, что при отсутствии нагрузки (момент на якоре и ток якоря малы) частота вращения может оказаться очень большой. Частота вращения вала двигателя может возрасти до опасного предела («разноса»). Чтобы удержать число оборотов двигателя на уровне, который не опасен для его механической прочности, принимают специальные меры.

У двигателей со смешанным возбуждением механические характеристики являются промежуточными между характеристиками двигателей с последовательным и параллельным и параллельным возбуждением. Смешанное возбуждение позволяет объединить хорошие пусковые свойства двигателей с последовательным возбуждением с относительной независимостью частоты вращения от механической нагрузки двигателей параллельного возбуждения. Двигатели со смешанным возбуждением имеют мягкую механическую характеристику в области малых моментов и жесткую при больших моментах на валу.

«Мягкие» характеристики двигателей с последовательным и смешанным возбуждением имеют ($D_{щ} > 0.1 \omega_0$) при $M = M_H$. Это означает, что при $M = M_H$ падение скорости $D_{щ}$ у них превышает более чем на 10 % от ω_0 . У абсолютно мягких характеристик $\beta \rightarrow 0$.

Рассмотрим теперь общие для двигателей постоянного тока вопросы, связанные с пуском электродвигателя.

В момент пуска, когда якорь неподвижен, согласно (3.9). противо-ЭДС равна нулю. Ток якоря в соответствии с (3.8) равен:

$$I_{япус} = \frac{U_{я} - E_{пэдс}}{R_{я}} = \frac{U_{я}}{R_{я}}. \quad (3.15)$$

Этот ток обычно в 10...30 раз больше номинального, и он опасен как для целостности якоря, так и для сети, напряжение которой снизится в момент пуска из-за большого тока. Допустимое значение пускового тока $I_{япус}$ не должно превышать номинальный ток $I_{я}$ более чем в 1,5...2 раза.

Для того чтобы обеспечить надежную работу электродвигателя в момент пуска в цепь якоря последовательно вводится дополнительный переменный резистор, обычно именуемый пусковым реостатом. В самом начале его сопротивление велико. По мере увеличения скорости враще-

ния вала двигателя, противоЭДС якоря растет, ток уменьшается, поэтому ползунок пускового реостата переводится в положение, при котором сопротивление реостата в цепи якоря становится равным нулю. Следует иметь в виду, что пусковой реостат рассчитан на кратковременную работу и после окончания пускового периода его необходимо полностью вывести, так как в противном случае он перегорит.

Обратим внимание на то обстоятельство, что для быстрого «разгона» электродвигателя необходимо иметь большой пусковой момент. Это, при пуске с реостатом, может быть обеспечено за счет магнитного потока $M = C I_{\text{я}} \Phi$. Поэтому в момент пуска двигателя ток в обмотке возбуждения должен иметь наибольшее возможное значение, а это означает, что при пуске двигателя напряжение на обмотке возбуждения не следует снижать.

Двигатели малой мощности имеют сравнительно большое сопротивление якорной обмотки и относительно малый момент инерции якоря, поэтому их включение допустимо без пусковых реостатов.

Заключая описание, еще раз подчеркнем следующее. Несмотря на ряд существенных недостатков, связанных с наличием скользящего контакта между щеткой и коллектором, двигатели постоянного тока широко используются, поскольку обладают и рядом положительных качеств, в частности такими как: плавное, широкое и экономичное регулирование частоты вращения; практическое отсутствие ограничений на максимальную и минимальную частоту вращения; большие пусковые моменты; хорошая линейность механических, а при якорном управлении и регулировочных характеристик.

Как это не парадоксально, но двигатели постоянного тока принципиально возможно подключать к сети переменного напряжения.

Универсальными коллекторными двигателями (УКД) называются электродвигатели, которые могут работать от сети постоянного и переменного тока. Эти двигатели находят широкое применение в высокоскоростных приводах (швейных машины, кофемолки, пылесосы, электробритвы и т.п.), т.к. позволяют при питании от сети 50 Гц получать весьма значительные скорости вращения (до 30000 об/мин), чего невозможно добиться с помощью двигателей других типов при частоте 50 Гц. Такие двигатели имеют возможность плавного изменения скорости вращения двигателя в широких пределах.

Двигатель, который бы удовлетворительно работал бы на постоянном и переменном токах, должен иметь магнитную цепь, набранную из отдельных пластин, так как магнитный поток в такой цепи будет пульсирующим. Конструктивно УҚД отличаются от машин постоянного тока тем, что у них шихтована вся магнитная система (якорь, полюса, станина); обмотка возбуждения имеет дополнительные отводы и располагается по обеим сторонам от якоря

УҚД всегда выполняются с последовательным возбуждением без дополнительных полюсов (рис. 3.12). Последовательное возбуждение будет более рационально, чем с параллельное.

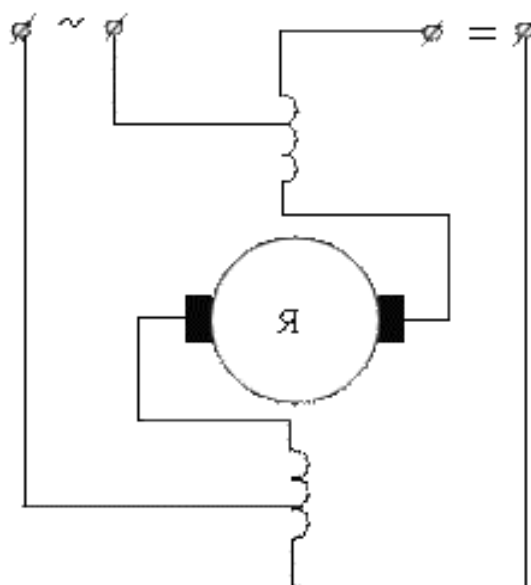


Рис. 3.12. Способы соединения обмоток в универсальном коллекторном двигателе

Если двигатель постоянного тока параллельного или последовательного возбуждения питать переменным током, двигатель будет развивать вращающий момент определенного направления, поскольку токи якоря и возбуждения будут изменять свои знаки одновременно. Другое дело, что вследствие большой индуктивности параллельной обмотки возбуждения, ток возбуждения будет значительно отставать от напряжения. Работа УҚД на постоянном токе ничем не отличается от работы обычного двигателя, а вот на переменном токе есть ряд особенностей.

Как известно, ток, создающий магнитный поток, кроме намагничивающей составляющей всегда содержит небольшую активную состав-

ляющую, необходимую для покрытия потерь в стали. По этой причине ток опережает поток на небольшой угол (его называют «угол магнитных потерь»; он порядка 5°). В случае универсального коллекторного двигателя ток якоря будет опережать магнитный поток на больший угол (порядка 15°), т.к. он содержит дополнительную составляющую ($-i_{TP}$), необходимую для компенсации размагничивающего действия коммутирующей секции (рис. 3.13).

Магнитный момент в этом случае имеет две составляющие: постоянную и переменную, изменяющуюся с двойной частотой. Из графика момента видно, что в отдельные промежутки времени момент становится даже отрицательным. Отрицательные значения момента и его пульсации вследствие большой частоты и значительных маховых масс вращающихся частей практически не сказываются на равномерности вращения двигателя.

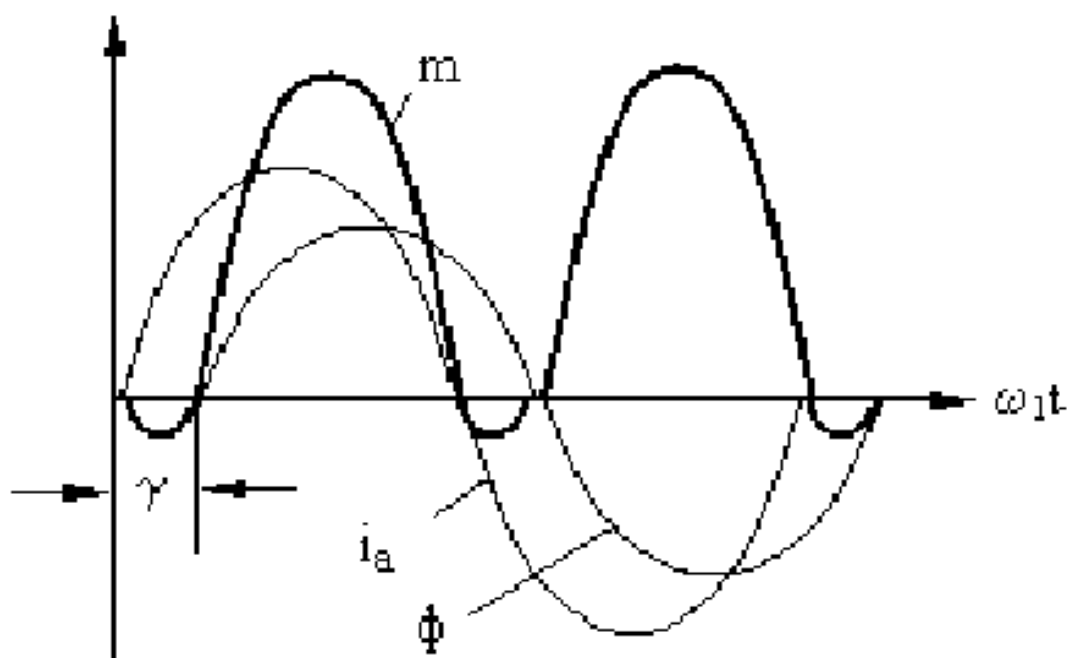


Рис. 3.13. Графики магнитного потока, тока и магнитного момента при работе универсального электродвигателя при подключении к сети переменного напряжения

При работе УКД на переменном напряжении частота вращения вала несколько уменьшается, по сравнению с тем, если бы двигатель работал на постоянном токе. Чтобы уравнивать частоты вращения на посто-

янном и переменном токе при номинальной нагрузке, часть витков обмотки возбуждения при питании переменным током отключают, что приводит к уменьшению магнитного потока и выравниванию скоростей.

В связи с уменьшением магнитного потока при работе на переменном токе магнитная система двигателя оказывается слабо насыщенной, поэтому скоростная характеристика приближается к гиперболической, а токовая - к параболической.

Ток якоря при работе двигателя от сети переменного тока становится больше, чем при работе от сети постоянного тока из-за наличия реактивной составляющей и большей активной составляющей вследствие возрастания потерь в стали. По этим же причинам КПД машины получается меньшим.

Уравнение напряжения двигателя на переменном токе значительно сложнее, чем на постоянном токе, т.к. приходится учитывать ЭДС, которые индуцируются в обмотке якоря и обмотке возбуждения пульсирующим полем возбуждения, полем поперечной реакции якоря, полями рассеяния.

При работе на переменном токе в коммутирующей секции кроме реактивной ЭДС наводится еще и трансформаторная ЭДС, т.к. секция пронизывается пульсирующим потоком возбуждения. Реактивная ЭДС совпадает с током якоря. Трансформаторная ЭДС, будучи производной магнитного потока, перпендикулярна ему. В этих условиях результирующая ЭДС коммутирующей секции может достигать весьма больших значений, особенно в период пуска, когда ток якоря наибольший. По указанным причинам коммутация машины на переменном токе заметно ухудшается по сравнению с работой на постоянном токе. Установка дополнительных полюсов позволила бы скомпенсировать реактивную ЭДС. Трансформаторную же ЭДС скомпенсировать нельзя. При этом дополнительные полюса и компенсационные обмотки усложнили бы конструкцию машины, поэтому в двигателях они не применяются.

Частота вращения УКД регулируется так же, как и в любом двигателе последовательного возбуждения: либо изменением подводимого напряжения, либо шунтированием обмотки якоря или обмотки возбуждения.

К числу недостатков универсальных коллекторных двигателей, кроме отмеченных выше, следует отнести радиопомехи и значительный шум, создаваемый ими при работе с высокой скоростью вращения. Для

борьбы с радиопомехами выполняют экранирование машины и симметрирование обмотки возбуждения, применяют электрические фильтры. В простейшем виде электрический фильтр представляет собой конденсатор, включенный между проводами сети (рис. 3.14).

Корпус двигателя обычно делают металлическим и он является экраном и в известном смысле поглощает радиопомехи. Со стороны коллектора часто на торец корпуса надевают защитный металлический колпак, вентиляционные отверстия закрывают медной или латунной сеткой, а выступающий конец вала замыкают специальной щеткой на корпус двигателя. Внутренние соединения обмоток выполняют экранированным проводом, причем экран соединяют с заземленным корпусом. Симметрирование обмотки возбуждения сводится к выполнению ее по обе стороны от якоря.

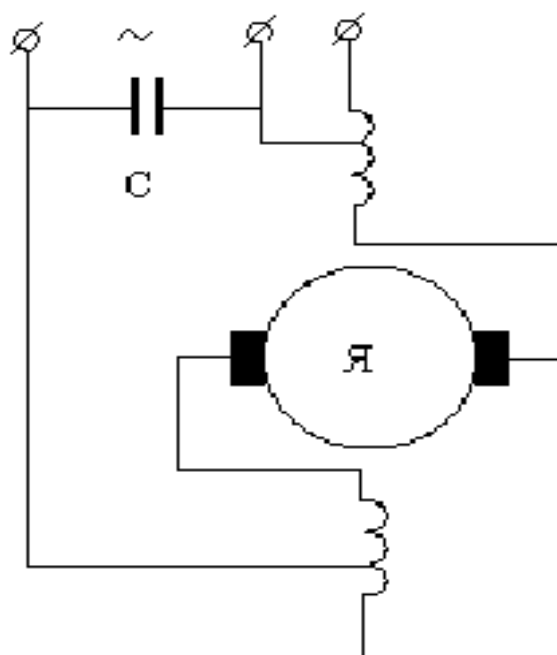


Рис. 3.14. **Схема простейшего фильтра**

Двигатели постоянного тока обычного исполнения имеют ценное качество-возможность широко и плавно регулировать скорость вращения. Вместе с тем они обладают существенным недостатком, обусловленным щеточно-коллекторным узлом. Вполне естественно, что появилась мысль создать двигатели, обладающие достоинствами двигателей постоянного тока и свободные от их недостатков. Такие двигатели назы-

ваются бесконтактными двигателями постоянного тока. Бесконтактные двигатели постоянного тока состоят из трех элементов (рис. 3.15.):

- 1) бесконтактного двигателя с m -фазной обмоткой на статоре и ротором в виде постоянного магнита;
- 2) датчика положения ротора (ДПР), выполненного в одном корпусе с двигателем и предназначенного для выработки сигналов управления в определенные моменты времени для последовательной коммутации токов в обмотках статора;
- 3) коммутатора, осуществляющего по сигналам ДПР коммутацию токов в обмотках статора.

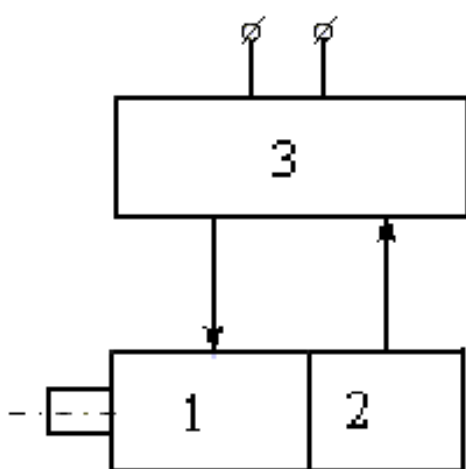


Рис. 3.15. Структурная схема бесконтактного двигателя постоянного тока

Принцип действия бесконтактного двигателя рассмотрим на примере упрощенной схемы (рис. 3.16.).

В ее состав входит бесконтактный двигатель с тремя обмотками на статоре, сдвинутыми в пространстве на 120 градусов и соединенными в звезду, а также ДПР с одним сигнальным элементом (СЭ) и тремя чувствительными элементами (ЧЭ) (их число равно числу обмоток статора), коммутатор, выполненный на трех транзисторах, работающих в ключевом режиме, т.е. в режиме "закрыт" или "открыт".

Датчики положения ротора могут быть построены с использованием ЭДС Холла, фотоэффекта и т.д.

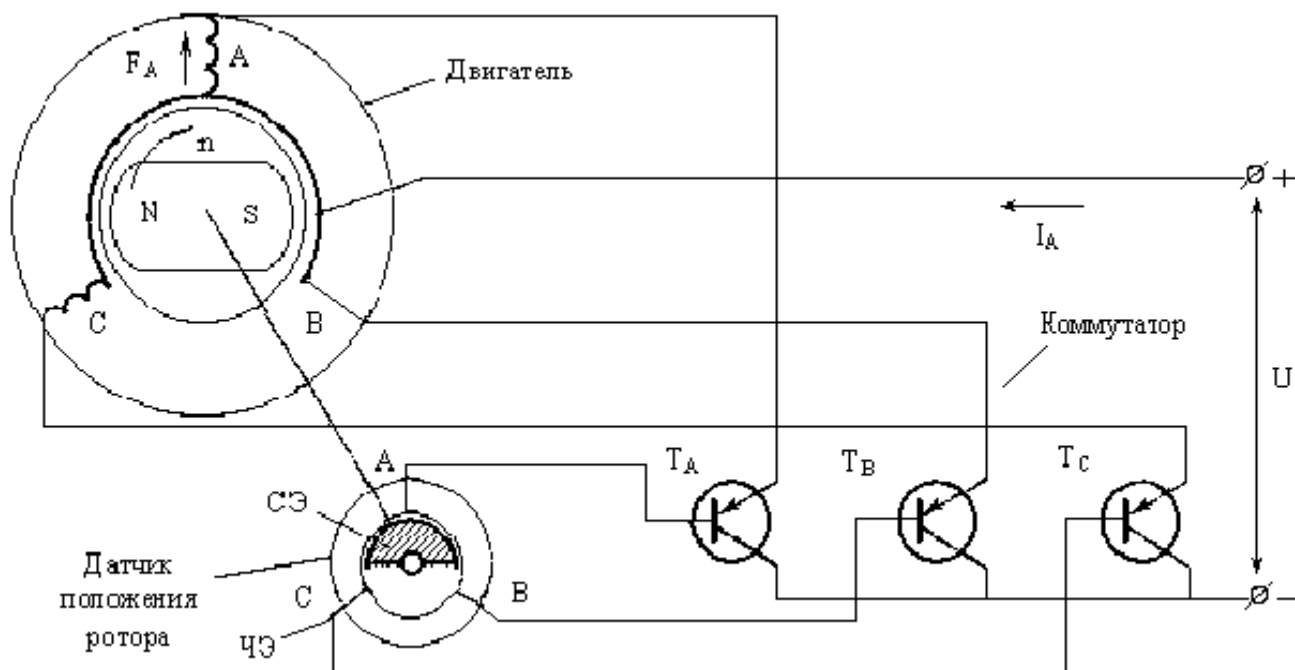


Рис. 3.16. Упрощенная принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока

В положении, показанном на рис. 3.16, сигнальный элемент через чувствительный элемент "А" открывает транзистор T_A . По обмотке А протекает ток I_A . Намагничивающая сила обмотки F_A взаимодействует с потоком постоянного магнита ротора. Возникает вращающий момент, и двигатель приходит во вращение (1-й такт на рис. 3.17.). Вместе с ротором поворачивается и СЭ ДПР. При повороте ротора на угол чуть больший 30° СЭ будет воздействовать сразу на два ЧЭ: на "А" и на "В". Это значит, что будут открыты сразу два транзистора: T_A и T_B . Ток будет протекать по обеим обмоткам А и В. Появится результирующая намагничивающая сила статора F_{AB} , которая повернется на 60° по сравнению с первым положением (2-й такт на рис. 3.17).

Эта намагничивающая сила продолжает взаимодействовать с полем постоянного магнита; двигатель продолжает развивать вращающий момент.

Когда угол поворота станет чуть больше 90° , транзистор T_A закроется, ток будет проходить только по обмотке В. Поле ротора будет взаимодействовать только с намагничивающей силой этой обмотки, однако вращающий момент по-прежнему будет воздействовать на ротор

двигателя и вращать его в том же направлении (3-й такт на рис. 3.17). В конечном итоге двигатель разовьет такую скорость, при которой его момент будет уравниваться моментом нагрузки.

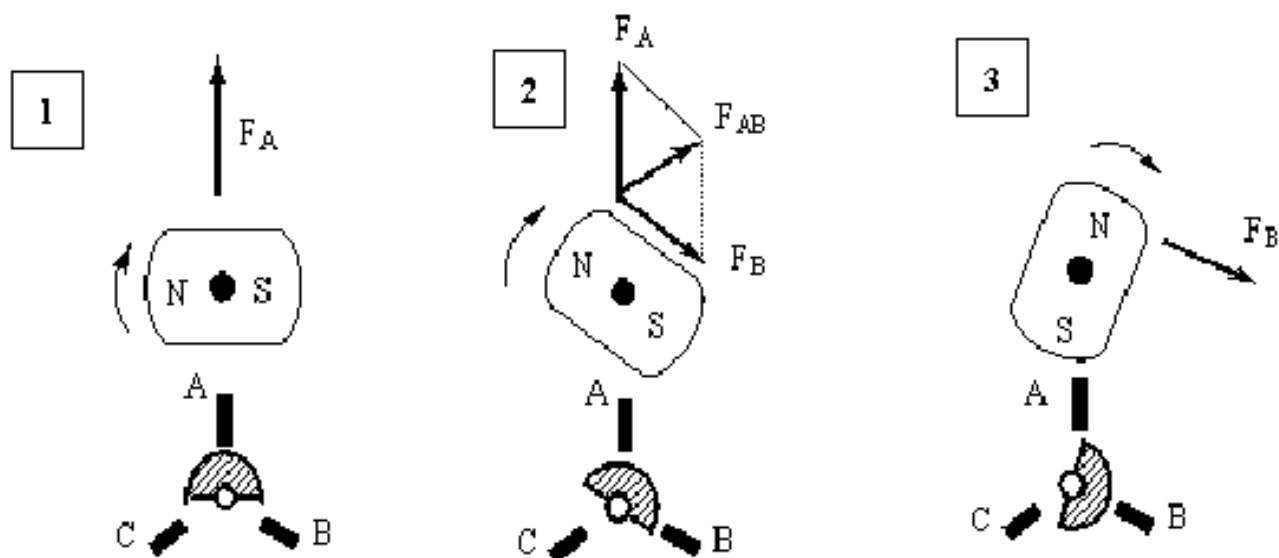


Рис. 3.17. Модель, поясняющая первые 3 такта в работе бесконтактного двигателя постоянного тока

Если бы бесконтактный двигатель имел обмоток, чувствительных элементов и транзисторов столько же, сколько обычный двигатель имеет коллекторных пластин, то по своим свойствам и характеристикам они ничем бы не отличались друг от друга. Однако увеличение числа элементов сильно усложняет конструкцию машины. Поэтому в реальных двигателях число обмоток, а соответственно, и число чувствительных элементов и транзисторов не превышает 3-4.

Малое число обмоток обуславливает ряд особенностей работы бесконтактного двигателя постоянного тока:

1. Пульсация вращающего момента возникает вследствие скачкообразного перемещения намагничивающей силы статора (см. положения 1,2,3 рис. 3.17). В соответствии с общими законами электрохимического преобразования энергии момент бесконтактного двигателя может быть определен как скалярное произведение магнитного потока ротора и намагничивающей силы взаимодействующих обмоток статора:

$$M = C_M F \Phi_P \sin \theta, \quad (3.16)$$

где: c_M - постоянный коэффициент; θ - угол между потоком ротора и намагничивающей силой статора.

Так как при вращении двигателя угол θ непрерывно меняется, то и момент двигателя не остается постоянным.

2. Реакция якоря периодически изменяется, становясь то поперечной, то продольно намагничивающей, то продольно размагничивающей (рис. 3.18). Объясняется это опять-таки скачкообразным перемещением намагничивающей силы статора (якоря). Размагничивающее действие поля статора особенно сильно при пуске двигателя, т.к. при этом противоЭДС равна 0, а ток - наибольший. С этим необходимо считаться при выборе постоянных магнитов, стабилизация которых происходит в режиме короткого замыкания.

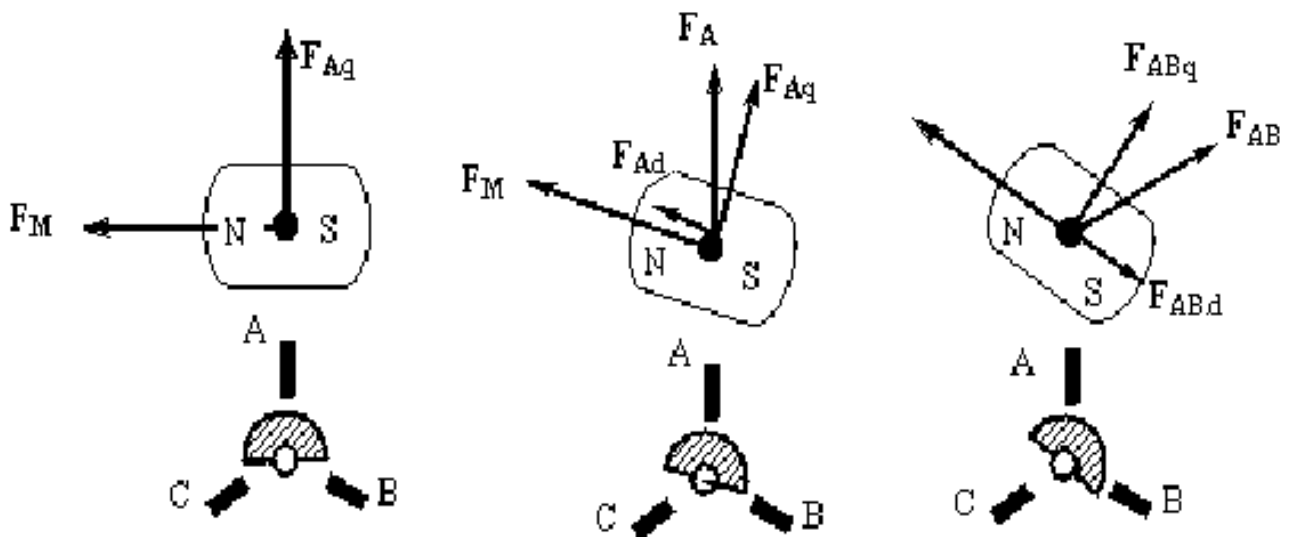


Рис. 3.18. Модель, поясняющая реакцию якоря в бесконтактном двигателе постоянного тока

3. Пульсация токов в обмотках статора и суммарного тока двигателя объясняется дискретным питанием обмоток (в тот момент, когда открыты два транзистора, потребляемый ток вырастает в два раза по сравнению с режимом, когда открыт только один транзистор).

4. Влияние индуктивности обмоток статора. В обычном двигателе секции якоря маловитковые, поскольку общее число витков якоря делится на

большое число секций. Индуктивность таких секций сравнительно небольшая. В бесконтактном двигателе общее число витков якоря разбивается на 3-4 обмотки (секции). В результате секции получаются многовитковыми, а, следовательно, обладающими большой индуктивностью т.к. $L \sim W^2$

При больших скоростях, когда время коммутации невелико, ток в обмотках не успевает достигать установившегося значения. Его эффективное значение становится меньше, чем при $L = 0$

Вращающий момент прямо пропорционален току якоря, и имеет две составляющие. Первую - не зависящую от времени. Она равна моменту при отсутствии индуктивности. Вторую - переменную. Она появляется из-за индуктивности обмоток. Эта составляющая при всех скоростях имеет отрицательное значение ($U > E$). Поэтому можно утверждать, что, как и ток, вращающий момент бесконтактного двигателя меньше, чем вращающий момент обычного коллекторного двигателя.

Механические характеристики бесконтактного двигателя при разных индуктивностях обмоток статора показаны L на рис. 3.19. Видно, что с увеличением L нелинейность характеристик увеличивается.

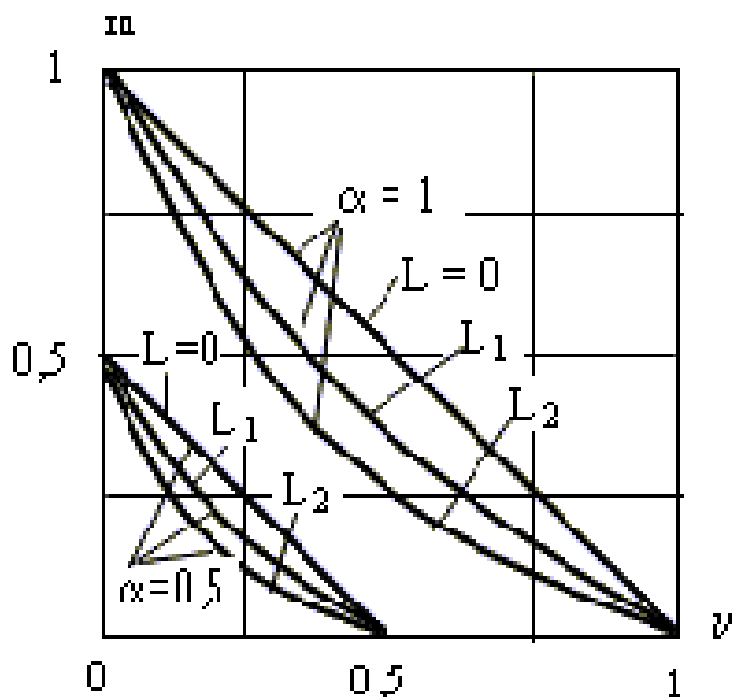


Рис. 3.19. Механические характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока при разных значения $\beta = U/U_{\text{НОМ}}$ и L : $L_2 > L_1 > 0$

Частоту вращения бесконтактных двигателей можно регулировать в широких пределах путем изменения напряжения питания.

Однако на практике чаще применяется импульсный способ, сущность которого заключается в изменении не величины постоянно подводимого напряжения, а длительности питания двигателя номинальным напряжением.

3.3. Способы и схемы управления электрическими двигателями постоянного тока

Управление двигателем постоянного тока сводится к подаче на него требуемого напряжения заданной полярности, так как величина напряжения задает скорость, а полярность направление вращения.

От схемы управления поступает команда F (Forward - вперед) и R (Reverse - назад). При подаче этих команд изменяется полярность напряжения, прикладываемая к двигателю.

В связи с развитием полупроводниковой техники все шире применяется импульсное управление исполнительным двигателем. Суть его заключается в том, что частоту вращения двигателя регулируют не величиной постоянно подводимого напряжения, а длительностью питания двигателя номинальным напряжением.

Одна из возможных схем импульсного управления приведена на рис. 3.20а. Там же (рис. 3.20б) показаны графики скорости при различных t .

В период, когда электронный ключ открыт, питающее напряжение полностью подается на двигатель, ток якоря увеличивается, двигатель развивает положительный момент и частота вращения возрастает; когда электронный ключ закрыт, ток под действием запаса электромагнитной энергии продолжает протекать в том же направлении, но через обратный диод. При этом он уменьшается, момент двигателя уменьшается, угловая скорость вращения падает.

Работа двигателя состоит из чередующихся периодов разгона и торможения. И, если эти периоды малы по сравнению с электромагнитной постоянной времени якорной цепи $T_{эм.а}$, устанавливается некая средняя скорость, однозначно определяемая относительной продолжи-

тельностью включения (скважностью) $t = t_{и}/T$, где $t_{и}$ - длительность импульса напряжения; T - период.

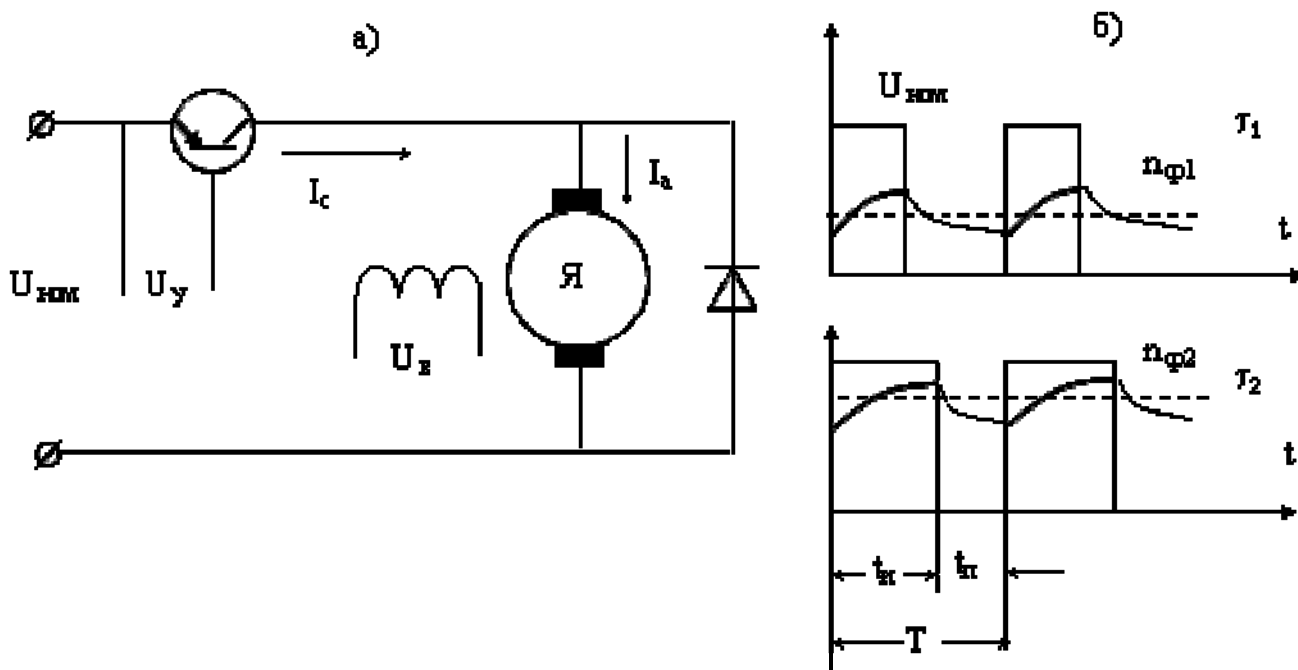


Рис. 3.20. Схема импульсного управления (а), графики скорости вращения (б) при разных t ($t_2 > t_1$)

Частота управляющих импульсов составляет 200-400 Гц, в результате период $T \ll T_{эм.а}$ управления T оказывается на 2 порядка меньше электромагнитной постоянной времени обмотки якоря

Управление, при котором изменяется соотношение длительности импульса $t_{и}$ и паузы $t_{п}$ при постоянном периоде T , называется широтно-импульсным.

Если параметры схемы подобраны таким образом, что колебания тока, момента и угловой скорости вращения небольшие, работа двигателя практически не отличается от работы при постоянном напряжении, за которое можно принять среднее напряжение за период управления T :

$$U_{ср} = U_{ном} t_{и}/T = t U_{ном}, \quad v_{ср} = \tau m_{ср}.$$

На рис. 3.21а показаны графики тока сети (I_c) и тока якоря (I_a) при относительно больших нагрузках. При малых нагрузках ток двигателя становится небольшим и появляются периоды, когда при закрытом электронном ключе ток якоря уменьшается до нуля. Говорят, наступил ре-

жим прерывистых токов (рис. 3.21б). Механические характеристики приобретают перелом и становятся похожими на характеристики двигателя при регулировании реостатом в цепи якоря.

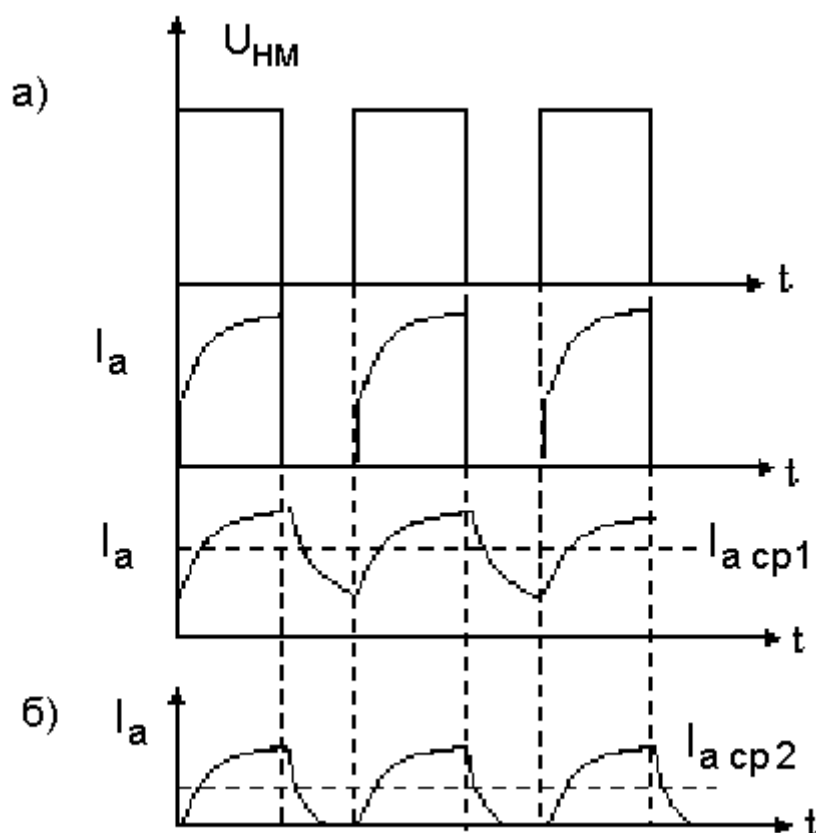


Рис. 3.21. Графики тока сети I_c и тока якоря I_a при больших нагрузках (а) и тока якоря при малых нагрузках (б)

Критическая относительная частота вращения, при которой наступает перелом, равна $v_{кр} = (e^{\tau\beta} - 1)/(e^{\beta} - 1)$, где: $b = T/T_{эм}$; $T = t_{и} + t_{п}$; $T_{эм} = L_a/R_a$.

Основное преимущество импульсного управления заключается в уменьшении средней потребляемой мощности за счет уменьшения среднего тока.

Контрольные вопросы

1. Приведите и поясните изображение полной схемы машины постоянного тока с кольцевым якорем.

2. Что такое ЭДС самоиндукции? Как ее компенсируют в коллекторной машине постоянного тока?
3. Приведите и поясните изображение полной схемы коллекторного электрического двигателя постоянного тока
4. В чем преимущества и недостатки "беспазового" исполнения обмотки якоря?
5. Какие могут быть использованы способы соединения обмоток якоря и возбуждения?
6. Что такое электродвигатель с параллельным возбуждением?
7. Что такое электродвигатель с последовательным возбуждением?
8. Что такое электродвигатель постоянного тока со смешанным возбуждением?
9. Поясните понятие: электромеханическая характеристика (регулирующая характеристика).
10. Приведите и поясните график электромеханической (регулирующей) характеристики двигателя постоянного тока с независимым возмущением
11. Приведите и поясните график механической характеристики двигателя постоянного тока с независимым возмущением
12. Назовите особенности механических характеристик двигателей с последовательным и параллельным возбуждением.
13. Какие устройства называют универсальными коллекторными двигателями?
14. Приведите и поясните способы соединения обмоток в универсальном коллекторном двигателе
15. Назовите основные недостатки универсальных коллекторных двигателей.
16. Приведите и поясните структурную схему бесконтактного двигателя постоянного тока
17. Поясните упрощенную принципиальную схему бесконтактного двигателя постоянного тока
18. Приведите и поясните механические характеристики бесконтактного двигателя постоянного тока.
19. В чем суть импульсного управления исполнительным двигателем?
20. В чем заключается основное преимущество импульсного управления?
21. Охарактеризуйте понятие: электропривод.

22. Как осуществляется параметрическое регулирование электропривода?
23. Какие электроприводы называют вентильными и почему?
24. Кратко охарактеризуйте понятие: широтно - импульсный преобразователь.
25. Какая идея управления находит применение при построении сложных (двухполупериодных, трехфазных, мостовых) выпрямителей с системами импульсно – фазового управления?
26. Что такое противоЭДС? Когда и при каких условиях она возникает?

4. АСИНХРОННЫЕ И СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

В предыдущем разделе мы рассмотрели электродвигатели, подключаемые к источникам постоянного напряжения. Теперь мы будем рассматривать электрические машины которые подключаются к сетям переменного напряжения.

Сначала будут изучены асинхронные двигатели, которые отличаются простотой конструкции, относительно малой стоимостью, надежностью в работе. По этой причине они являются самым распространенным видом электродвигателей. Асинхронные двигатели составляют около 90% от всего парка электродвигателей. Основная область их применения – электропривод механизмов, какие не требуют плавного регулирования скорости (вентиляторы, компрессоры, различные транспортеры и т.п).

Далее мы рассмотрим синхронные двигатели. Они находят применение, в первую очередь, в устройствах, где требуется стабильная скорость вращения.

Наконец мы изучим шаговые двигатели, позволяющие преобразовывать серии управляющих импульсов в фиксированный угол поворота вала. Шаговые двигатели уже давно и успешно применяются в самых разнообразных устройствах. Их можно встретить в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а также в разнообразном промышленном и специальном оборудовании.

4.1. Асинхронные электрические машины

4.1.1. Устройство и принцип действия асинхронного электрического двигателя

Действие асинхронного двигателя основано на использовании вращающегося магнитного поля. В простейшем случае такое поле может быть получено путем вращения подковообразного магнита (рис. 4.1).

При вращении магнита поле будет непрерывно поворачиваться и индуцировать в цилиндре, находящемся между полюсами, электродвижущую силу (ЭДС) и, следовательно, вихревые токи. Взаимодействие

этих токов с вращающимся полем вызовет появление электромагнитных сил, которые приведут цилиндр во вращение в соответствии с законом Ленца. Цилиндр будет вращаться в сторону вращения поля, но с меньшей скоростью, поскольку если допустить, что он достигнет скорости вращения поля, то вихревые токи в нем исчезнут, исчезнет и вращающийся момент.

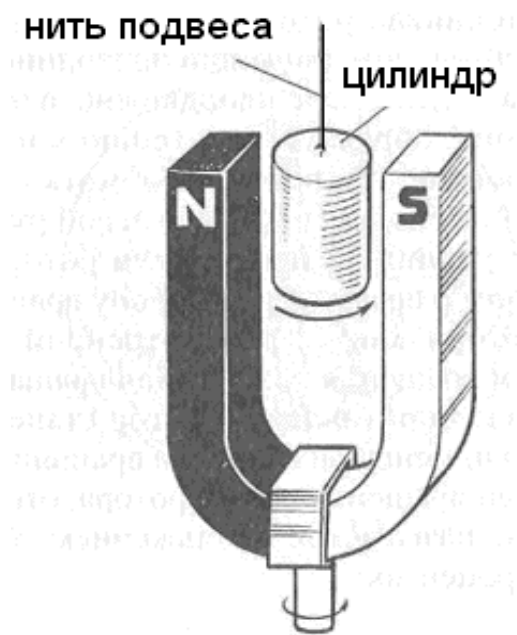


Рис. 4 .1. Упрощенный способ получения вращающегося магнитного поля

В действительности в асинхронных двигателях магнитное поле создается системой, состоящей из трех неподвижных катушек, плоскости которых повернуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° и которые питаются токами, у которых начальные фазы отличаются на 120° (рис. 4.2)

Пояснение идеи создания вращающегося магнитного поля начнем с анализа магнитного поля катушки с синусоидальным током. При пропускании по обмотке катушки синусоидального тока она создает магнитное поле, вектор индукции которого изменяется (пульсирует) вдоль этой катушки также по синусоидальному закону. Мгновенная ориентация вектора магнитной индукции в пространстве зависит от намотки катушки и мгновенного направления тока в ней и определяется по правилу правого буравчика. Так для случая, показанного на рис.4.3, вектор

магнитной индукции направлен по оси катушки вверх. Через полпериода, при том же модуле ток изменит свой знак на противоположный. Соответственно, вектор магнитной индукции при той же абсолютной величине поменяет свою ориентацию в пространстве на 180° . С учетом вышесказанного магнитное поле катушки с синусоидальным током называют пульсирующим.

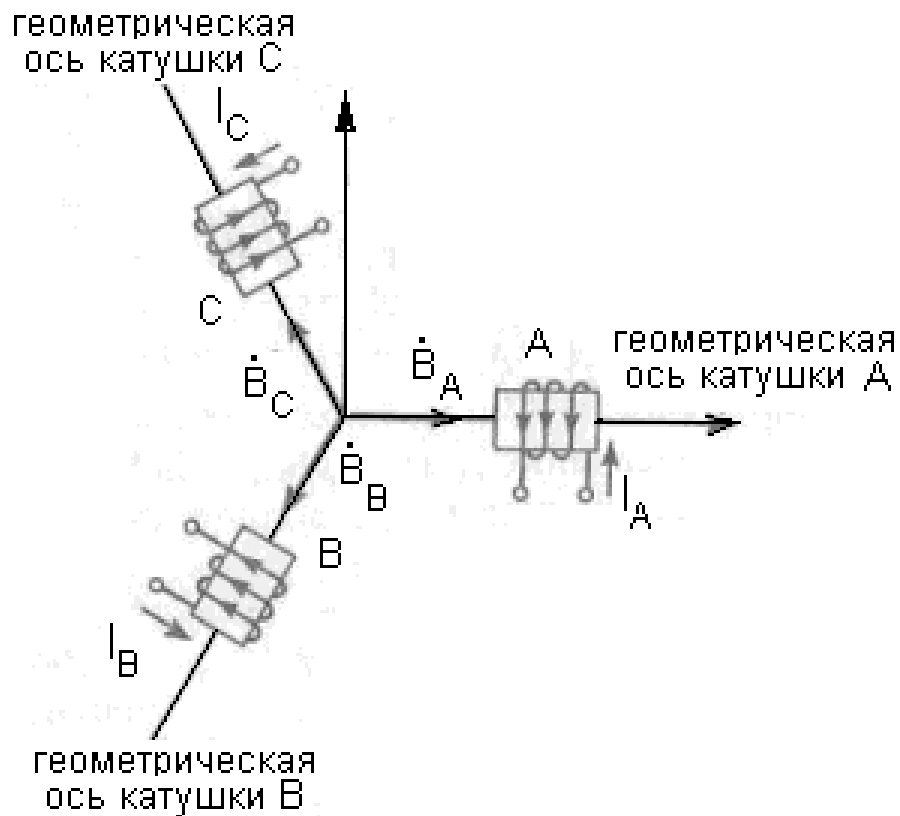


Рис. 4.2. Способ получения вращающегося магнитного поля с помощью трех катушек

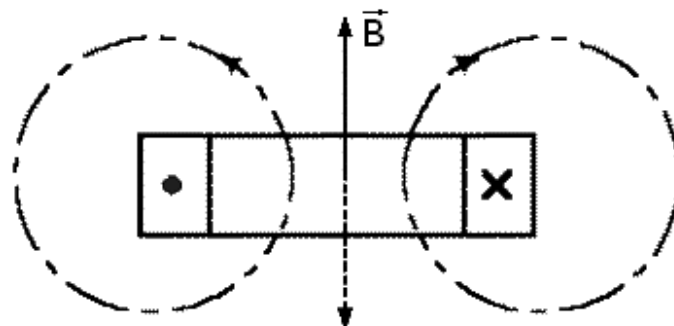


Рис. 4.3. Способ получения пульсирующего магнитного поля с помощью катушек с током

Круговым вращающимся магнитным полем называется поле, вектор магнитной индукции которого, не изменяясь по модулю, вращается в пространстве с постоянной угловой частотой.

Для создания кругового вращающегося поля необходимо выполнение двух условий:

1. Оси катушек должны быть сдвинуты в пространстве друг относительно друга на определенный угол (для трехфазной – на 120°).

2. Токи, питающие катушки, должны быть сдвинуты по фазе соответственно пространственному смещению катушек.

Покажем, что симметричная трехфазная система катушек (рис. 4.4) позволяет получить круговое вращающееся магнитное поле.

Каждая из катушек А, В и С при пропускании по ним гармонических токов создает пульсирующее магнитное поле. Векторная диаграмма в пространстве для этих полей представлена на рис. 4.4.

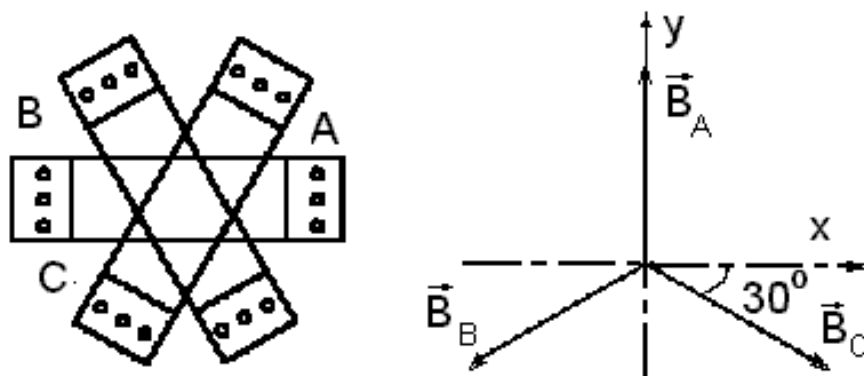


Рис. 4.4. Три катушки и векторная диаграмма в пространстве для магнитных полей

Для проекций результирующего вектора магнитной индукции на оси декартовой системы координат, ось у у которой совмещена с магнитной осью фазы А, можно записать:

$$B_x = B_C \cos 30^\circ - B_B \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(B_C - B_B), \quad (4.1)$$

$$B_y = B_A - B_B \sin 30^\circ - B_C \sin 30^\circ = B_A - \frac{1}{2}(B_B + B_C). \quad (4.2)$$

Приведенные соотношения учитывают пространственное расположение катушек, а также то, что они также питаются трехфазной системой токов с временным сдвигом по фазе на 120° .

Для мгновенных значений индукций катушек имеют место соотношения:

$$B_A = B_m \sin \omega t, \quad B_B = B_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad B_C = B_m \sin(\omega t + 120^\circ). \quad (4.3)$$

Подставив эти выражения в (4.1) и (4.2), получим:

$$B_x = \frac{3}{2} B_m \cos \omega t, \quad (4.4)$$

$$B_y = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t, \quad (4.5)$$

В соответствии с (4.4) и (4.5) и рис. 4.4 для модуля вектора магнитной индукции результирующего поля трех катушек с током можно записать:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m = \text{const}, \quad (4.6)$$

а сам вектор \vec{B} составляет с осью x угол α , для которого:

$$\text{tga} = \frac{B_y}{B_x} = \text{tg} \omega t, \quad (4.7)$$

откуда $\alpha = \omega t$.

Исходя из сказанного, несложно представить основные элементы асинхронного двигателя статор и ротор.

Статор - неподвижная часть двигателя, внутри которого расположены обмотки, смещенные в пространстве на угол 120° (рис. 4.5).

Обычно статор имеет литой чугунный корпус, внутри которого запрессован полый стальной цилиндрический сердечник. Для ослабления вихревых токов (уменьшения потерь в двигателе) сердечник набирают из листов электротехнической стали толщиной 0.5 мм.

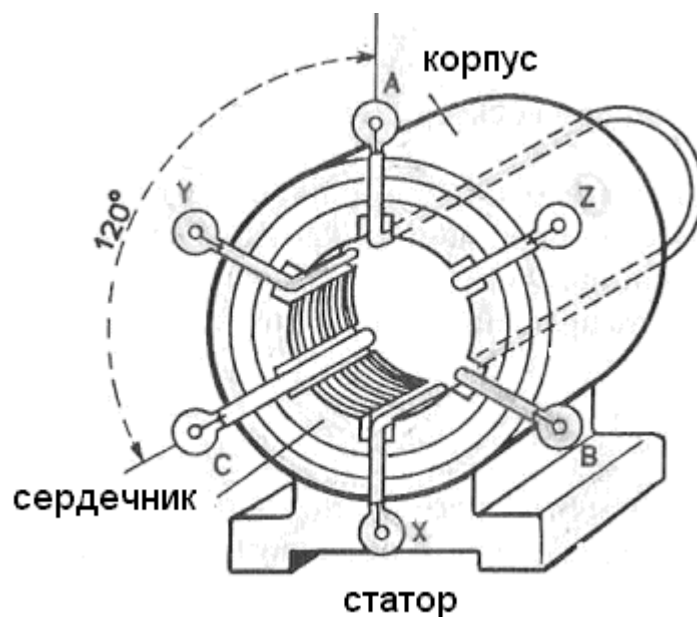


Рис. 4.5. Упрощенное изображение статора асинхронного двигателя

На внутренней поверхности сердечника статора имеются пазы. В них укладываются провода обмоток статора. На рисунке эти обмотки для простоты изображены в виде трех одновитковых катушек, плоскости которых смещены в пространстве на угол 120° относительно друг друга. Начала каждой фазы обмотки (катушки) обозначают соответственно буквами А, В, С, а концы – Х, Y, Z. Начала и концы обмоток статора маркируются буквой с соответствующим индексом С1, С2, С3, С4, С5, С6.

Ротор асинхронного двигателя состоит из цилиндрического сердечника, также набранного из отдельных стальных пластин, надетых на вал электродвигателя (рис. 4.6)

На внешней поверхности сердечника имеются пазы. В пазы укладываются стержни, которые на концах соединяются с кольцами. Стержни, совместно с торцевыми кольцами, образуют короткозамкнутую обмотку ротора (типа «беличья клетка»). По этой причине двигатель с таким ротором называют короткозамкнутым асинхронным двигателем. Часто стержни обмотки вместе с замыкающими кольцами изготавливают путем заливки пазов ротора расплавленным алюминием.

В короткозамкнутой обмотке ротора под действием ЭДС, вызываемой вращающимся полем статора, возникают вихревые токи. Взаимодействуя с полем, они вовлекают ротор во вращение со скоростью ω ,

принципиально меньшей скорости вращения поля ω_0 . Отсюда название двигателя - асинхронный.

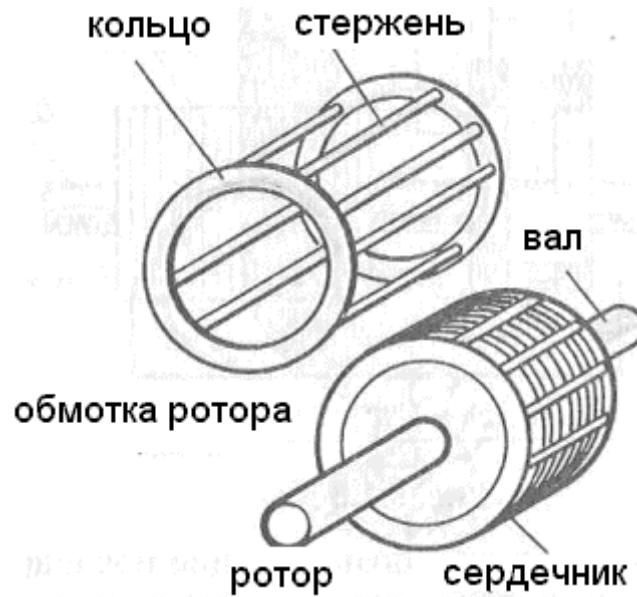


Рис. 4.6. Упрощенное изображение ротора асинхронного двигателя

На рис. 4.7. показано упрощенное изображение асинхронного электродвигателя со стороны торца, со статором из трех катушек, и указано направление вращения магнитного поля статора.

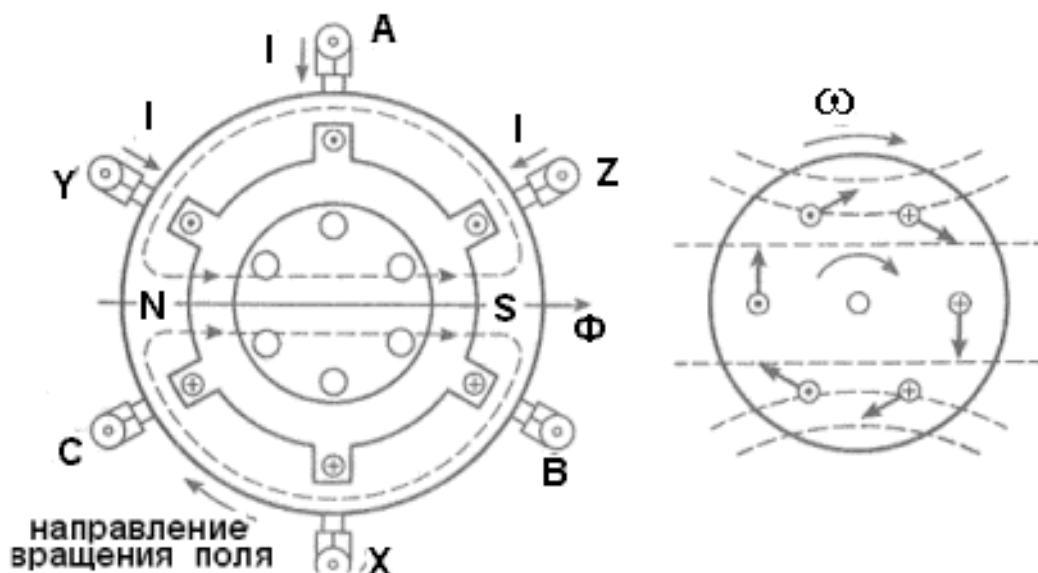


Рис. 4.7. Упрощенное изображение асинхронного электродвигателя и направление вращения магнитного поля статора

На статоре расположены три одинаковые обмотки, магнитные оси которых сдвинуты по расточке магнитопровода на $2/3$ полюсного деления, величина которого определяется выражением $\tau = \pi R / p$, где R - радиус расточки магнитопровода, а p - число пар полюсов (число эквивалентных вращающихся постоянных магнитов, создающих магнитное поле, - в представленном на рис. 4.7 случае $p=1$).

Неравенство скоростей магнитного поля и ротора очевидно. При $\omega = \omega_0$ вращающееся магнитное поле не будет пересекать токопроводящих стержней ротора и, следовательно, в них не будут наводиться токи, участвующие в создании вращающегося момента.

С двух сторон к статору крепятся подшипниковые шиты, посредством которых закрепляется вал двигателя. Вал ротора устанавливают в подшипниках. Подшипники крепятся в боковых щитах двигателя.

4.1.2. Основные характеристики и параметры асинхронных двигателей

Рассмотрим, как меняется магнитное поле статора электродвигателя, подключенного к силовой трехфазной сети.

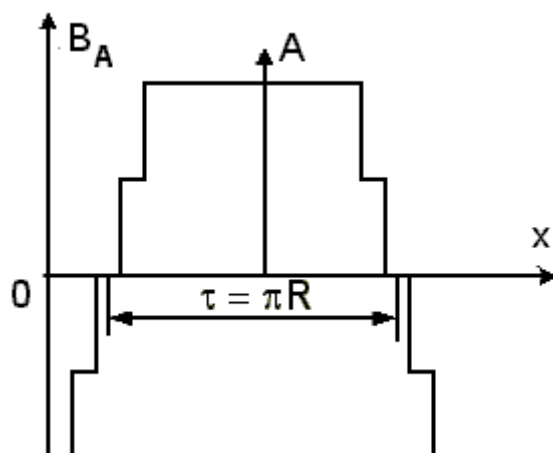


Рис. 4.8. График изменения магнитной индукции в воздушном зазоре электродвигателя, создаваемой обмоткой фазы А, для некоторого момента времени t

Приняв магнитную проницаемость стали бесконечно большой, можно построить кривую распределения магнитной индукции в воздушном зазоре электродвигателя, создаваемой обмоткой фазы А, для некоторого момента времени t (рис. 4.8). При построении учтено, что кривая изменяется скачком в местах расположения катушечных сторон, а на участках, лишенных тока, имеют место горизонтальные участки.

Данную дискретную кривую можно заменить синусоидой (следует указать, что у реальных машин за счет соответствующего исполнения фазных обмоток для результирующего поля такая замена связана с весьма малыми погрешностями). Приняв амплитуду этой синусоиды для выбранного момента времени t равной B_A , запишем:

$$B_{Ax} = B_A \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right), \quad (4.8)$$

и аналогично:

$$B_{Bx} = B_B \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4.9)$$

$$B_{Cx} = B_C \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (4.10)$$

С учетом гармонически изменяющихся фазных токов для мгновенных значений этих величин при сделанном ранее допущении о линейности зависимости индукции от тока можно записать:

$$B_A = B_m \sin \omega t, \quad B_B = B_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad B_C = B_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Подставив последние соотношения в (4.8) – (4.10) после несложных преобразований получим для результирующего поля вдоль воздушного зазора машины выражение, представляющее собой уравнение бегущей волны:

$$B_x = B_{Ax} + B_{Bx} + B_{Cx} = \frac{3}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t\right). \quad (4.11)$$

Магнитная индукция B_x постоянна, если $\frac{\pi}{\tau} x - \omega t = \text{const}$.

Таким образом, если мысленно выбрать в воздушном зазоре некоторую точку и перемещать ее вдоль расточки магнитопровода со скоростью $V = \frac{\omega \tau}{\pi} = 2\pi\omega\tau$, то магнитная индукция для этой точки будет оставаться неизменной. Это означает, что с течением времени кривая распределения магнитной индукции, не меняя своей формы, перемещается вдоль окружности статора.

Результирующее магнитное поле вращается с постоянной скоростью. Скорость вращения магнитного поля принято определять в оборотах в минуту:

$$n_0 = \frac{2f\tau}{2p\tau} 60 = 60 \frac{f}{p}. \quad (4.12)$$

Так как частота электрической сети 50 Гц, то все асинхронные электрические двигатели имеют стандартную шкалу угловых скоростей (табл. 4.1)

Таблица 4.1

Стандартная шкала угловых скоростей асинхронные двигателей

Число пар полюсов, p	1	2	3	4	5
Угловая скорость поля, 1/с	314	157	104,7	78,5	62,83
Частота вращения поля, об/мин	3000	1500	1000	750	600

Индукцированный в роторной обмотке ток создает свое магнитное поле с числом полюсов, равным числу полюсов статора. Поле ротора вращается. Скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля, из – за чего в роторной обмотке возникает переменная

ЭДС, частота которой пропорциональна относительной скорости вращения ротора:

$$n = sn_{01} = 60 \frac{fs}{p}, \quad (4.13)$$

Величина $S = \frac{\omega_o - \omega}{\omega_o}$ называется относительным скольжением.

Для двигателей нормального исполнения $S = 0,02 \dots 0,05$. Поэтому можно утверждать, что поля ротора и статора вращаются с почти одинаковой скоростью и номинальная частота вращения ротора близка до частоты вращения магнитного поля.

Величина тока ротора зависит от механической нагрузки на валу двигателя. С увеличением нагрузки (момента сил сопротивления) скорость вращения ротора замедляется, а скольжение увеличивается.

Вращающий момент, развиваемый ротором асинхронного двигателя, следует рассматривать как сумму моментов электромагнитных сил, действующих на каждый проводник роторной обмотки. Можно показать, что электромагнитный момент трехфазного асинхронного двигателя определяется приближенным выражением:

$$M = \frac{kU_{1\phi}^2 s R_2}{\omega_0 [R_2^2 + (sX_2)^2]}, \quad (4.14)$$

где k - константа, зависящая от параметров двигателя.

R_2 - величина активного сопротивления ротора

sX_2 - величина индуктивного сопротивления ротора

Это выражение свидетельствует о следующем:

А. Электромагнитный момент, развиваемый на валу электродвигателем, зависит от скольжения сложным образом (рис. 4.10). При малых значениях скольжения вращающий момент ротора пропорционален скольжению и растет при увеличении s , достигая максимума. Далее, при значительных величинах скольжения этот момент уменьшается, достигая при $s=1$ величины, равной пусковому моменту.

Соответственно, это означает, что в момент пуска асинхронного двигателя, когда $s=1$, пусковой момент не является максимальным. К тому же следует учесть, что в момент включения двигателя напряжение

в сети может уменьшаться на 20 %, и, следовательно, пусковой момент может составлять только 64 % от пускового момента при номинальной нагрузке.

Б. Асинхронный двигатель при определенной величине скольжения развивает максимальный вращающий момент (рис. 4.9). Скольжение, при котором вращающий момент достигает максимального значения, называется критическим. Находя производную от момента по скольжению и приравнивая ее нулю (максимум функции) можно определить критическое скольжение $s_{кр} = R_2/X_2$. Обычно $s_{кр} = 0,2$.

Подставляя критическое скольжение в выражение для для момента, можно получить выражение для максимального момента ротора:

$$M_{MAX} = \frac{k U_{1\Phi}^2}{\omega_0 2 X_2} . \quad (4.15)$$

Это выражение свидетельствует о том, что максимальный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения и не зависит от активного сопротивления цепи ротора.

Максимальный вращающий момент M_{MAX} обычно у двигателей с короткозамкнутым ротором превосходит номинальный в 2...2,5 раза.

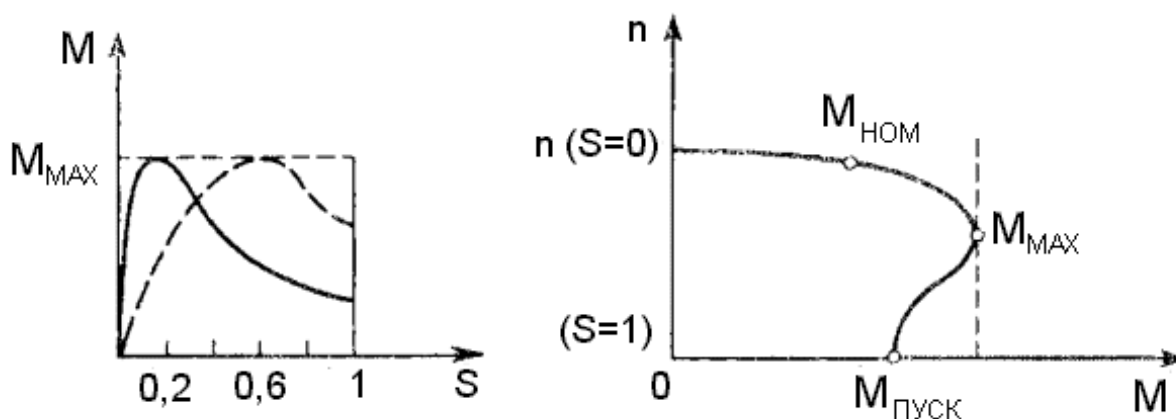


Рис. 4.9. График зависимости момента от скольжения и механическая характеристика двигателя.

Механическая характеристика, представляющая зависимость числа оборотов от момента на валу двигателя (рис. 4.9), состоит из двух

участков. На две части эту характеристику делит точка максимального момента.

В верхней части характеристики, которую называют устойчивой, при увеличении нагрузки (противодействующего момента внешних сил) растет и вращающий момент и скорость вращения вала меняется незначительно. Двигатель проявляет «жесткость» характеристики.

В нижней, неустойчивой части характеристики увеличение нагрузки вызывает резкое уменьшение вращающего момента и числа оборотов. В конце концов двигатель может остановиться.

Обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (типа «беличья клетка») обладает малым пусковым моментом. По этой причине промышленностью выпускаются асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми свойствами. Эти двигатели отличаются от двигателей нормального исполнения устройством короткозамкнутой обмотки ротора (рис. 4.10). Обычно обмотка ротора состоит из двух короткозамкнутых обмоток разного диаметра (типа двойная «беличья клетка»). Внутренняя обмотка 2 ротора с двойной «беличьей клеткой» - медная и имеет меньшее активное сопротивление, чем внешняя латунная. К тому же внешняя обмотка имеет и меньшее число стержней.

В момент пуска двигателя величина тока в обмотках определяется величиной их индуктивных сопротивлений и поэтому величина тока во внешней обмотке будет значительно больше, чем во внутренней. Повышенное активное сопротивление внешней обмотки обеспечивает значительный пусковой момент при пониженной величине пускового тока. По мере увеличения частоты вращения ротора уменьшается скольжение и индуктивное сопротивление внутренней обмотки. Когда скольжение достигнет номинального значения. Индуктивные сопротивления становятся незначительными и ими можно пренебречь. При номинальной нагрузке ток во внутренней обмотке значительно больше, чем во внешней и создает главный вращающий момент, поэтому ее часто называют рабочей обмоткой.

Асинхронный двигатель для сети является активно – индуктивной нагрузкой. Поэтому ток этого двигателя всегда отстает по фазе от напряжения сети и коэффициент мощности двигателя меньше единицы. Реактивная составляющая полного тока двигателя (реактивный ток) загружают генераторы электрических станций и электрические сети, снижая их КПД. Коэффициент мощности асинхронных двигателей снижает-

ся с уменьшением нагрузки и имеет наименьшее значение при работе двигателя на холостом ходу. Зависимость $\cos \varphi$ от нагрузки на двигатель можно объяснить на основе энергетических представлений о работе двигателя. Электрическая энергия, потребляемая двигателем из сети, преобразуется, с одной стороны, в энергию магнитного поля, а с другой — во внутреннюю энергию проводников обмоток и сердечников (они нагреваются) и расходуется на совершение механической работы.

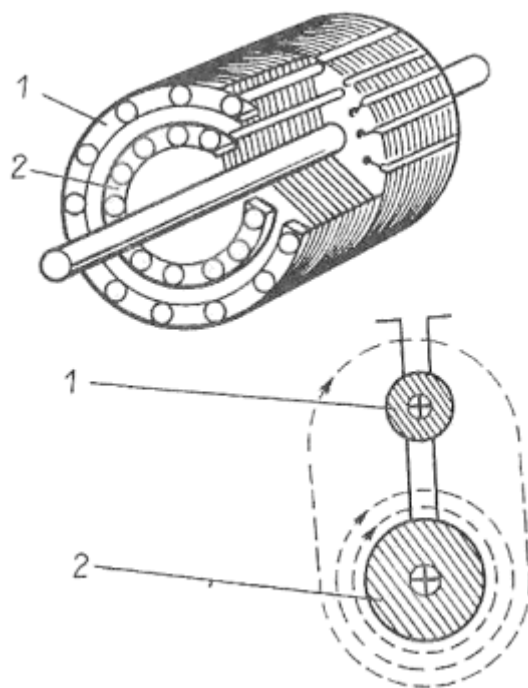


Рис. 4.10. Упрощенное изображение ротора асинхронного двигателя с улучшенными пусковыми свойствами

Первый процесс обратим: электрическая энергия дважды за период обращается в энергию магнитного поля, и энергия магнитного поля преобразуется в электрическую энергию. Этот процесс характеризуется реактивной мощностью Q или реактивным током I_p . Реактивный ток является намагничивающим током, поддерживающим переменное магнитное поле в каждой фазе двигателя. Второй процесс необратим: электрическая энергия, пошедшая на нагревание проводников, сердечников и израсходованная на совершение работы, для электрической цепи является безвозвратно потерянной. Этот процесс характеризуется активной мощностью P или активным током I . Вполне очевидно, что активная мощность пропорциональна нагрузке.

Рассмотрим теперь вопросы, касающиеся пуска асинхронного двигателя.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором сравнительно небольшой мощности можно пускать в ход прямым подключением обмотки статора к сети переменного тока. При этом наблюдаются два отрицательных явления:

1) при пуске возникает большой пусковой ток I , который превосходит номинальный ток в 5...7 раз;

2) в момент пуска двигатель развивает относительно малый пусковой момент M_n , который превышает номинальный момент M_n только в 1,2... 1,6 раза.

Появление большого тока при пуске двигателя объясняется тем, что в начальный момент пуска ротор двигателя неподвижен ($s = 1$), а поле сразу достигает номинальной скорости вращения. Поэтому скорость пересечения проводников ротора линиями магнитной индукции вращающегося магнитного поля наибольшая, и в них наводится максимальная ЭДС. Возникает большой ток I_2 в роторе. По мере увеличения скорости вращения ротора скольжение уменьшается, уменьшается и наводимая в нем ЭДС, что приводит к уменьшению тока в роторе. При наличии электромагнитной связи между обмотками ротора и статора появление большого тока в роторе вызывает большой ток и в статорной обмотке двигателя $I = I_0 + I_2$. Пусковой ток превышает номинальный ток двигателя в 5...7 раз. В момент пуска двигателя возрастает не только ЭДС ротора, но и его индуктивное сопротивление ($X_{2s} = X_2s$), однако увеличение полного сопротивления ротора Z^\wedge происходит медленнее, чем увеличение ЭДС.

Возникновение большого тока при пуске не представляет опасности для обмоток двигателя, так как время пуска занимает доли секунд или секунды. За это время в обмотках не может выделиться такое количество тепла, которое могло бы их нагреть до температуры, опасной для целостности изоляции. Но появление большого пускового тока вредно отражается на работе параллельно подключенных потребителей энергии, так как вызывает уменьшение напряжения на их зажимах в связи с увеличением падения напряжения в линии подводящих проводов. Это явление наблюдается в домашних условиях при включении двигателя холодильника или стиральной машины. В момент включения наблюдается уменьшение накала ламп или ухудшение изображения телевизора.

Падение напряжения в линии подводящих проводов зависит от сечений проводов, т.е. в конечном счете от мощности линии. Мощные линии имеют большие сечения проводов и относительно малое сопротивление. Непосредственное включение маломощных двигателей в мощные линии практически не влияет на работу других потребителей электрической энергии.

Чем меньше мощность линии, тем меньше должна быть и мощность двигателей, подлежащих непосредственному пуску. Поэтому нельзя точно указать предельное значение мощности двигателя, подлежащего непосредственному пуску.

Снижение пускового тока короткозамкнутого асинхронного двигателя осуществляют методом уменьшения напряжения на его зажимах. С этой целью последовательно с каждой фазой статорной обмотки на период пуска включают активное или реактивное сопротивление (рис. 4.11). Для двигателей, нормально работающих при соединении фаз статора треугольником, снижение напряжения на каждой фазе статора можно получить в результате предварительного соединения фаз звездой.

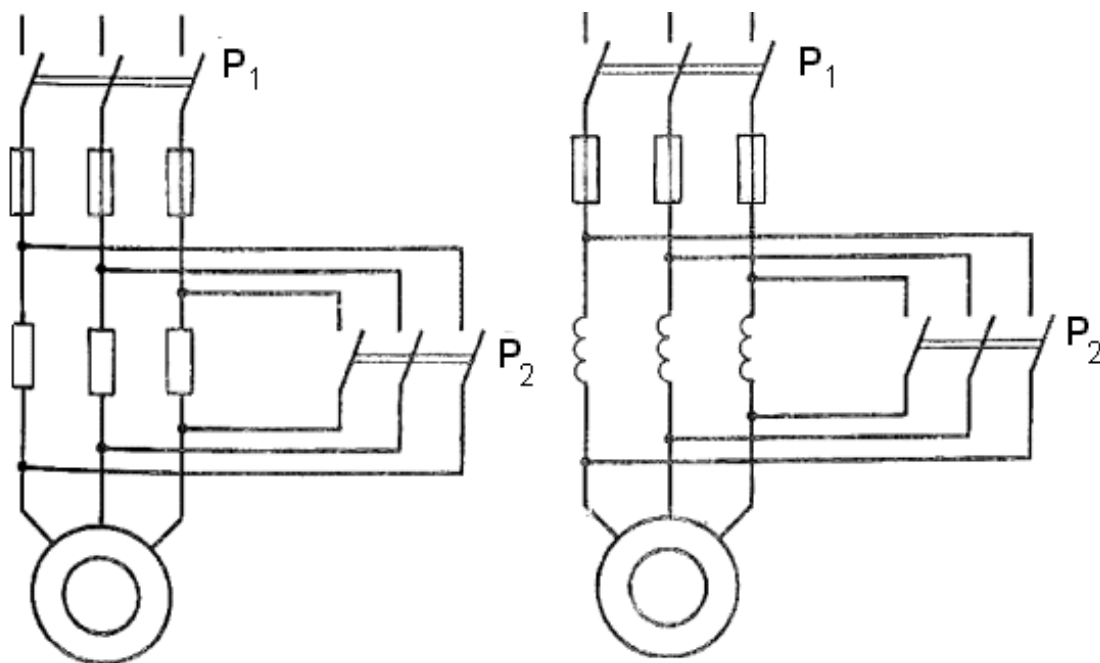


Рис. 4.11. Схемы для проведения пуска асинхронных двигателей

Ротор асинхронного двигателя всегда вращается в сторону вращения поля. Поэтому для изменения направления вращения ротора (реверсирования двигателя) необходимо изменить направление вращения

поля. А для этого надо изменить порядок чередования фаз на зажимах двигателя. Это осуществляют путем перемены мест включения двух любых проводов линии на зажимах статорной обмотки двигателя.

Для пуска асинхронных двигателей широко используются магнитные пускатели (рис. 4.12). Схема на магнитном пускателе обеспечивает дистанционный пуск, реверсирование и остановку двигателя.

Магнитный пускатель состоит из двух контакторов переменного тока КМ1 и КМ2 и тепловых реле КК. Для пуска электродвигателя оператор нажимает кнопку SB1 (либо SB2). Катушка реле КМ1 (либо КМ2) получает питание, контактор срабатывает, включая контакты в цепи статора и блокирует пусковую кнопку. Двигатель разгоняется. При перегрузке (если ток статора большой длительное время) срабатывают тепловые реле КК, отключая своими контактами цепи питания катушек.

Для остановки двигателя оператор нажимает кнопку SB3.

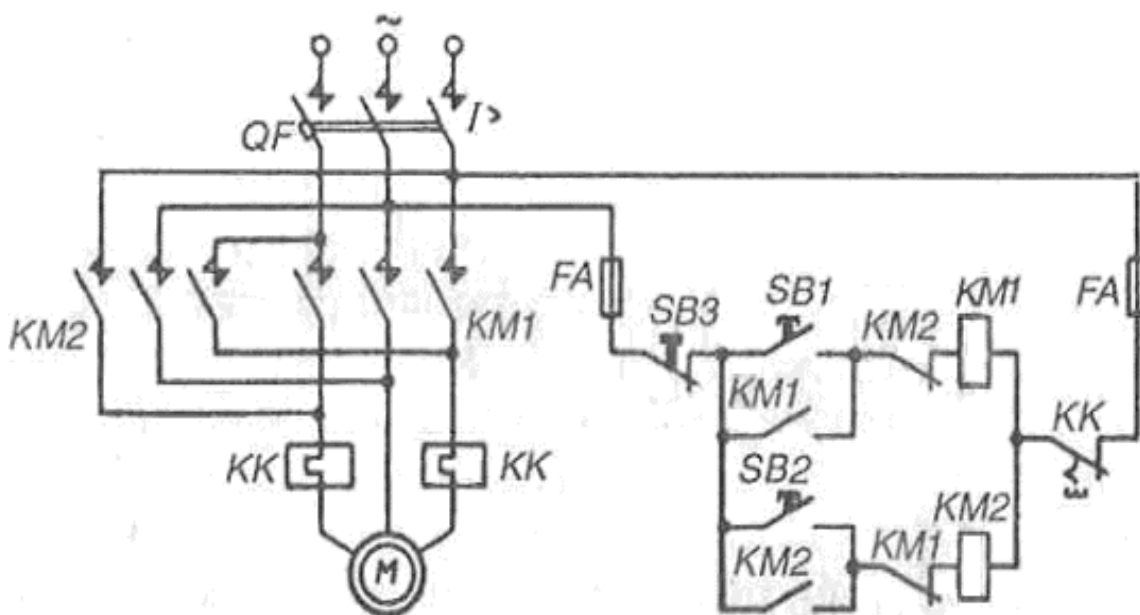


Рис. 4.12. Схемы для проведения пуска асинхронных двигателей с помощью магнитных пускателей

На практике часто возникает необходимость включения трехфазного двигателя в однофазную цепь переменного напряжения. Для этой цели обычно две фазы двигателя соединяют последовательно, создавая рабочую обмотку, а третью обмотку используют в качестве пусковой (рис. 4.13).

В практике часто возникает необходимость за неимением однофазного двигателя включать трехфазный двигатель в однофазную сеть. Можно рекомендовать следующие схемы, которые решают данную задачу (рис. 4.13)

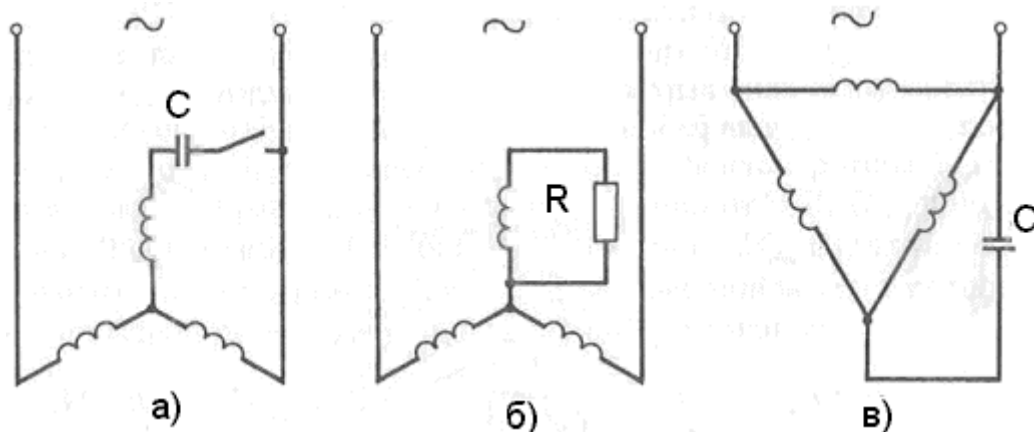


Рис. 4.13. Способы и схемы включения трехфазного двигателя в однофазную цепь переменного напряжения

4.1.3. Разновидности асинхронных двигателей

У асинхронного двигателя в пазы ротора могут укладываться изолированный медный провод, образующий, также как на статоре, трехфазную обмотку. Такой двигатель называется асинхронным двигателем с фазным ротором (рис. 4.14). Концы фаз роторной обмотки соединяют в общую точку, а начала подводят к трем кольцам изолированно установленным на валу двигателя. На кольца накладывают щетки, позволяющие последовательно с фазами обмотки включать дополнительные активные сопротивления. Щетки соединяют с зажимами, укрепленными на корпусе двигателя. Вал ротора устанавливают в подшипниках. Подшипники крепятся в боковых щитах (крышках) двигателя.

Вращающееся магнитное поле может быть получено и в двухфазной системе переменных токов, если угол сдвига фаз между токами равен $\pi/2$, а катушки смещены в пространстве относительно друг друга на угол 90° .

Рассмотрим получение кругового вращающегося магнитного поля в случае двухфазной системы Тесла (рис. 4.15).

При пропускании через катушки гармонических токов каждая из них в соответствии с вышесказанным будет создавать пульсирующее магнитное поле. Векторы \vec{B}_A и \vec{B}_B , характеризующие эти поля, направлены вдоль осей соответствующих катушек, а их амплитуды изменяются также по гармоническому закону. Если ток в катушке B отстает от тока в катушке A на 90° , то $B_A = B_m \sin \omega t$, $B_B = B_m \sin(\omega t - 90^\circ)$.

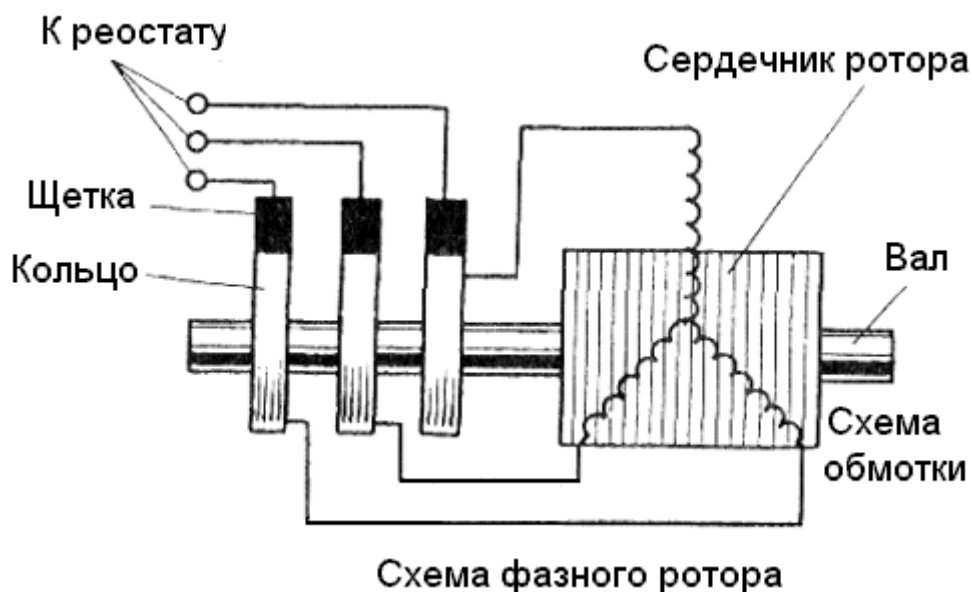


Рис. 4.14. Упрощенное изображение асинхронного двигателя с фазным ротором

Найдем проекции результирующего вектора магнитной индукции на оси x и y декартовой системы координат, связанной с осями катушек:

$$\begin{aligned} B_x &= -B_B = -B_m \sin(\omega t - 90^\circ) = B_m \cos \omega t, \\ B_y &= B_A = B_m \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Модуль результирующего вектора магнитной равен:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = B_m = \text{const}, \quad (4.17)$$

при этом для тангенса угла α , образованного этим вектором с осью абсцисс, можно записать:

$$\operatorname{tga} = \frac{B_Y}{B_X} = \operatorname{tg}\omega t, \quad (4.18)$$

откуда

$$\alpha = \omega t. \quad (4.19)$$

Полученные соотношения (4.17) и (4.19) показывают, что вектор результирующего магнитного поля неизменен по модулю и вращается в пространстве с постоянной угловой частотой ω , описывая окружность, что соответствует круговому вращающемуся полю.

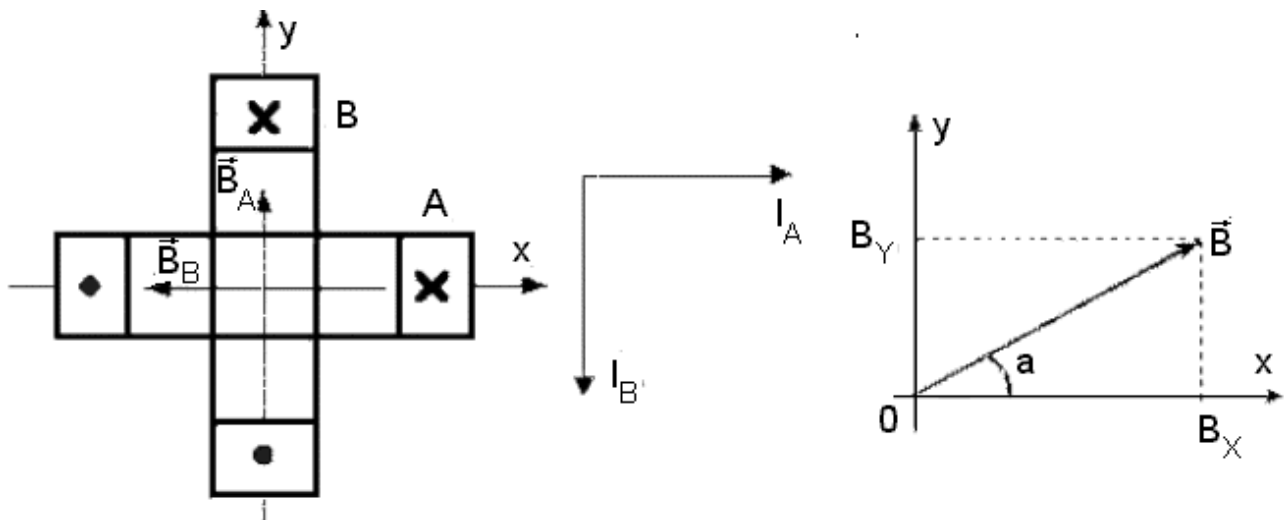


Рис. 4.15. Две катушки и векторная диаграмма в пространстве для магнитных полей

Изложенные соображения положены в основу двухфазных асинхронных двигателей. Они имеют на статоре две обмотки, сдвинутые на 90 эл. градусов. Одна обмотка включается в сеть непосредственно и называется главной. Другая включается в сеть через фазосдвигающий элемент и называется вспомогательной (пусковой). Ротор всегда короткозамкнутый.

Двухфазная система токов в обмотках статора двигателя создается искусственным путем при последовательном включении с одной из

катушек статора емкости C или индуктивности, а с другой катушкой – активного сопротивления для выравнивания токов в фазах.

В зависимости от использования вспомогательной обмотки и от фазосдвигающего элемента асинхронные микродвигатели подразделяются на 5 групп:

1. с пусковым сопротивлением;
2. с пусковым конденсатором;
3. с пусковым и рабочим конденсатором;
4. с рабочим конденсатором;
5. с экранированными полюсами.

Конструктивная схема двухфазного статора с одинаковыми катушками и возможные электрические схемы включения их в асинхронном двигателе показаны на рис. 4.16.

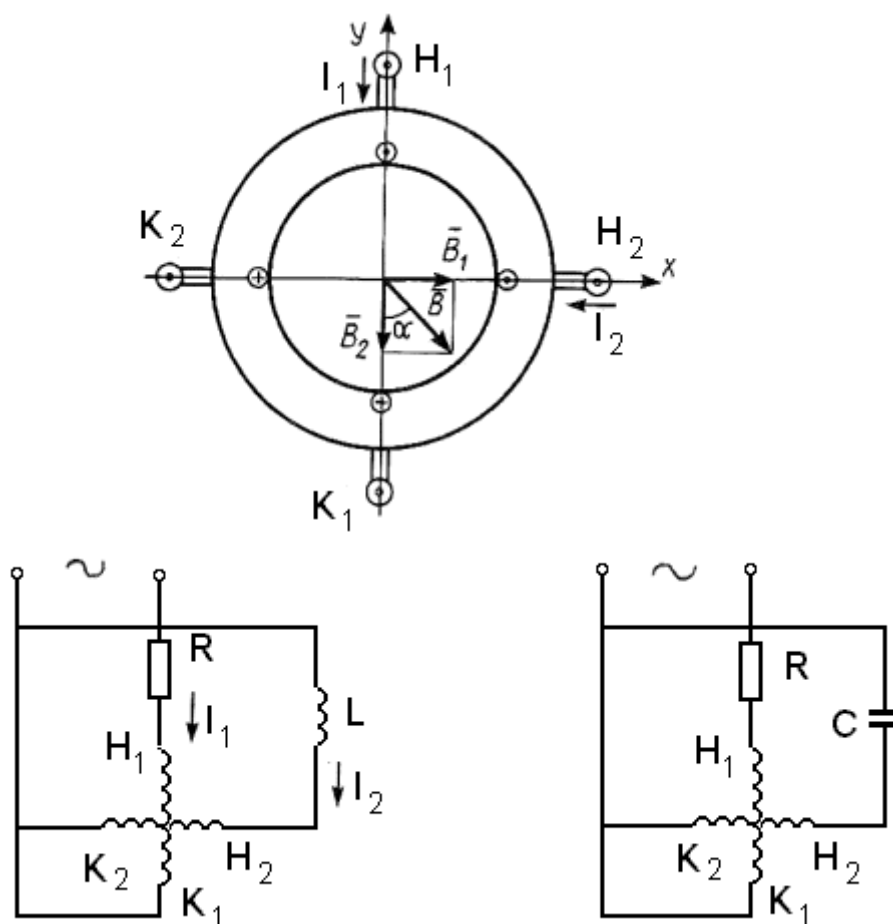


Рис. 4.16. Конструктивная схема двухфазного статора с одинаковыми катушками и возможные электрические схемы включения их в асинхронном двигателе

Используются также относительно дешевые однофазные асинхронные двигатели. Они имеют одну рабочую обмотку и пусковое приспособление. Рабочая однофазная обмотка создает переменное пульсирующее поле, ось которого неподвижна в пространстве. Такое поле не может создать вращающего момента в замкнутых контурах, пересекаемых магнитным потоком.

Если же ротору сообщить начальную скорость какой либо внешней силой, то он будет продолжать движение с нарастающей скоростью, пока не достигнет номинального значения. Возникновение в однофазном двигателе вращающегося момента при начальном внешнем толчке можно объяснить с помощью теории вращающихся в противоположные стороны магнитных полей, подобно тому, как в физике при анализе волновых явлений стоячую волну заменяют двумя бегущими в различные стороны бегущими волнами.

При питании однофазной обмотки статора переменным током возникает пульсирующее магнитное поле, которое можно представить двумя круговыми полями $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{об}$, вращающимися в разные стороны (рис. 4.17).

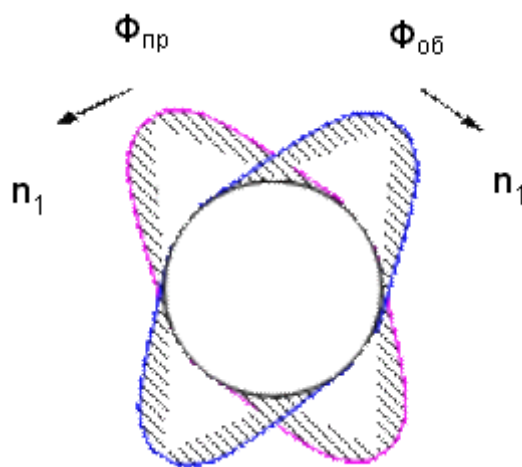


Рис. 4.17. Пульсирующее магнитное поле однофазного асинхронного двигателя, которое можно представить двумя круговыми полями $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{об}$, вращающимися в разные стороны

Каждое из этих полей индуцирует в обмотке ротора ЭДС и токи. Токи ротора, взаимодействуя с соответствующим полем статора, создают вращающие моменты (M_1 и M_2). При неподвижном роторе эти момен-

ты совершенно одинаковы, поэтому результирующий момент микродвигателя равен 0.

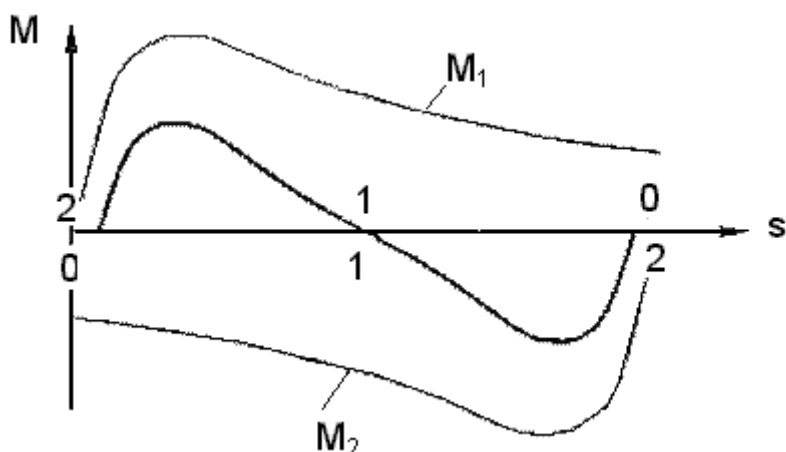


Рис. 4.18. Вращающие моменты однофазного асинхронного двигателя,

Механическую характеристику однофазного двигателя можно получить сложением вращающихся моментов прямого (M_1) и обратного (M_2) полей (рис. 4.18). Анализ этой характеристики позволяет сделать следующие выводы:

- Однофазный двигатель не имеет собственного пускового момента. В этом его характерная особенность и главный недостаток.
- Двигатель не имеет определенного направления вращения. Оно зависит от первичного толчка.
- Для однофазного двигателя не возможен режим электромагнитного тормоза (при $s_{кр} < 1$).
- При одном и том же нагрузочном моменте, что и у симметричного трехфазного или двухфазного двигателя, однофазный будет иметь большее скольжение, следовательно, большие потери в роторе и меньший КПД.
- Перегрузочная способность однофазного двигателя зависит от активного сопротивления ротора.

Для создания начального пускового момента в однофазном двигателе необходимо в статоре возбудить вращающееся магнитное поле. Для этого в статоре, кроме рабочей обмотки, укладывают пусковую обмотку. Ось катушки пусковой обмотки сдвинута относительно оси рабочей обмотки на угол 90° , а сама пусковая обмотка соединена последовательно с конденсатором и параллельно с рабочей обмоткой включена в

сеть. Благодаря пространственному смещению осей обмоток и временному сдвигу токов, питающих обмотки, близкому к $\pi/4$, в статоре электродвигателя возникнет вращающееся магнитное поле, которое и создаст начальный пусковой момент. Когда ротор достигает заданной скорости. Пусковую обмотку отключают вручную либо автоматически центробежным выключателем.

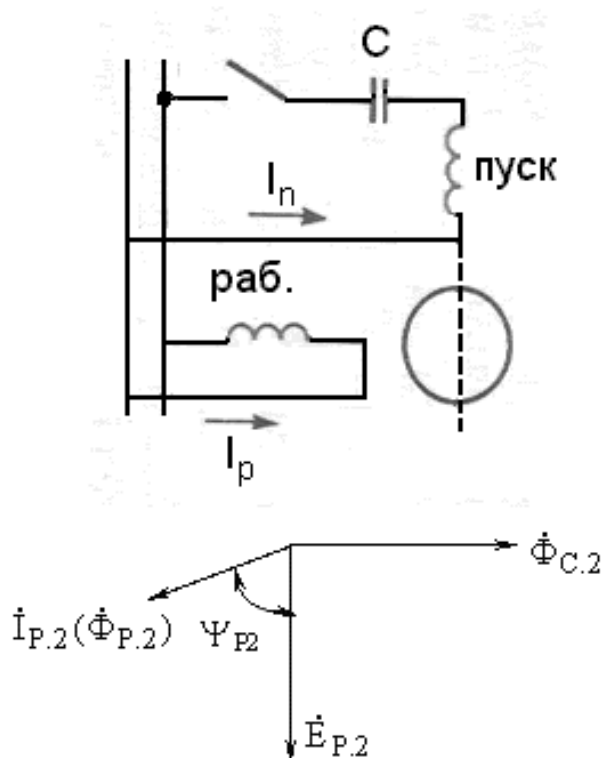


Рис. 4.19. Включение однофазного асинхронного двигателя

При работе двигателя с небольшим скольжением, например $s = 0,1$, частота тока в роторе от прямого поля статора близка к нулю (при $f_1 = 50$ Гц $f_{P.1} = f_1 \cdot s = 5$ Гц), а частота тока от обратного поля – близка к двойной частоте сети ($f_{P.2} = f_1 \cdot (2 - s) = 95$ Гц).

Поскольку индуктивное сопротивление обмотки ротора пропорционально частоте, ток ротора ($I_{P.2}$), отстает от ЭДС ($E_{P.2}$), индуцированной в нем обратным полем статора ($\Phi_{C.2}$), на угол близкий к 90° ($\text{tg} \Psi_{P.2} = X_{P.2}/r_P$). Магнитный поток $\Phi_{P.2}$, созданный током $I_{P.2}$, находится почти в противофазе к обратному полю статора $\Phi_{C.2}$ и в значительной мере его ослабляет.

Получается, что в двигателе имеет место прямое поле и небольшое обратное поле. Они вместе образуют одно результирующее поле – эллиптическое.

При работе двигателя в режиме холостого хода, когда скольжение близко к нулю ($s \approx 0$), демпфирующее действие обратного потока ротора $\Phi_{р.2}$ оказывается настолько сильным, что обратное поле статора $\Phi_{с.2}$ практически пропадает и результирующее поле становится почти круговым.

КПД однофазных двигателей значительно меньше, чем трехфазных, но поскольку их используют при малых мощностях, то это не является решающим.

4.2. Синхронные электрические машины

Синхронная машина состоит из двух основных частей: подвижной (ротора) и неподвижной (статора).

Статор синхронной машины идентичен статору асинхронного двигателя.

Принципиальное отличие синхронного двигателя от асинхронного заключается в исполнении ротора. Последний у синхронного двигателя представляет собой магнит, выполненный либо на базе постоянного магнита (при относительно небольших мощностях) либо на основе электромагнита. Поскольку разноименные полюсы магнитов притягиваются, то вращающееся магнитное поле статора, которое можно интерпретировать как вращающийся магнит, увлекает за собой магнитный ротор, причем их скорости равны. Это объясняет название двигателя – синхронный.

В отличие от асинхронного двигателя, $\cos \varphi$ у которого обычно не превышает 0,8...0,85, у синхронного двигателя можно добиться большего значения $\cos \varphi$ и сделать даже так, что ток будет опережать напряжение по фазе. В этом случае, подобно конденсаторным батареям, синхронная машина может быть использована для повышения коэффициента мощности.

Ротор может быть исполнен в двух вариантах (рис. 4.20).

Первый вариант ротора – явнополюсный. Он имеет четко выраженные полюсы и сосредоточенную обмотку возбуждения. Концы ротор-

ной обмотки, которая называется обмоткой возбуждения, подводятся к контактными кольцам, установленным на оси ротора и через щетки соединяются с источником постоянного тока. полюсным наконечникам ротора придается форма, которая обеспечивает синусоидальное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины между ротором и статором.

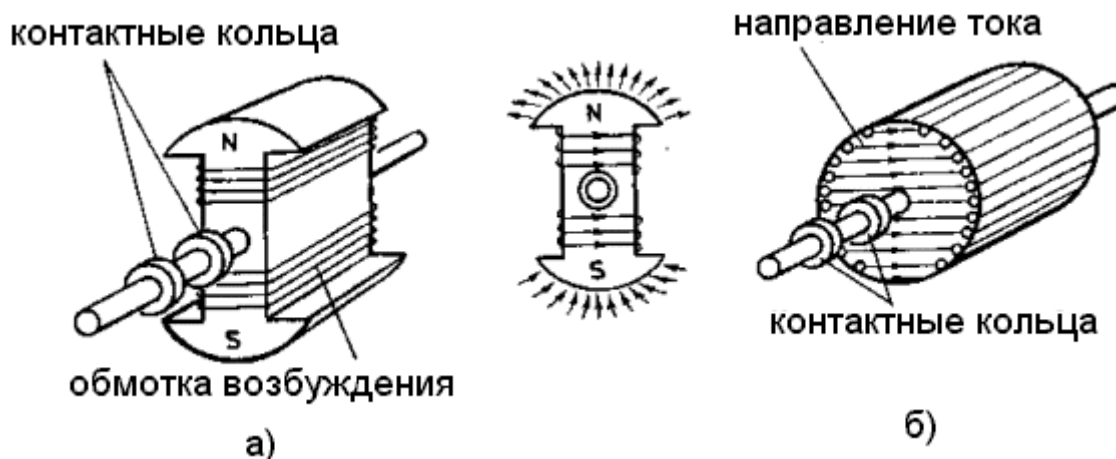


Рис. 4.20. Упрощенное изображение двух вариантов ротора синхронного двигателя

Неявнополюсный ротор выполнен в виде круглого сердечника, на который намотана обмотка возбуждения, распределенная по всей его поверхности. Такая конструкция ротора обеспечивает ему механическую прочность при больших линейных скоростях на окружности ротора.

Если трехфазную обмотку статора подключить к силовой сети переменного напряжения, то в статоре возникнет вращающееся магнитное поле, магнитные полюса которого (северный и южный) будут перемещаться по его внутренней поверхности со скоростью вращения поля подобно тому, как это имело место в асинхронном двигателе. Если предположить, что внутрь статора помещена магнитная стрелка без трения в осях ее поддерживающих, то несложно догадаться, что, из-за взаимодействия магнитных полюсов стрелки и магнитного поля статора, она будет вращаться, поскольку она всегда ориентируется вдоль линий магнитной индукции.

У двигателя роль стрелки выполняет электромагнит, обладающий достаточно большой массой и моментом инерции. При этом возникает следующая принципиально важная особенность.

Дело в том, что, несмотря на аналогичность процессов взаимодействия ротора с магнитным полем, синхронный двигатель такой конструкции не имеет пускового момента и сам ротор во вращение прийти не может. Это объясняется тем, что при включении обмоток статора направление электромагнитного момента, действующего на ротор, изменяется на противоположное через каждую половину периода тока статора. Ротор, обладающий большим моментом инерции, не может быть вовлечен во вращение магнитным полем статора. Поэтому для запуска синхронного двигателя такой конструкции требуется сторонняя внешняя сила. Например. Другой двигатель, который бы раскручивал ротор синхронного электродвигателя до скорости, близкой к скорости вращения поля.

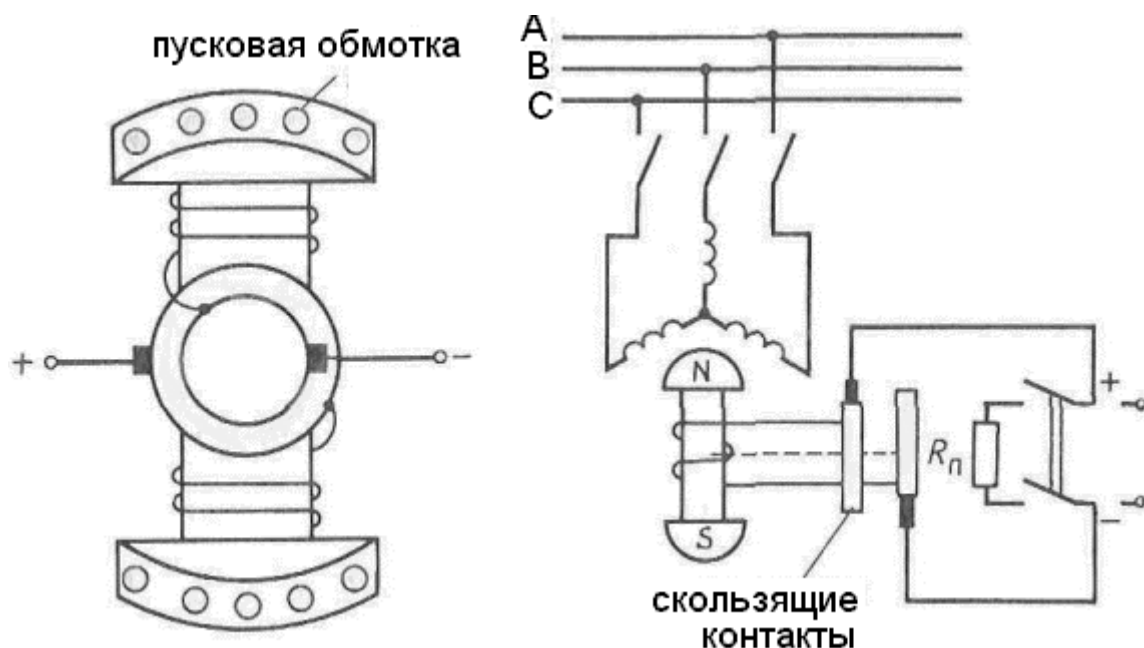


Рис. 4.21. Упрощенное изображение ротора синхронного двигателя с пусковой короткозамкнутой обмоткой.

Была создана конструкция ротора, позволяющая осуществить асинхронный пуск таких двигателей. Статоры современных синхронных двигателей, помимо обмотки возбуждения, имеют пусковую короткозамкнутую обмотку. Стержни этой обмотки располагаются в пазах по-

люсных наконечников и соединяют на торцах пластинками. Подобно тому, как это имело место в обмотке короткозамкнутого асинхронного двигателя (рис. 4.21).

Пуск такого синхронного двигателя осуществляется следующим образом. Сначала обмотка возбуждения синхронного двигателя замыкается на пусковое сопротивление (рис. 4.21), а обмотка статора включается в сеть. То есть в начале получается подобие асинхронного двигателя с хорошим пусковым моментом. Затем, когда ротор достигнет скорости, близкой с синхронной, обмотку возбуждения переключают на источник постоянного тока и двигатель входит в синхронизм.

Характерной особенностью синхронных двигателей является постоянство частоты вращения при неизменной частоте питающей сети и колебаниях момента нагрузки на валу и напряжения сети в определенных пределах, поскольку $n_p = n_1 = 60f/p$.

Положительным свойством синхронного двигателя является постоянство скорости вращения при различных нагрузках за счет чего они обеспечивают высокую стабильность частоты вращения вала. Кроме того, синхронный двигатель обеспечивает $\cos \varphi = 1$ независимо от величины нагрузки и имеет возможность регулирования сдвига фаз между напряжением и током. Максимальный момент у синхронного двигателя при заданном токе в обмотке возбуждения прямо пропорционален напряжению в силовой сети, в то время как у асинхронного двигателя он зависит от квадрата напряжения. Следовательно, синхронные двигатели в значительно меньшей степени зависят от нестабильности напряжения в силовой сети.

Следует иметь в виду, что наряду с необходимостью иметь два источника питания (постоянного и переменного), относительной сложностью запуска и регулирования частоты вращения, синхронный двигатель обладает таким существенным недостатком, как выпадение из синхронизма при значительных перегрузках. В таких случаях двигатель останавливается и требует повторного запуска.

Синхронные двигатели обычно применяют в рабочих машинах непрерывного действия относительно большой мощности, где исключено появление значительных перегрузок, которые могут вызвать остановку двигателя. Обычно их применяют для привода мощных вентиляторов, насосов, а также в виде синхронных компенсаторов для повышения ко-

эфициента мощности (улучшения $\cos \varphi$) с промышленных электрических сетях.

Наряду с синхронными двигателями большой мощности с электромагнитами используются также синхронные микродвигатели с постоянными магнитами. Эти двигатели делятся: 1) на самозапускающиеся двигатели; 2) двигатели с асинхронным пуском.

Самозапускающиеся двигатели выполняются на небольшие мощности (обычно доли ватта) и низкие частоты вращения (не более 400 об/мин). Они рассчитываются на работу от однофазной сети переменного тока. Их магнитное поле либо пульсирует, либо имеет резко выраженный эллиптический характер. Пуск этих двигателей происходит за полпериода изменения тока за счет всегда существующего в синхронных двигателях пульсирующего момента. Нагрузка должна быть малоинерционной. В противном случае они пускаются в холостую, а затем нагружаются. Для пуска используются различные устройства, обеспечивающие вращение двигателя в заданном направлении.

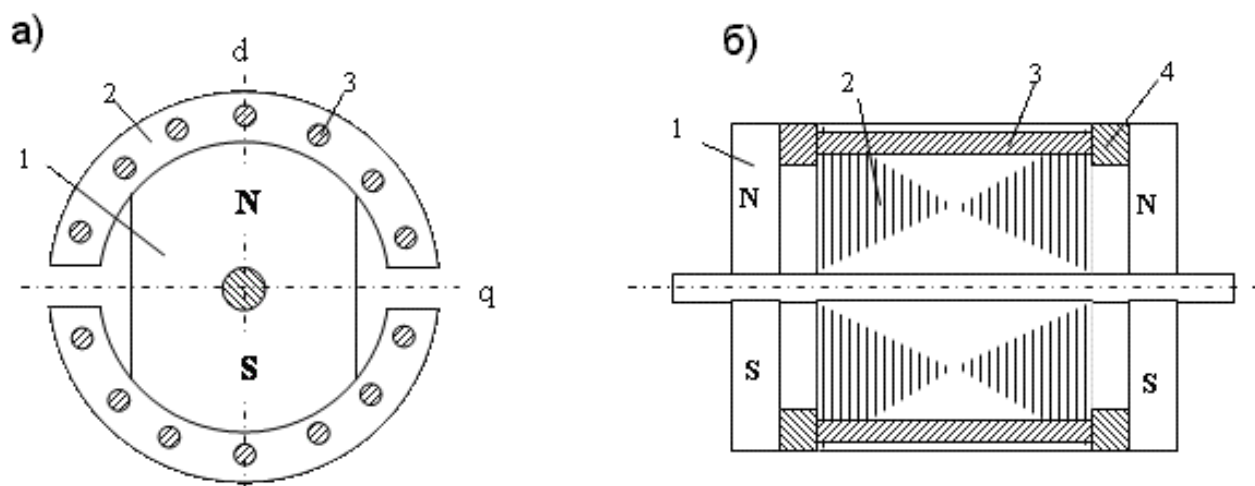


Рис. 4.22. Синхронные микродвигатели с постоянными магнитами на роторе с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением магнитов. 1 – постоянный магнит; 2 – сердечник из электротехнической стали; 3 – стержни пусковой обмотки; 4 – короткозамыкающие кольца.

Обычно они выполняются плоскими – имеющими сравнительно большой диаметр и малую длину. Их обмотка возбуждения имеет вид

кольца, а магнитная цепь статора - клювообразные полюса. КПД таких двигателей невелик – 345 % и менее.

Синхронные микродвигатели с асинхронным пуском имеют на роторе короткозамкнутую обмотку типа "беличьей клетки", которая выполняется в полюсных наконечниках. Эта обмотка во время пуска участвует в создании асинхронного момента и разгоняет двигатель до скорости, близкой к синхронной. В синхронном режиме она демпфирует колебания ротора при резких изменениях нагрузки.

СМД с постоянными магнитами и асинхронным пуском изготавливаются в двух исполнениях: с радиальным расположением постоянных магнитов (рис. 4.22а); с аксиальным расположением постоянных магнитов (рис. 4.22б).

В электромагнитном отношении более совершенны двигатели первого исполнения. Второе применяется в тех случаях, когда есть ограничения по внешнему диаметру.

Уравнение ЭДС и момент двигателя в синхронном режиме. Из общего курса электрических машин известно несколько форм уравнения напряжения синхронного двигателя с явно выраженными возбужденными полюсами, например, такая:

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_1, \quad (4.20)$$

где: \dot{E}_0 - ЭДС, индуцированная в статоре полем ротора; \dot{I}_d, \dot{I}_q - ток статора по осям d и q; x_d, x_q - синхронные индуктивные сопротивления статора по продольной и поперечной осям; r_1 - активное сопротивление статора.

Уравнению (4.20) соответствует векторная диаграмма на рис. 4.24. Из диаграммы можно вывести выражения токов I_d и I_q .

$$I_d = \frac{U}{r_1^2 + x_d x_q} (x_q \cos \theta_U - x_q \zeta - r_1 \sin \theta_U), \quad (4.21)$$

$$I_q = \frac{U}{r_1^2 + x_d x_q} (r_1 \cos \theta_U - r_1 \zeta - x_d \sin \theta_U),$$

где $\zeta = E_0 / U$ - степень возбужденности ротора.

Полный ток статора будет $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$.

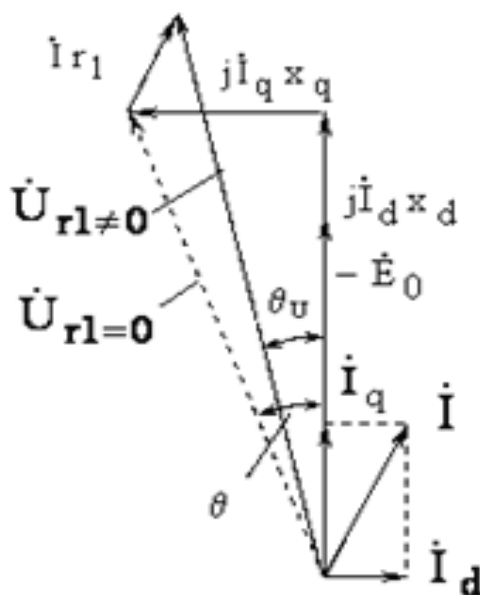


Рис. 4.23. Векторная диаграмма СМД.

Если пренебречь активным сопротивлением статора ($r_1 = 0$), то формула момента:

$$M = \frac{mUE_0}{\omega_1 X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta = M_1 + M_2. \quad (4.22)$$

Вращающий момент двигателя является суммой двух моментов: электромагнитного M_1 , обусловленного взаимодействием полей статора и ротора и реактивного момента M_2 , обусловленного неодинаковой проводимостью по продольной и поперечной осям.

Не учет активного сопротивления статора в микромашинах приводит к значительным количественным ошибкам. Вместе с тем его учет сильно усложняет математический анализ процессов, происходящих в машине. Однако и в этом случае формула момента похожа на:

$$M = A_{\vartheta} \sin(\theta_U + a_{\vartheta}) + A_{dq} \sin 2(\theta_U + a_{dq}) - M_T, \quad (4.23)$$

где: $A_{\text{Э}}$ - амплитуда электромагнитного момента с учетом r_1 ; A_{dq} - амплитуда реактивного момента с учетом r_1 ; $\beta_{\text{Э}}$, β_{dq} - углы сдвига первой и второй составляющих момента; M_{T} - тормозной момент.

Рассматривая выражение (4.23), приходим к выводу, что вращающий момент синхронного микродвигателя с учетом r_1 , так же как и без учета r_1 , является суммой двух синусоид, только смещенных влево на углы $\beta_{\text{Э}}$ и β_{dq} и вниз на величину тормозного момента M_{T} .

Смещение синусоид влево (в сторону меньших углов) можно пояснить с помощью векторной диаграммы рис. 4.24, на которой пунктиром показан вектор напряжения, замыкающий диаграмму, и угол q при $r_1 = 0$. Из диаграммы видно, что учет активного сопротивления приводит к уменьшению угла между векторами ЭДС и напряжения сети. Это дает основание утверждать, что момент наступает при меньшем угле. Смещение синусоид вниз объясняется потерями в обмотке статора, которые бы не учитывались при $r_1 = 0$, следовательно, меньшей полезной мощностью, а значит и меньшим моментом двигателя.

Двигатели с радиальным расположением магнитов. Роль обмотки возбуждения здесь выполняет блок постоянных магнитов типа звездочки, на который напрессован кольцевой пакет из электротехнической стали. В пазах кольца располагается пусковая короткозамкнутая обмотка и имеются прорезы, размеры которых выбираются из условия хорошего пуска и максимального использования энергии постоянных магнитов в синхронном режиме.

Свойства двигателя во многом зависят от того, насколько удачно выбраны размеры этих прорезей. В целях предохранения магнитов от размагничивания и увеличения асинхронного пускового момента прорезы должны быть минимальными. Однако не следует забывать о том, что это приводит к росту потоков рассеяния и ухудшению свойств двигателя в синхронном режиме.

Особенностью двигателей радиальной конструкции является большое магнитное сопротивление по продольной оси по сравнению с сопротивлением по поперечной оси. Объясняется это низкой проводимостью постоянного магнита, по которому проходит поток продольной реакции якоря (проводимость магнита лишь раз в 10 больше проводимости воздуха, тогда как проводимость электротехнической стали в тысячи раз превышает ее).

Поток поперечной реакции якоря проходит по полюсным наконечникам из электротехнической стали и, естественно, встречает малое магнитное сопротивление. Поэтому в данных двигателях $I_d < I_q$, а следовательно $x_d < x_q$. Тот факт, что $x_d < x_q$ приводит к иному виду угловой характеристики, чем в двигателя «классической» конструкции (рис. 4.24).

Стабилизация магнитов в этих двигателях происходит в режиме противовключения, что имеет место при частоте вращения, близкой к синхронной. (Стабилизацией постоянного магнита называется воздействие на него внешней размагничивающей силой такой величины, больше которой в практике эксплуатации двигателя не встретится.)

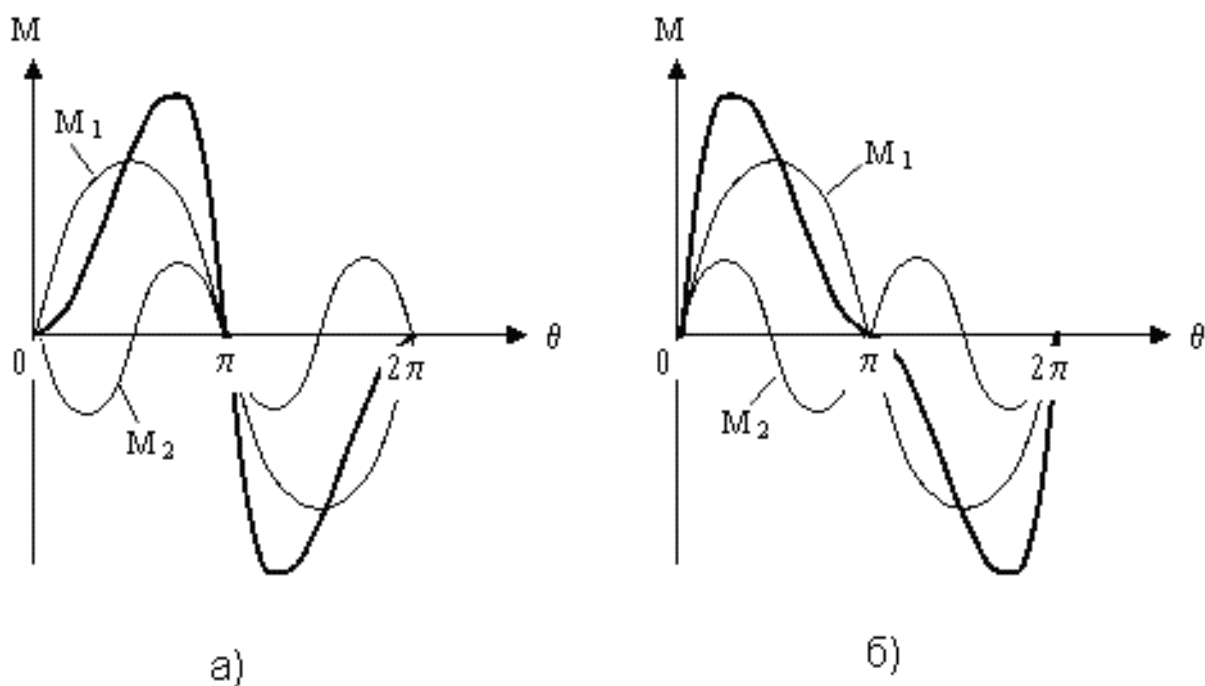


Рис. 4.24. Зависимости моментов от угла θ при $x_d < x_q$ (а) и при $x_d > x_q$ (б).

В двигателях аксиальной конструкции магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям практически одинаковы, т.е. $x_d \approx x_q$, поэтому их можно рассматривать как машины с неявновыраженными полюсами. Стабилизация магнитов в этих машинах происходит в режиме короткого замыкания.

Положительными свойствами синхронных двигателей с постоянными магнитами являются: высокая стабильность скорости вращения в синхронном режиме, сравнительно высокие энергетические показатели

(КПД и $\cos j$), повышенная перегрузочная способность, большая удельная мощность (мощность на единицу массы), хорошая синфазность вращения, что часто требуется в групповых приводах. Недостатки – более высокая стоимость, меньший пусковой момент и больший пусковой ток по сравнению с аналогичными реактивными двигателями.

4.3. Особенности пуска двигателей с постоянными магнитами

подавляющее большинство синхронных микродвигателей пускается как асинхронные, для чего они снабжаются пусковой обмоткой. Однако в отличие от двигателей с электромагнитным возбуждением постоянные магниты на время пуска невозможно "отключить". Поэтому в процессе разгона поток постоянных магнитов индуцирует в обмотке статора ЭДС, под действием которой по обмотке через источник протекает ток (рис. 4.25). Этот ток, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создает момент по своей природе аналогичный асинхронному моменту, развиваемому пусковой обмоткой. Однако этот момент является не движущим, а тормозящим.

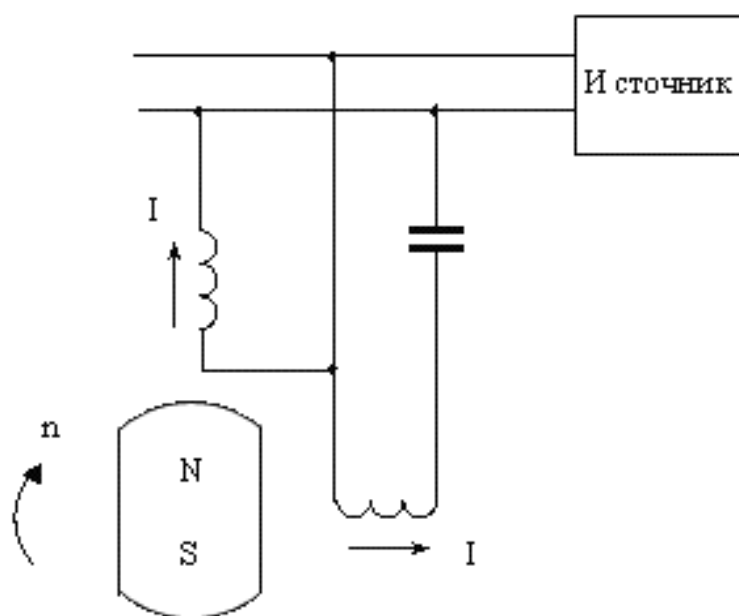


Рис. 2.25. К вопросу пуска синхронного двигателя с постоянными магнитами

Частота тока в пусковой обмотке пропорциональна скольжению ($f_2 = f_1 s$), поэтому максимум асинхронного момента лежит в области малых скольжений. Частота тока в обмотке статора от поля постоянных магнитов пропорциональна скорости ротора [$n_2 = n_1(1-s)$], поэтому максимум тормозного момента лежит в области малых значений n , т.е. больших скольжений.

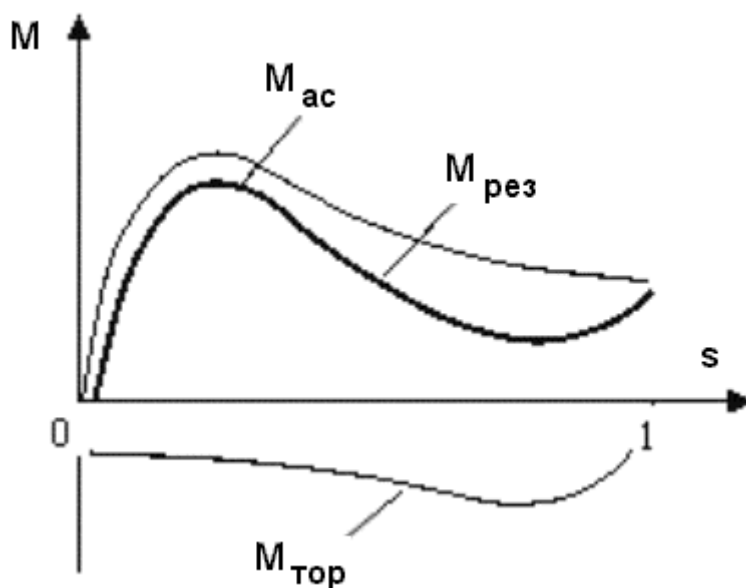


Рис. 4.26. Зависимости $M=f(s)$ для двигателя с постоянными магнитами

Тормозной момент образует провал в пусковой характеристике двигателя, тем самым создает опасность застревания его на малой скорости вращения (рис. 4.26). Понятно, что с этой точки зрения надо бы иметь небольшой поток постоянного магнита, т.е. небольшую ЭДС E_0 , хотя в интересах работы в синхронном режиме должно быть наоборот. Оптимальное отношение E_0/U для двигателей мощностью 10 -120 Вт при $f = 50$ Гц $p = 2$ лежит в пределах 0,5 - 0,8.

4.4. Шаговые двигатели

В современных электронных системах ввода – вывода информации широко используются устройства, оперирующие, с одной стороны, цифровой формой представления сигнала и, с другой стороны, функ-

ционирующие в режиме именуемом «в приращениях». В этом случае любое движение выполняется в виде последовательности малых наперед заданных дискретных шагов, что обеспечивает точное механическое движение (перемещение). Использование цифровой формы управляющих сигналов для обеспечения точного пошагового механического движения привела к созданию нового типа двигателей – шаговых двигателей (ШД). Шаговые двигатели уже давно и успешно применяются в самых разнообразных устройствах. Их можно встретить в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а также в разнообразном промышленном и специальном оборудовании. В настоящее время выпускается множество различных типов шаговых двигателей.

Шаговые двигатели – это электромеханические устройства, преобразующие сигналы управления в угловое перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении.

Ввиду относительной легкости, с которой можно задавать угловое перемещение ротора, ШД получили широкое распространение в принтерах для подачи бумаги, в дисководах для перемещения считывающих головок и в других устройствах, где необходимо точное позиционирование. С точки зрения конструктивного исполнения современные ШД, по сути, являются синхронными двигателями без пусковой обмотки на роторе. Благодаря отсутствию контактных щеток ШД, по сравнению с двигателями постоянного тока, более надежны.

Рассмотрим сначала идеи, лежащие в основе принципа действия простейшего однофазного шагового двигателя.

Двухполюсный ротор, изготовленный из магнитомягкой стали с клювообразными выступами, помещен в четырехполюсный статор (рис. 4.27). Одна пара полюсов статора выполнена из постоянных магнитов, на другой – находится дополнительная обмотка управления. Будем полагать, что трение в подшипниках минимально и ротор может свободно вращаться вдоль своей оси. Пока тока в обмотках управления нет, магнитный ротор, имеющий северный и южный полюс, ориентируется, подобно магнитной стрелке компаса, вдоль постоянных магнитов и удерживается около них с определенным усилием, которое определяется небольшим магнитным потоком полюсов $\Phi_{пм}$. Другими словами, в исходном состоянии, когда по обмотке управления не протекает ток, ротор будет «притянут» к вертикальным полюсам магнитов статора и займет положение под углом 0^0 к вертикали.

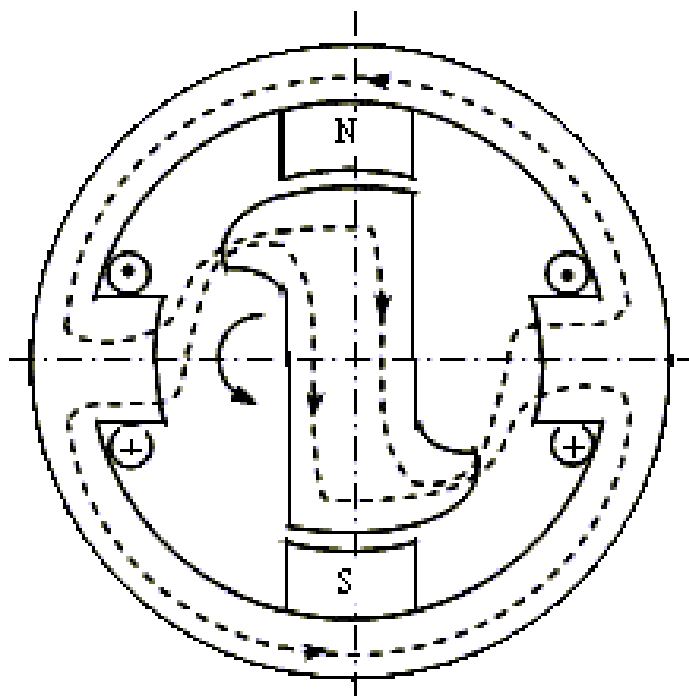


Рис. 4.27. Упрощенное изображение простейшего шагового двигателя

При подаче постоянного тока на обмотку управления возникает магнитный поток Φ_y примерно вдвое больший, чем поток постоянных магнитов. Это приводит к изменению расположения вектора магнитной индукции внутри ШД и, соответственно, к изменению ориентации ротора. В первоначальный момент он окажется в неустойчивом положении. Затем под действием электромагнитного усилия, создаваемого потоком Φ_y , ротор начнет поворачиваться против часовой стрелки, преодолевая нагрузочный момент и момент, развиваемый постоянными магнитами, стремясь занять положение соосное с полюсами управляющей обмотки (горизонтальное положение). Поворот происходит в сторону клювообразных выступов, т.к. магнитное сопротивление между статором и ротором в этом направлении меньше, чем в противоположном.

Таким образом, при подаче тока в обмотку управления вырабатывается вращающийся вектор силы и происходит ступенчатый поворот ротора на фиксированный угол, равный 90° . При этом после поворота на заданный угол ротор сохраняет занятое положение.

При отключении напряжения с обмотки управления ротор, поворачивается в сторону клювообразных выступов на фиксированный угол,

равный 90° , «притягивается» к вертикальным полюсам магнитов статора, и занимает положение под углом 180° ($90 + 90$) к вертикали.

При подаче постоянного тока, но только другого направления на обмотку управления опять возникает магнитный поток $\Phi_{ун}$ примерно вдвое больший, чем поток постоянных магнитов и меняется расположение вектора магнитной индукции. Под действием новой электромагнитной силы, создаваемой потоком $\Phi_{ун}$, ротор поворачивается, преодолевая нагрузочный момент и момент, развиваемый постоянными магнитами, стремясь занять горизонтальное положение. Поворот опять же происходит в сторону клювообразных выступов на фиксированный угол, равный 90° . В результате ротор займет положение под углом 270° ($90 + 90 + 90$) к вертикали. Наконец, при отключении напряжения с обмотки управления ротор, снова поворачивается в сторону клювообразных выступов на фиксированный угол, равный 90° , «притягивается» к вертикальным полюсам магнитов статора, и занимает положение под углом 360° ($90 + 90 + 90 + 90$ или 0°) к вертикали. Как следует из сказанного, при работе шагового двигателя происходит дискретный ступенчатый поворот ротора. Минимальный угол поворота ротора называется шагом. Для двигателя имеющего np пар полюсов статора, шаг равен π/np . В рассмотренном случае две пары полюсов и шаг $-\pi/2$.

Достоинством простейших ШД с постоянными магнитами является простота конструкции и схемы управления. Для фиксации ротора при обесточенной обмотке управления не требуется потребление энергии, угол поворота сохраняет свое значение и при перерывах в питании. Двигатели этого типа отработывают импульсы с частотой до 200-300 Гц. Их недостатки – низкий КПД и невозможность реверса, то есть вращения в противоположную сторону.

Более сложные реверсивные шаговые двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 4.28). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается большой магнитный поток и, как следствие, большой момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением. Показанный на рисунке двигатель имеет 3 пары полюсов статора и 2 пары полюсов ротора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намо-

тана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30 град.

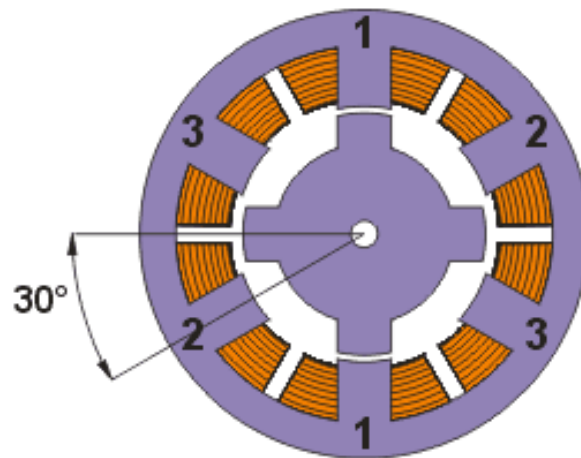


Рис. 4.28. Изображение реверсивного шагового двигателя с постоянными магнитами

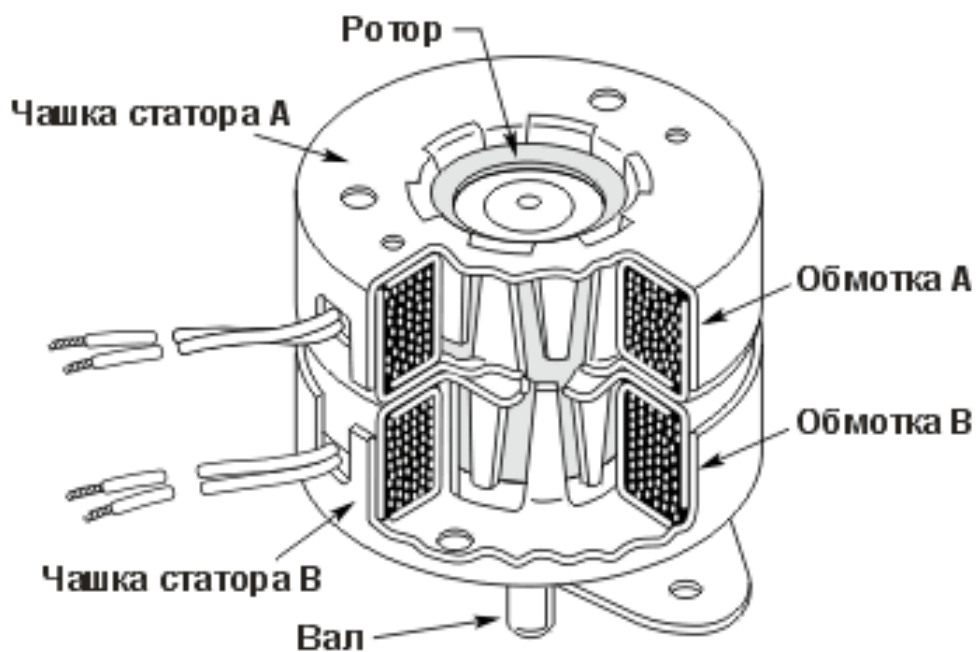


Рис. 4.29. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами.

При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора нахо-

дятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 48 – 24 шага на оборот (угол шага 7.5 – 15 град).

Разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами показан на рис. 4.29.

Для удешевления конструкции двигателя магнитопровод статора выполнен в виде штампованного стакана. Внутри находятся полюсные наконечники в виде ламелей. Обмотки фаз размещены на двух разных магнитопроводах, которые установлены друг на друге. У такого ШД на вал электродвигателя, как и ранее, надет двухполюсный ротор в виде постоянного магнита. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит.

Рассмотрим теперь работу ШД позволяющего осуществлять движение ротора, в зависимости от необходимости, либо по часовой стрелке, либо в противоположную сторону.

Для начала рассмотрим случай, когда ротор имеет 2 полюса. В отличие от предыдущего случая будем считать, что зубцы ротора ШД выполнены симметричными (без клювообразных выступов). Кроме того, в этом ШД магнитное поле полюсов статора создается специальными обмотками, через которые протекает ток. Провода таких обмоток укладывают на внутренней поверхности статора на полюсные наконечники, создающие небольшой магнитный поток. Для простоты на рисунке эти обмотки изображены в виде четырех индуктивностей (катушек, соленоидов), плоскости которых смещены в пространстве на угол 90° относительно друг друга. В начало обмотки (катушки) подается ток от источника тока. Направление протекания тока при этом может изменяться.

Как известно из физики обмотки провода (катушки), состоящие из большого числа витков провода, при протекании по ним тока, создают магнитное поле. Это магнитное поле вне катушек подобно магнитному полю постоянного магнита. Расположение полюсов в катушке определяется направлением тока в витках по известному правилу буравчика (если вращать рукоятку буравчика с правой резьбой по току, то движение его острия укажет направление линий индукции магнитного поля). Будем для определенности считать, что южный полюс (S) образуется на том конце катушки индуктивности, куда ток втекает. Противоположный конец катушки индуктивности соответствует северному полюсу (N).

Пока тока в обмотках управления нет, магнитный ротор оказывается в неустойчивом положении и ориентируется, в принципе, случайным образом, «притягиваясь» к вертикальным или горизонтальным полюсам обмоток статора. На практике, обычно в конструкции ШД предусмотрены датчики, которые позволяют точно зафиксировать положение ротора.

Пусть при отсутствии токов в обмотках исходное положение ротора вертикальное, с расположением магнитных полюсов, как показано на рис. 4.30.

При отсутствии тока I_2 и включении под постоянное напряжение вертикальных катушек (первый такт работы ШД) через них начнет протекать ток I_1 , который создаст магнитные поля ориентации, как показано на рис. 4.30.

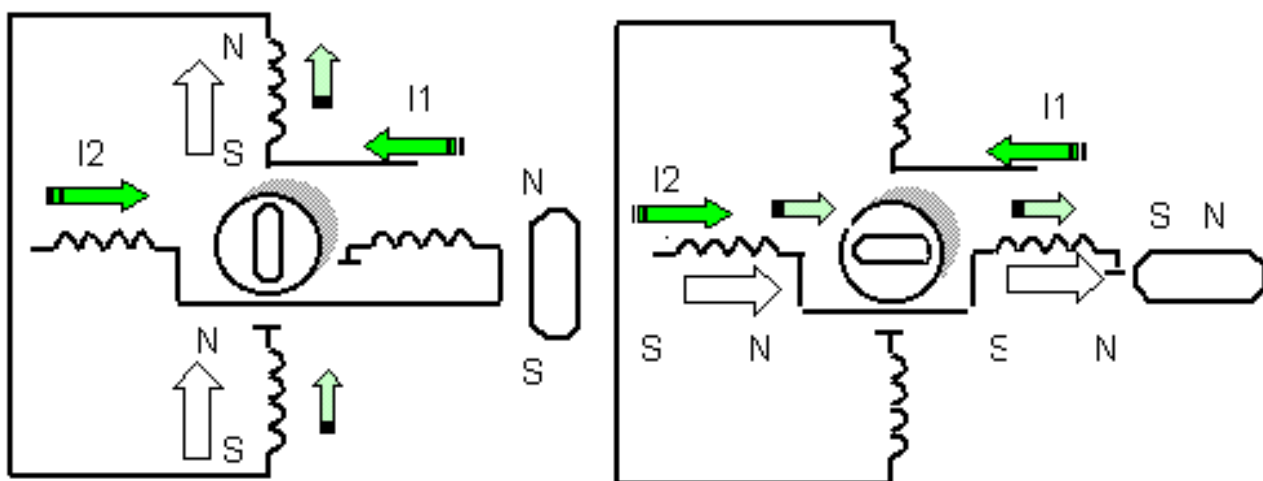


Рис. 4.30. Схема подачи управляющих сигналов на первом (слева) и втором (справа) такте работы реверсивного шагового двигателя

Магнитный ротор (на рис. 4.30) вынесен отдельно и показан в укрупненном виде справа), стремясь занять положение минимума энергии, подобно магнитной стрелке компаса, будет сориентирован вдоль вертикальных «электромагнитов» (ротор займет положение, при котором его ось совпадет с вертикальной осью, проходящей через вертикальные катушки). Вертикальное положение ротора при этом будет зафиксировано, поскольку оно удерживается с определенной силой, определяемой магнитным потоком вертикальных катушек $\Phi_{\text{вк}}$.

Если теперь отключить напряжение с вертикальных катушек ($I_1=0$) и подать ток I_2 на горизонтальные катушки (второй такт на рис. 4.30), то

магнитный ротор, стремясь занять положение минимума энергии, будет ориентироваться вдоль горизонтальных «электромагнитов» и повернется по часовой стрелке на 90° , как показано на рис. 4.30. Ротор займет положение, при котором его ось совпадет с горизонтальной осью, проходящей через горизонтальные катушки) и будет удерживается в таком положении.

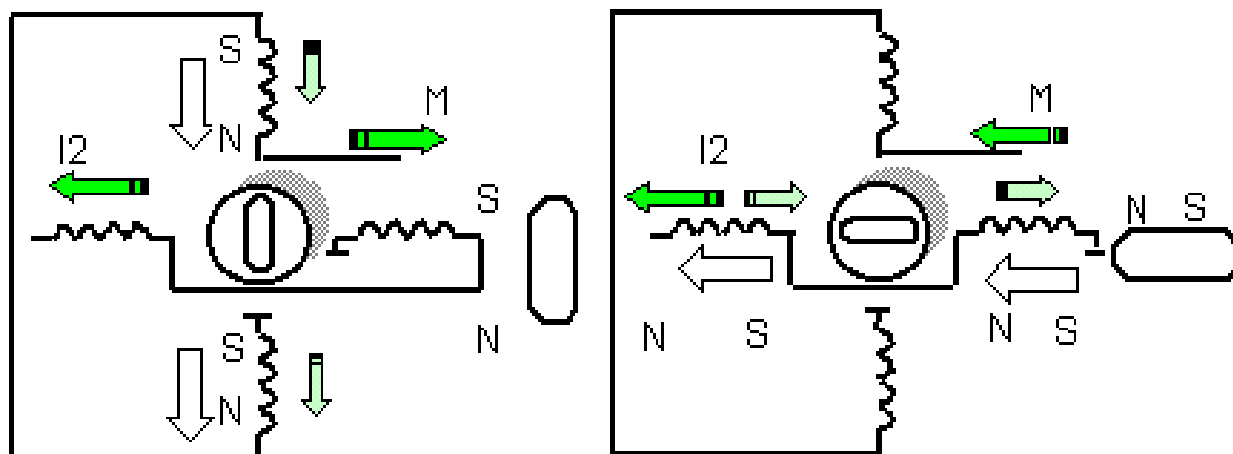


Рис. 4.31. Схема подачи управляющих сигналов на третьем (слева) и четвертом такте (справа) работы реверсивного шагового двигателя

При включении вертикальных катушек на напряжение обратной полярности и при отсутствии тока I_2 (третий такт на рис. 4.31) конфигурация магнитных полей такова, что ротор повернется относительно положения второго такта по часовой стрелке еще на 90° и займет положение под углом $минус 180^\circ (-90 - 90)$ к вертикали.

Если отключить напряжение с вертикальных катушек ($I_1=0$) и подать ток I_2 противоположного, по сравнению со вторым тактом, направления на горизонтальные катушки (четвертый такт на рис.4.31), то магнитный ротор, стремясь занять положение минимума энергии, повернется и займет положение, при котором его ось совпадет с горизонтальной осью, проходящей через горизонтальные катушки, и будет удерживается в таком положении. Относительно положения третьего такта ротор повернется по часовой стрелке на 90° и займет положение под углом $минус 270^\circ (-90 - 90-90)$ к вертикали.

При отсутствии тока I_2 и включении под постоянное напряжение вертикальных катушек, как при первом такте работы ШД, ротор займет

положение, при котором его ось совпадет с вертикальной осью, проходящей через вертикальные катушки.

Словесное описание управления ШД при вращении его по часовой стрелке, переключения обмоток, подачи напряжений удобно представить в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2

Описание управления ШД

	1 такт	2 такт	3 такт	4 такт	1 такт
Напряжение на вертикальных катушках U_1	+U	0	-U	0	+U
Напряжение на горизонтальных катушках U_2	0	+U	0	-U	0
Положение ротора	↑	→	↓	←	↑

Чтобы осуществить пошаговое вращение ротора против часовой стрелки напряжения должны быть такими, как указано в таблице 4.3

Таблица 4.3

Описание управления ШД при пошаговом вращении ротора против часовой стрелки

	1 такт	2 такт	3 такт	4 такт	1 такт
Напряжение на вертикальных катушках U_1	+U	0	-U	0	+U
Напряжение на горизонтальных катушках U_2	0	-U	0	+U	0
Положение ротора	↑	←	↓	→	↑

Описанное управление ШД является разнополярным: напряжение на катушках изменяется от -U до +U.

Более просты в управлении однополярные модели ШД, в которых напряжение управления изменяется от 0 до +U и для их функционирования на обмотки достаточно подать или не подать напряжение на обмотку. В них используются так называемая бифилярная обмотка (с от-

ведением от средней точки) и ШД как бы имеет по две обмотки для каждой фазы. Это дает возможность использовать четыре однополярных устройства управления на логических схемах для питания двух противоположно намотанных обмоток для каждой фазы.

В зависимости от конфигурации обмоток ШД делятся на биполярные и униполярные. Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, которая для изменения направления магнитного поля должна переполюсовываться драйвером (устройством управляющим двигателем). Для такого типа двигателя требуется мостовой драйвер, или полумостовой с двухполярным питанием. Всего биполярный двигатель имеет две обмотки и, соответственно, четыре вывода (рис. 4.32а).

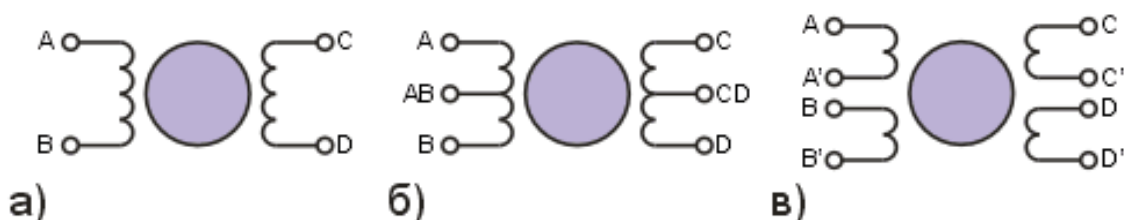


Рис. 4.32. Биполярный двигатель (а), униполярный (б) и четырех-обмоточный (в)

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод. Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, простым переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема драйвера. Драйвер должен иметь только 4 простых ключа. Таким образом, в униполярном двигателе используется другой способ изменения направления магнитного поля. Средние выводы обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов (рис. 4.33б). Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют 4-х фазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 4.33в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами тоже можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить

максимальной рассеиваемой мощности. Если сравнивать между собой биполярный и униполярный двигатели, то биполярный имеет более высокую удельную мощность. При одних и тех же размерах биполярные двигатели обеспечивают больший момент.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, пропорционален величине магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Путь для повышения магнитного поля – это увеличение тока или числа витков обмоток. Естественным ограничением при повышении тока обмоток является опасность насыщения железного сердечника. Однако на практике это ограничение действует редко. Гораздо более существенным является ограничение по нагреву двигателя вследствие омических потерь в обмотках. Как раз этот факт и демонстрирует одно из преимуществ биполярных двигателей. В униполярном двигателе в каждый момент времени используется лишь половина обмоток. Другая половина просто занимает место в окне сердечника, что вынуждает делать обмотки проводом меньшего диаметра. В то же время в биполярном двигателе всегда работают все обмотки, т.е. их использование оптимально. В таком двигателе сечение отдельных обмоток вдвое больше, а омическое сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в корень из двух раз при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, униполярный двигатель позволяет уменьшить габариты или просто работать с меньшими потерями. На практике часто применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно более простых схем управления обмотками. Это важно, если драйверы выполнены на дискретных компонентах. В настоящее время существуют специализированные микросхемы драйверов для биполярных двигателей, с использованием которых драйвер получается не сложнее, чем для униполярного двигателя.

Для управления фазами шаговых двигателей существует несколько способов.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутации фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 4.33). Этот способ называют "one phase on" full step или wave drive mode. Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естественными» точками равновесия ротора у не запитанного двигателя. Недостатком этого способа управления является то, что для биполярного двигателя в один и тот же момент времени используется

50% обмоток, а для униполярного – только 25%. Это означает, что в таком режиме не может быть получен полный момент.

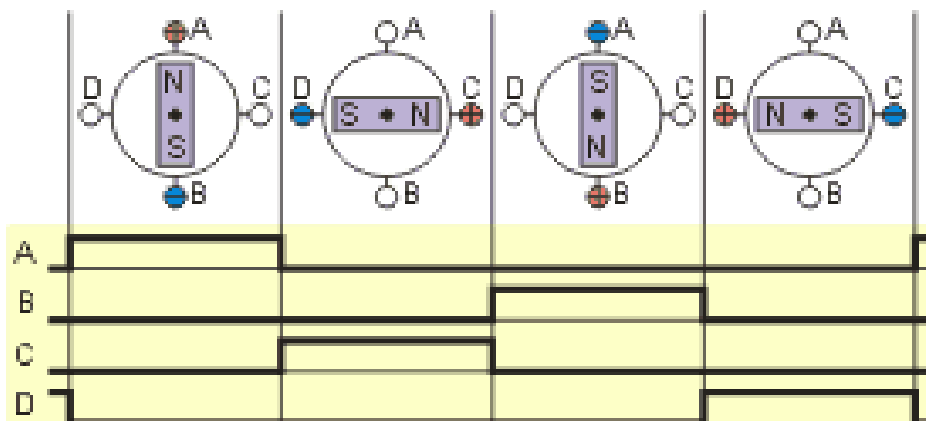
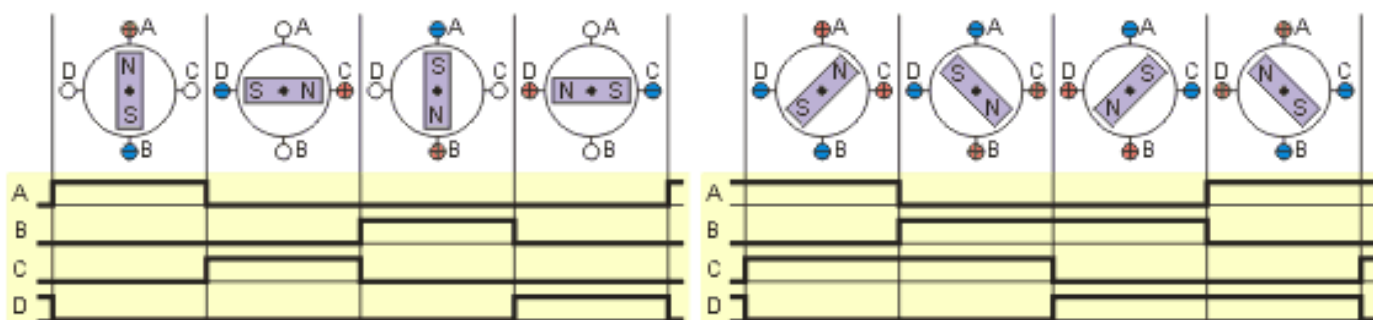
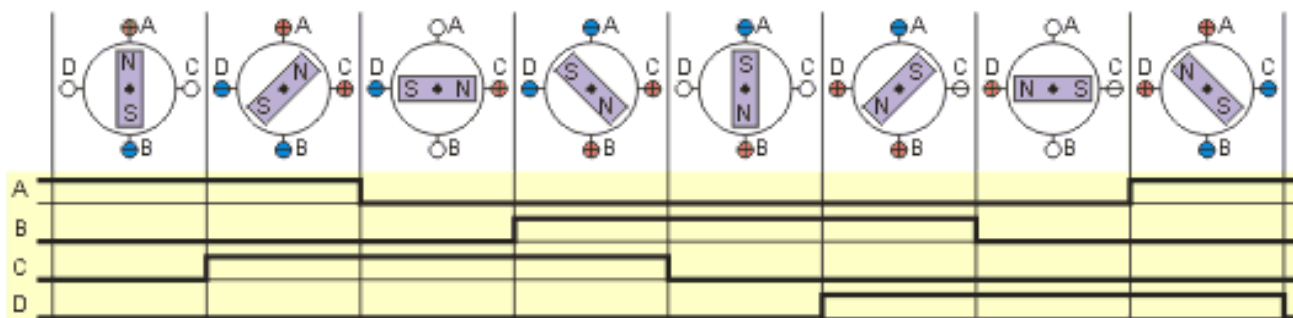


Рис. 4.33. Способ управления фазами шагового двигателя (полношаговый режим, "one phase on" full step или wave drive mode)



а) полношаговый режим, включена одна фаза, "one phase on" full step (wave drive mode)

б) полношаговый режим, включены две фазы, "two-phase-on" full step (full step mode)



в) полушаговый режим, "one and two-phase-on" half step (half step mode)

Рис. 4.34. Способы управления фазами шагового двигателя.

Второй способ - управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. Его называют "two-phase-on" full step

или просто full step mode. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (4.35) и обеспечивается примерно на 40% больший момент, чем в случае одной включенной фазы. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на пол-шага.

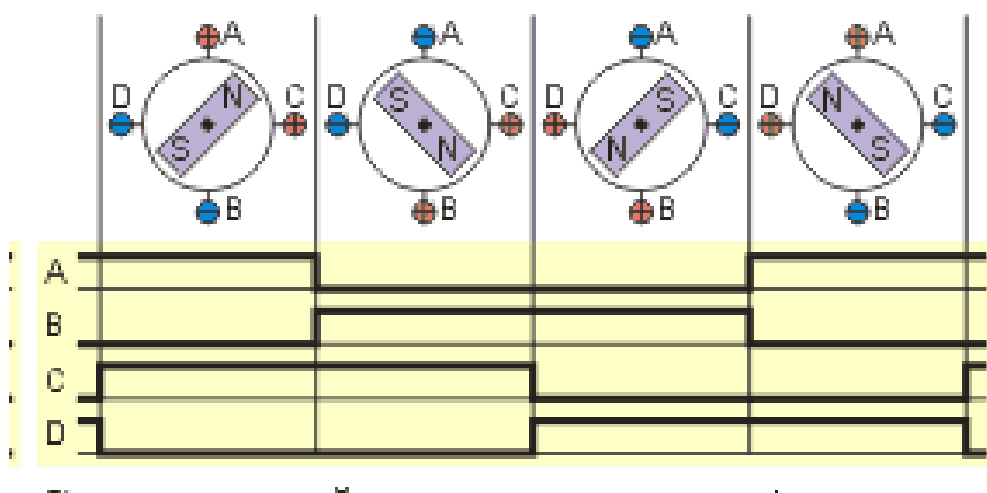


Рис. 4.35. Способ управления фазами шагового двигателя (полношаговый режим, "two-phase-on" full step или просто full step mode)

Третий способ (рис. 4.36) является комбинацией первых двух и называется полушаговым режимом, "one and two-phase-on" half step или просто half step mode, когда двигатель делает шаг в половину основного.

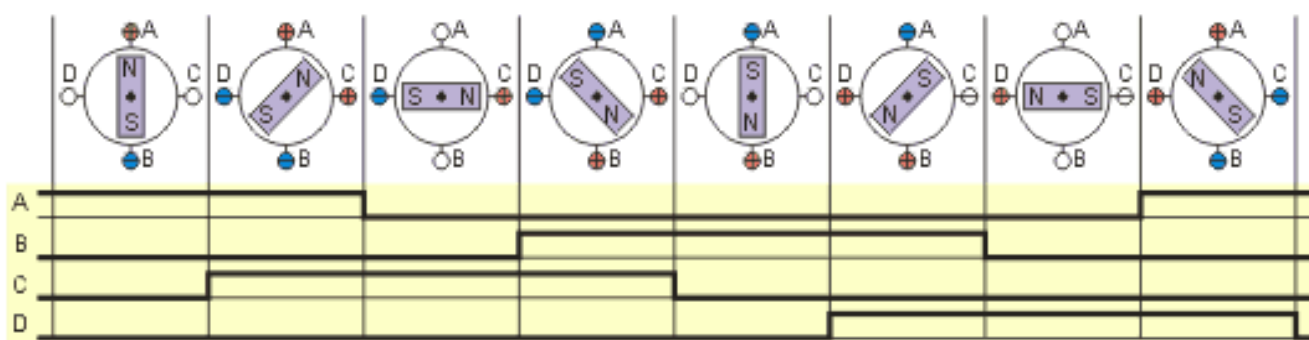


Рис. 4.36. Способ управления фазами шагового двигателя (полушаговый режим, "one and two-phase-on" half step или просто half step mode)

Этот метод управления достаточно распространен, так как двигатель с меньшим шагом стоит дороже и очень заманчиво получить от 100-шагового двигателя 200 шагов на оборот. Каждый второй шаг запитан лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две (рис. 4.36). В результате угловое перемещение ротора составляет половину угла шага для первых двух способов управления. Кроме уменьшения размера шага этот способ управления позволяет частично избавиться от явления резонанса. Полушаговый режим обычно не позволяет получить полный момент, хотя наиболее совершенные драйверы реализуют модифицированный полушаговый режим, в котором двигатель обеспечивает практически полный момент, при этом рассеиваемая мощность не превышает номинальной.

Еще один способ управления называется микрошаговым режимом или *micro stepping mode*. При этом способе управления ток в фазах нужно менять небольшими шагами, обеспечивая, таким образом, дробление половинного шага на еще меньшие микрошаги. Когда одновременно включены две фазы, но их токи не равны, то положение равновесия ротора будет лежать не в середине шага, а в другом месте, определяемом соотношением токов фаз. Меняя это соотношение, можно обеспечить некоторое количество микрошагов внутри одного шага. Кроме увеличения разрешающей способности, микрошаговый режим имеет и другие преимущества, которые будут описаны ниже. Вместе с тем, для реализации микрошагового режима требуются значительно более сложные драйверы, позволяющие задавать ток в обмотках с необходимой дискретностью. Полушаговый режим является частным случаем микрошагового режима, но он не требует формирования ступенчатого тока питания катушек, поэтому часто реализуется.

Во многих приложениях, где требуются малые относительные перемещения и высокая разрешающая способность, микрошаговый режим способен заменить механический редуктор. Часто простота системы является решающим фактором, даже если при этом придется применить двигатель больших габаритов. Несмотря на то, что драйвер, обеспечивающий микрошаговый режим, намного сложнее обычного драйвера, всё равно система может оказаться более простой и дешевой, чем шаговый двигатель, плюс редуктор. Современные микроконтроллеры иногда имеют встроенные ЦАПы, которые можно использовать для реализации микрошагового режима взамен специальных контроллеров. Это

позволяет сделать практически одинаковой стоимость оборудования для полношагового и микрошагового режимов. Иногда микрошаговый режим используется для увеличения точности величины шага сверх заявленной производителем двигателя. При этом используется номинальное число шагов. Для повышения точности используется коррекция положения ротора в точках равновесия. Для этого сначала снимают характеристику для конкретного двигателя, а затем, изменяя соотношение токов в фазах, корректируют положение ротора индивидуально для каждого шага. Такой метод требует предварительной калибровки и дополнительных ресурсов управляющего микроконтроллера. Кроме того, требуется датчик начального положения ротора для синхронизации его положения с таблицей корректирующих коэффициентов.

На практике при осуществлении каждого шага ротор не сразу останавливается в новом положении равновесия, а осуществляет затухающие колебания вокруг положения равновесия (рис.4.37). Время установления зависит от характеристик нагрузки и от схемы драйвера. Во многих приложениях такие колебания являются нежелательными. Избавиться от этого явления можно путем использования микрошагового режима.

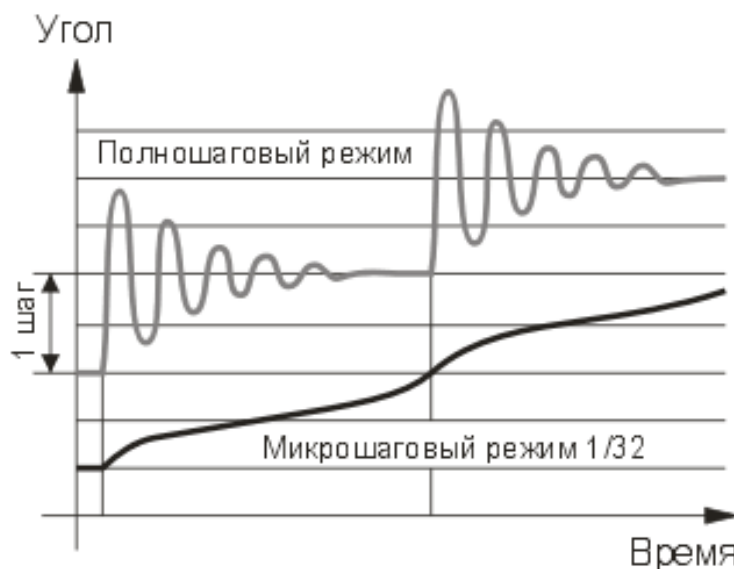


Рис. 4.37. Перемещения ротора в полношаговом и микрошаговом режимах

Обычно производители шаговых двигателей указывают такой параметр, как точность шага. Точность шага указывается для положений

равновесия ротора при двух включенных фазах, токи которых равны. Это соответствует полношаговому режиму с перекрытием фаз. Для микрошагового режима, когда токи фаз не равны, никаких данных обычно не приводится.

Конструкция некоторых двигателей оптимизирована для наилучшей точности в полношаговом режиме и максимального момента удержания. Специальная форма зубцов ротора и статора спроектирована так, чтобы в положении равновесия для полношагового режима магнитный поток сильно возрастал. Это приводит к ухудшению точности в микрошаговом режиме. Лучшие результаты позволяют получить двигатели, у которых момент удержания в обесточенном состоянии меньше.

Отклонения можно разделить на два вида: отклонения величины магнитного поля, которые приводят к отклонениям момента удержания в микрошаговом режиме и отклонения направления магнитного поля, которые приводят к отклонениям положения равновесия. Отклонения момента удержания в микрошаговом режиме обычно составляют 10 – 30% от максимального момента. Нужно сказать, что и в полношаговом режиме момент удержания может колебаться на 10 – 20 % вследствие искажений геометрии ротора и статора.

Если измерить положения равновесия ротора при вращении двигателя по и против часовой стрелки, то получатся несколько разные результаты. Этот гистерезис связан в первую очередь с магнитным гистерезисом материала сердечника, хотя свой вклад вносит и трение. Магнитный гистерезис приводит к тому, что магнитный поток зависит не только от тока обмоток, но и от предыдущего его значения. Погрешность, создаваемая гистерезисом может быть равна нескольким микрошкагам. Поэтому в высокоточных приложениях при движении в одном из направлений нужно проходить за желаемую позицию, а затем возвращаться назад, чтобы подход к нужной позиции всегда осуществлялся в одном направлении.

Итак, как следует из сказанного, для того чтобы ротор ШД начал поворачиваться, на обмотки необходимо подать последовательности упорядоченных импульсов. При этом ротор ШД вращается скачками (шагами) осуществляя угловое перемещение, размер которого зависит от типа двигателя. При этом точность положения гарантируется, достаточно лишь определить, сколько импульсов надо подать на двигатель и в какой последовательности, чтобы повернуть его на нужный угол. Под-

бирая последовательность импульсов можно заставить ШД вращаться («шагать») по часовой стрелке или в противоположном направлении.

Каждый «шаг», в принципе, при большом числе полюсов, может составлять лишь одну сотую от полного оборота. Поэтому установку углового положения можно осуществлять с очень большой точностью и за относительно быстрое время (скорость углового перемещения может достигать до 1000 шагов в секунду). Исключительно точное линейное движение можно получить используя ходовой винт на валу шагового двигателя. При этом десятки тысяч шагов могут быть выполнены с точностью до отдельного шага.

Ввиду того, что угол поворота представляет собой дискретное значение, для хранения данных о том, на какой угол требуется осуществить поворот можно использовать устройства цифровой памяти

ШД можно заставить вращаться как обычный двигатель, как говорят в режиме «свободного хода» с определенной угловой скоростью. Для этого нужно формировать определенную периодическую последовательность управляющих импульсов, позволяющую реализовать «бегущую волну».

Для того, чтобы формировать необходимые управляющие последовательности импульсных сигналов используют логические микросхемы. Чаще всего для управления шаговыми двигателями выпускают специализированные интегральные микросхемы. В состав такой микросхемы, как правило, входит реверсивный счетчик импульсов, регистр требуемого положения и цифровой компаратор. Сравнивая в двоичном коде значения требуемого положения, записанные в регистре положения, со значениями счетчика цифровой компаратор вырабатывает сигнал, определяющий направления вращения двигателя. Этот сигнал поступает на реверсивный счетчик, который, используя импульсы тактового генератора, формирует на своих разрядах управляющие сигналы для обмоток. Эти управляющие сигналы, посредством усилителей мощности (формирователей тока) подаются на обмотки. Ротор шагового двигателя начинает вращаться в направлении, обеспечивающем наименьшее количество шагов.

Обычно с ШД соединен кодовый датчик положения ротора. Он вырабатывает логические сигналы, позволяющие фиксировать положение ротора. При включении ШД, используя данные кодового датчика положения, в счетчик записывается информация о начальном положении ро-

тора (устанавливается содержимое счетчика соответствующее положению ротора в двоичном коде).

В схему управления ШД могут быть включены шифраторы приращений, которые позволяют при подходе к заданному положению замедлять вращение ротора и « плавно» останавливаться в заданном положении.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано действие асинхронного двигателя?
2. Поясните способ получения вращающегося магнитного поля с помощью трех катушек.
3. Поясните способ получения пульсирующего магнитного поля с помощью катушек с током
4. Почему сердечник статора набирают из листов электротехнической стали?
5. Приведите и поясните упрощенное изображение статора асинхронного двигателя.
6. Приведите и поясните упрощенное изображение ротора асинхронного двигателя
7. Приведите и поясните упрощенное изображение асинхронного электродвигателя и направление вращения магнитного поля статора.
8. Назовите основные характеристики и параметры асинхронных двигателей.
9. Приведите и поясните график зависимости момента от скольжения и механическую характеристику асинхронного двигателя.
10. Какие отрицательные явления наблюдаются при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором сравнительно небольшой мощности при прямом подключении обмотки статора к сети переменного тока?
11. Приведите и поясните основные схемы для проведения пуска асинхронных двигателей
12. Приведите и поясните основные способы и схемы включения трехфазного двигателя в однофазную цепь переменного напряжения.
13. Приведите и поясните упрощенное изображение асинхронного двигателя с фазным ротором.

14. На какие 5 групп подразделяются в зависимости от использования вспомогательной обмотки и от фазосдвигающего элемента асинхронные микродвигатели?
15. Приведите и поясните графики вращающих моментов однофазного асинхронного двигателя,
16. Приведите и поясните схему включения однофазного асинхронного двигателя.
17. В чем заключается принципиальное отличие синхронного двигателя от асинхронного?
18. Как может быть исполнен ротор синхронного двигателя?
19. Где обычно применяются синхронные двигатели?
20. Что такое синхронные микродвигатели с постоянными магнитами и где они применяются?
21. В чем заключаются особенности двигателей радиальной конструкции?
22. В чем заключаются положительные свойства синхронных двигателей с постоянными магнитами?
23. Что такое шаговые двигатели?
24. Приведите и поясните упрощенное изображение простейшего шагового двигателя.
25. Назовите способы управления фазами шаговых двигателей.

5. ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С МИКРОКОНТРОЛЛЕРАМИ

В своей будничной жизни мы часто пользуемся электромеханическим и электронным оборудованием, совсем не задумываясь над принципами, положенными в основу его работы, не обращая внимания на то, какие функции оно выполняет. К примеру, подходя к лифту и нажимая кнопку вызова, мы чаще всего размышляем о своих проблемах, которые нам предстоит сегодня решать, нежели думаем о том, что происходит, когда, без непосредственного участия человека, кабина лифта подъезжает на требуемый этаж и открывается дверь. Мы знаем, что есть некая «автоматика», которая направит кабину лифта на требуемый этаж, затормозит ее движение, зафиксирует его у дверей, откроет двери и т.д. Эта же «автоматика» закроет двери лифта, доставит нас на нужный этаж, откроет дверь и, выждав определенное время, закроет двери пустой кабины лифта и перейдет к ожиданию следующего вызова.

Это лишь один из примеров, когда «автоматика» управляет объектом, которым пользуется человек. В настоящее время в быту, в промышленности, в других отраслях функционируют десятки тысяч подобных систем автоматического управления объектами и различного рода технологическими процессами.

Системы управления появились в период первой промышленной революции, когда осуществлялась замена физического труда человека работой паровых машин. Применение паровых машин, использующих большие потоки энергии, привело к пониманию того, что для того, чтобы машины работали эффективно и благополучно этой энергией нужно управлять и, при этом, желательно «автоматически», без участия человека. Так появились автоматический регулятор уровня воды в котле паровой машины, изобретенный И.И. Ползуновым в 1765 году, и центробежный регулятор, изобретенный в 1784 году английским механиком Джеймсом Уайтом (регулятор Уайта), который обеспечивал постоянство угловой скорости вращения вала паровой машины (чуть позже, гидравлической турбины или дизельной установки).

Со временем выяснилось, что многие машины нуждаются в постоянном автоматическом управлении. Были изобретены и начали применяться многие другие управляющие автоматические системы, улуч-

шившие качество работы машин и освободивших человека от выполнения монотонных функций умственной и физической деятельности. Главные шаги в развитии систем управления происходили в критические исторические моменты (Вторая мировая война, выход в космос, экономическая глобализация). Каждый из этих периодов был связан с соответствующим бурным развитием теории управления. Современные системы автоматического управления (САУ) это ключ для совершенствования технологий, обеспечивающих улучшенное качество изделий, минимизацию потерь, увеличение производительности для установленного оборудования, более высокие запасы безопасности, защиту окружающей среды. Современные САУ обеспечивают высокую точность обработки сигналов управления в условиях действия различных возмущений и помех.

В настоящее время особая роль отводится микроэлектронике и вычислительной технике, использование которых в САУ обеспечивает резкий скачок их возможностей. При их применении улучшаются не только точностные характеристики САУ, повышаются надежность и отказоустойчивость, но и САУ приобретает принципиально новые свойства. Особенно эффективным оказывается использование в САУ микроконтроллеров. Такие цифровые управляющие устройства, выполненные по интегральной технологии и располагающиеся на миниатюрном полупроводниковом кристалле, легко встраиваются в любой объект, будь то станок, технологическая линия, оборудование для изготовления печатной продукции, научный прибор или автомобиль, придавая всему качества автоматической системы и повышая уровень его «интеллекта». Программируемость микроконтроллера определяет возможность гибкой оперативной перестройки как алгоритма их работы, так и структуры САУ с целью приспособления их к изменяющимся условиям работы. Выгоды от внедрения САУ с микроконтроллерами огромны. Они включают принципиальные изменения качества оборудования, повышение его производительности, уменьшение потребления энергии, минимизацию материальных затрат, повышение уровня безопасности и сокращение загрязнение окружающей среды. По прогнозам специалистов преимущества САУ с микроконтроллерами сделают такие системы основными в ближайшем будущем.

К настоящему времени накоплен значительный багаж знаний и опыта по САУ, по эксплуатации систем управления с микроконтролле-

рами. Охватить весь этот материал в рамках одной лекции не представляется возможным. К тому же следует иметь в виду, что основная трудность состоит и в том, что идеи САУ имеют весьма сложный математический аппарат. По этой причине изучение современных, весьма сложных для понимания, САУ мы ограничим тем, что введем в рассмотрение важнейшие определения и понятия теории автоматического управления.

Затем мы приступим к изучению общих вопросов, касающихся построения, структуры самых распространенных микроконтроллеров. Мы сконцентрируем свое внимание на некоторых общих аспектах построения и работы микроконтроллеров. Этот материал предназначен для изучения основ работы современных САУ с микроконтроллерами.

В заключение мы кратко коснемся вопросов построения и использования САУ с микроконтроллерами для управления электродвигателями. Снижение энергопотребления и уровня шума, удовлетворение все возрастающих требований к электроприводу по диапазону регулирования скорости и момента, быстроедействие и качеству управления обуславливают применение контроллеров, реализующих сложные алгоритмы управления.

5.1. Общие сведения о системах автоматического управления

5.1.1. Задачи управления и общие положения, определяющие принципы построения САУ

Слово «управление» Вы наверно не раз слышали в своей жизни. При этом каждый специалист, если говорить об автоматическом управлении, обычно рассматривают управление каким – то объектом со своей точки зрения. Соответственно, используются и свои категории, в терминах которых рассматривается то, чем надо управлять. К примеру, механик обращает внимание на механические компоненты, из которых собран объект. Специалист по вычислительной технике думает о прикладном программном обеспечении, о компонентах вычислительной системы. Инженер по системам управления оперирует такими абстрактными терминами как объект, сигнал, элементы системы, динамические отклики блока на тестовые воздействия и т. п. По этой причине, чтобы целостным взглядом охватить САУ, рассмотрим из каких «блоков» она состоит и какими общими понятиями пользуются для ее характеристики.

САУ, в самом первом приближении, состоит из управляемого объекта и управляющего устройства. Поэтому поговорим о них подробнее.

Управляемый объект (объект управления) это совокупность технических средств (изделий, машин, аппаратов, устройств и т.п.), которая нуждается в оказании специально организованного на нее воздействия извне для достижения поставленной цели управления.

На практике приходится иметь дело с объектами самой различной физической природы. В качестве объекта управления, к примеру, может выступать электронный стабилизатор напряжения. Цель управления таким объектом – обеспечение постоянства напряжения на выходе при изменении напряжения на входе, при варьировании температурных и климатических условий. Управляемым объектом может быть электродвигатель. Целью управления для него может быть поддержание постоянной скорости вращения вала при набросе и сбросе нагрузки на валу. Объектом управления повышенной сложности может быть ракета. Цель управления ею состоит в том, чтобы «навести» ее на цель и обеспечить поражение цели.

Понятно, что физическая природа объекта – существенный момент в теории управления. Это требует знания фактов, относящихся к изучаемым явлениям, фундаментальных физических законов, определяющих процессы, протекающие в объектах. Важно представлять строение объекта, как он функционирует, каковы энергетические и информационные потоки в нем, как достигается энергетический баланс и т. д. Вместе с тем, несомненно, в теории управления важнейшую роль играет математическая модель объекта. Чтобы управление стало наукой, всегда за физическим описанием объекта следует вторая фаза абстрагирования – количественное описание объекта. Известно высказывание Иммануила Канта: «во всякой науке столько истины, сколько в ней математики».

Математическая модель (ММ) – это приближенное, формальное описание изучаемого объекта с помощью математических средств, выраженное с помощью математической символики. Переход от физической к математической модели позволяет проводить изучение объекта с помощью абстрактных представлений и количественной формализации. При этом очень многие объекты, представленные ММ, лишившись физической и технической оболочки, приобретают универсальность. Универсальные ММ способны количественно описывать различные по своей природе процессов или по техническому назначению объектов. Одна

и та же ММ может быть использована для решения большого числа частных, универсальных задач.

Для представления ММ объекта часто пользуются понятием оператора, который как бы выделяет наиболее существенные свойства и признаки объекта и математически характеризует поведение реального объекта. Под понятием оператора объединяются любые математические операции: все алгебраические действия, дифференцирование, интегрирование, решение дифференциальных, интегральных алгебраических и любых других функциональных уравнений. В простейшем случае ММ объекта класса SISO характеризуется входной функцией $U_{ВХ}(t)$ и выходной - $U_{ВЫХ}(t)$. Зависимость выходной функции $U_{ВЫХ}(t)$ (выходного сигнала) от входной $U_{ВХ}(t)$ и состояния объекта определяет алгоритм функционирования объекта. Математическая формализация этой зависимости, то есть установление как можно более точного соответствия между этими функциями является ключевой задачей описания объектов.

Если объект можно моделировать в линейном приближении, то он представляется в виде линейных дифференциальных уравнений. Преобразовать эти линейные, дифференциальные уравнения в алгебраические (перейти из временной области в s – область), и, тем самым, намного упростить изучение объекта, позволяет, как Вам известно, преобразование Лапласа. В этом случае очень удобны для использования передаточные функции.

Физические величины объекта, которые независимо от внешних условий преднамеренно изменяются по какому то требуемому закону или сохраняются неизменными в процессе управления, называются управляемыми или регулируемыми величинами. Регулируемые величины часто называются фазовыми координатами объекта, в отличие от его параметров, которые считаются заданными. Если управляемый объект характеризуется одной управляемой величиной $U_{ВЫХ}(t)$ и одним управляющим воздействием $U_{ВХ}(t)$, то он называется простым. Как Вам уже известно, его обозначают прямоугольником (черным ящиком класса SISO), а сигналы (управляемые и управляющие) стрелками. Из сказанного можно сформулировать простейшую задачу управления: управлять объектом (преднамеренно воздействовать на объект, обеспечивая достижение определенной цели) – это значит вырабатывать управляющее воздействие $U_{ВХ}(t)$ с таким расчетом, чтобы регулируемая величина $U_{ВЫХ}(t)$ изменялась по требуемому закону с определенной точностью.

Управляющее устройство формирует «команды», которые, поступая на объект, изменяют протекающие в нем процессы в направлении достижения поставленной цели.

Из-за старения и износа элементов объекта, колебаний температуры и других причин свойства объекта могут меняться. Поэтому качество рассмотренного ранее простого управления, без учета того, что на самом деле происходит с объектом, будет не высоким. Известно утверждение, что если Вы действительно чем-то хотите управлять, то Вы должны это что-то научиться измерять. Эта фраза говорит о том, что важной частью решения задач управления является организация соответствующих измерений (предлагаем читателю сделать попытку удержать в вертикальном положении на конце пальца карандаш с открытыми и закрытыми глазами). «Глазами» системы управления, позволяющими видеть, что в ней происходит, являются датчики. В общем случае необходима измерительная система, позволяющая получать информацию о текущих значениях параметров, характеризующих процессы в объекте. Обычно в состав управляющего устройства входит (или выполняется отдельно) блок (система) получения информации о текущих значениях параметров, характеризующих процессы в объекте (измерительный блок).

Если датчики используются для определения состояния объекта и выявления отличия его поведения от желаемого, то естественно возникает задача так воздействовать на объект, чтобы привести его из текущего состояния в желаемое. Иначе говоря, помимо «глаз» системе управления нужны «мускулы». Следовательно, необходим еще один элемент САУ – исполнительное устройство (регулирующий, управляющий орган). Необходимость в таком элементе САУ обусловлена тем, что сигналы, поступающие от датчиков или измерительного устройства, как известно, имеют малую мощность, которой недостаточно для воздействия на объект. На него должны поступать достаточно мощные воздействия. Следовательно, для осуществления управления к объекту должен быть подсоединен регулирующий орган (исполнительное устройство), варьируя которым можно воздействовать на объект с достаточной энергией. Исполнительное устройство в этом случае обеспечит процесс управления, т. е. целенаправленное воздействие на объект, приводящее к желаемому изменению управляемой переменной.

Итак, в более общем понимании, содержательное определение системы управления: автоматическую систему управления образуют

управляемый объект вместе с присоединенными к нему управляющим устройством, измерительным блоком и исполнительным устройством.

Построение системы управления основывается также на ряде общих, как говорят, фундаментальных принципов, касающихся того, как соединять между собой элементы или, другими словами, структуры системы управления. Было доказано, что так называемые разомкнутые САУ, у которых управляющий сигнал не зависит от того, что фактически происходит в объекте, не могут обеспечить высокого качества управления. Поэтому для всех современных САУ, основывающихся на принципах кибернетики (науки об управлении, передачи и переработки информации), отличительной чертой является поступление на вход системы так называемой «обратной информации» или, как еще говорят, наличие обратной связи (ОС). При наличии ОС информация о состоянии управляемого объекта передается с выхода системы на вход управляющего устройства. При управлении с ОС значение управляющей переменной постоянно сопоставляется с ее заданным (эталонным) значением и цель управления - сделать эти величины близкими (в известном смысле) несмотря на различные помехи.

Итак, изложенное выше, позволяет представить типовую функциональную схему (символическое изображение всех функциональных элементов и связей между ними) системы автоматического управления в следующем виде (рис. 5.1).

Функциональное назначение каждого из элементов схемы состоит в следующем.

Задающее устройство преобразует желаемое значение поведения объекта управления в сигнал $U_{ВХ}(t)$. Управляемая переменная на выходе САУ $U_{ВЫХ}(t)$. Сравнивающее устройство, путем сравнения сигнала $U_{ВХ}(t)$ и управляемой величины $U_{ВЫХ}(t)$ (предполагается, что датчики не искажают сигнал $U_{ВЫХ}(t)$), вырабатывает сигнал ошибки $e(t)$. Иногда сравнивающее устройство называют датчиком ошибки, отклонения или рассогласования. В хорошо спроектированной САУ ошибка $e(t)$ мала, поэтому следующий блок (усилитель) усиливает мощность сигнала ошибки и подает сигнал на исполнительное устройство. Оно предназначено для осуществления воздействия на управляемый объект. В качестве исполнительных могут использоваться электрические, пневматические, гидравлические устройства. Электрические исполнительные устройства

достаточно универсальны в применении и отличаются простотой управления и канализации подводимой к ним энергии.

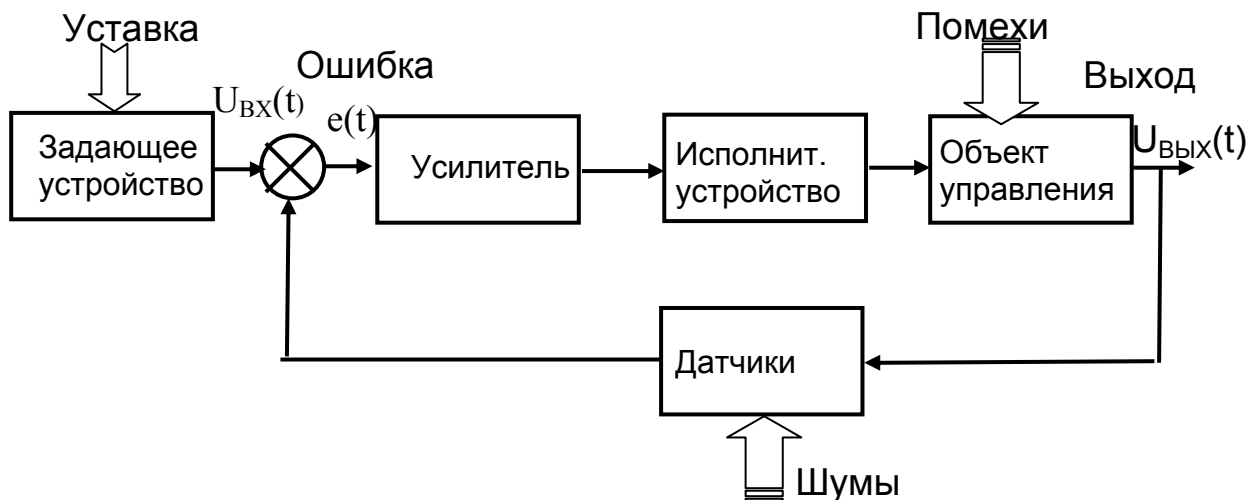


Рис. 5.1. Типовая функциональная схема САУ

Элемент схемы, который подвергается управлению, как отмечалось ранее, называют объектом управления. В связи с большим разнообразием объектов управления разными могут быть и управляемые переменные: напряжение, число оборотов вала электродвигателя, момент на валу электродвигателя, мощность и т. д.

Помимо указанных элементов, без которых принципиально невозможно управление, для придания, желательных свойств САУ, обеспечивающих высокое качество управления, в функциональной схеме могут быть и другие элементы.

Отметим, далее, следующие важные моменты, касающиеся работы САУ.

Из рассмотрения рис. 5.1 можно утверждать, что, в общем случае, САУ представляет собой замкнутую систему, преобразующую сигнал на ее входе в воздействие, прикладываемое к объекту управления, и реагирующую на сигнал ошибки. Изменения управляющих величин вызывают не только управляющие сигналы, но и возмущающие воздействия (помехи, шумы), приложенные в соответствующих точках системы управления. Возмущение стремится нарушить требуемую функциональную связь между управляющим воздействием и управляемой переменной. К примеру, для электродвигателя возмущающими воздействиями

могут быть момент нагрузки, приложенный к валу электродвигателя, или изменение напряжения в обмотке возбуждения последнего.

Сигнал, который поступает с выхода САУ на ее вход, как уже отмечалось, называют сигналом обратной связи, а разность между входным сигналом и сигналом обратной связи – сигналом ошибки. При введении отрицательной обратной связи САУ слабо реагирует на возмущающие воздействия и подчиняется главным образом управляющему сигналу. Иначе говоря, замкнутая САУ по существу представляет собой фильтр, который достаточно точно воспроизводит управляющее воздействие и подавляет возмущающее. Это означает также, что выходной сигнал может оказать влияние на формирование ошибки на выходе элемента сравнения только через обратную связь.

Для САУ также характерно следующее.

Слабые управляющие сигналы на входе, идущие от измерительного устройства, преобразуются в достаточно мощные воздействия на объект.

Ошибка $e(t)$ является стимулом в САУ для того, чтобы уменьшить эту ошибку.

САУ, в зависимости от характера изменения входного (задающего) управляющего сигнала $U_{вх}(t)$ или, другими словами, от фундаментального принципа управления, лежащего в основе их работы, могут быть подразделены на три основных типа.

А. Системы автоматической стабилизации (или системы автоматического регулирования). В них управляющие воздействия представляют собой заданные постоянные величины (уставки).

Б. Системы программного управления. В них управляющие воздействия являются известными функциями времени (изменяются по программе).

В. Следящие системы. В них задающее воздействие представляет собой заранее неизвестные функции времени.

Широко используемой в электронике САУ является система автоматической стабилизации (автоматического регулирования) угловой скорости электродвигателя. Системы такого типа очень важны для обеспечения работы видеоманитрофонов, накопителей информации на жестких дисках, оборудования изготовления печатной продукции. Постоянное значение, которое имеет входной сигнал, называется настрой-

кой (уставкой) автоматического регулятора. Уставке соответствует требуемое значение регулируемой скорости объекта.

Система автоматического управления процессом трогания электродвигателя и поддержания необходимого режима его разгона (торможения) до нужной скорости является системой программного управления. При этом закон изменения скорости является известной функцией. Обычно в таких случаях закон изменения скорости, как и цель управления, формулируют не специалисты по теории управления, а технологи или специалисты в той области техники, в которой необходимо применить управление. Они также формулируют желаемое поведение объекта и параметры для работы САУ: точность, с которой выходные сигналы должны поддерживаться равными их желаемым значениям; допустимый уровень помех и шумов, изменений параметров объекта.

Приведем в качестве еще одного характерного примера САУ в устройствах считывания/записи информации с оптических дисков различных стандартов CD-R/CD-RW, DVD-ROM/RW. В отличие от хорошо известного граммофона, в котором считывающая игла механически следовала по дорожке, для работы оптических дисковых систем, использующих сфокусированный лазерный луч (диаметром 1,5 мкм) и бесконтактное считывание информации с дорожки, образуемой множеством микроскопических углублений – питов (глубиной 0,12 мкм, шириной 0,4 мкм и длиной примерно 1 мкм), необходимы, по крайней мере, следующие САУ. Чтобы обеспечить позиционирование (смещение) луча в заданную точку поверхности диска и перемещение объектива по вертикали для обеспечения глубины резкости, требуется автоматическая система регулирования положения объектива, которая бы позиционировала луч лазера и следила за фокусировкой в вертикальной плоскости. Так как при вращении оптического диска помимо вертикальных биений (отклонений от заданной траектории), имеют место радиальные биения, то требуются САУ радиального слежения за дорожкой. Необходима также система регулирования угловой скорости вращения оптического диска.

Типовая функциональная схема, показанная на рис. 5.1, не всегда может обеспечивать заданное качество управления. Это следует из того, что в ней, сигнал ошибки непосредственно подается на усилитель. Казалось бы, чем больше будет коэффициент усиления усилителя, тем точнее будет осуществляться управление. На самом деле это не всегда так.

Известно, что при больших коэффициентах усиления возникает неустойчивость сигнала на выходе усилителя и САУ может перейти в режим колебаний. По этой причине простой по реализации так называемый закон пропорционального регулирования не всегда приемлем на практике. Чтобы минимизировать ошибку и сохранить устойчивость в САУ вводят интегрирующее звено. В этом случае явление неустойчивости пропадает, а сигнал, подаваемый на исполнительное устройство, зависит как от степени усиления, так и от параметров интегрирования. Однако и такому пропорционально – интегральному (ПИ) закону работы САУ присущ недостаток – малая чувствительность к быстрым изменениям управляющего сигнала. По этой причине в контур управления вводят еще один блок, который дает производную от поступающего на его вход сигнала, и формируют пропорционально – интегрально – дифференциальный (ПИД) закон управления. Решение задачи получения лучших свойств у системы управления в этом случае сводится к подбору соответствующих коэффициентов усиления, постоянных интегрирования и дифференцирования. Схемотехнически реализовать вместо одного усилителя ПИД – регулятор возможно несколькими относительно простыми способами.

Следует также учитывать, что исполнительные механизмы (ИМ), на практике, всегда являются источниками ограничений в функционировании САУ. Так, в частности, они инерционны, поэтому исполнительные механизмы обладают ограниченной максимальной скоростью, с которой они могут выполнять регулирование. На САУ также оказывают влияния минимальные «перемещения» исполнительного механизма. При наличии явления трения ИМ говорят «залипает». Когда ИМ находится в таком состоянии, интегратор САУ будет накапливать выходную величину, пока не образуется достаточное усилие, чтобы преодолеть «трение». Эта проблема ведет к возникновению автоколебаний, поскольку ИМ проходит такой цикл: залипание, перемещение, залипание, перемещение и т. д. Подобного рода колебания, к примеру, в печатном оборудовании будут приводить в «смазыванию» изображений, поэтому их соответствующими методами устраняют.

При работе САУ бывают ситуации, когда затруднительно получить информацию о возможном режиме функционирования системы и, следовательно, добиться удовлетворительной работы САУ в условиях малопредсказуемых внешних воздействий и некоторой нестабильности

собственных параметров объекта. В таких случаях создают САУ, способную функционировать при действии предельных возмущений, т.е. такую САУ, чтобы качество ее работы не опускалось ниже допустимого уровня. Подобные САУ получили название робастных (от англ. robust – грубый). Помочь решению проблемы функционирования САУ в условиях сильной неопределенности может помочь также использование принципов адаптивного управления.

Многие объекты управления имеют один вход и один выход (так называемые SISO объекты). В них относительно просто выделить контур управления, обратные связи, реализовать ПИД – управление. Вместе с тем, в ряде случаев объект управления может иметь несколько входов и выходов, причем между ними имеет место взаимодействие, которое уже нельзя игнорировать. В этом случае анализируются так называемые MIMO (multi – input multi – output, MIMO) системы управления.

Описание MIMO систем управления и их анализ намного сложнее, чем в SISO объектах. Главная трудность в MIMO – объектах, что приходится работать с матрицами и описывать САУ, используя идеи так называемого пространства состояний.

Заключая общее представление САУ, отметим, что в современном оборудовании всегда имеются объекты, управляемые с помощью САУ. Описание функционирования их представляется весьма сложной теорией управления. Существуют специалисты - профессионалы в этой отрасли, которые обеспечивают подходящее управление теоретически и схемотехнически реализуют такое управление объектом, в условиях в котором он функционирует.

5.1.2. Особенности САУ с микроконтроллерами в контуре управления

Для реализации управления находят применение как непрерывные, так и импульсные САУ.

Непрерывное управление осуществляется при помощи систем, в которых регулируемые величины (физические процессы, параметры которых содержат информацию) непрерывны во времени и являются аналоговыми сигналами. В таких САУ информационные параметры могут принимать любые значения в заданном промежутке. К сожалению, такое

управление не всегда позволяет реализовать те результаты, которые дает современная теория управления. В силу инерционности объектов, исполнительных механизмов, ограниченности величин воздействий нельзя ожидать качественной работы САУ сверх некоторой «границы».

Значительно лучшие результаты может дать импульсное управление. Аналоговый сигнал часто содержит избыточную информацию, поэтому вполне приемлемым является импульсное управление, при котором кратковременное воздействие на объект чередуется с паузами. В этом случае паузы в сигналах управления могут быть использованы для проведения необходимых для управления расчетов с помощью цифровой вычислительной техники. При реализации закона управления в цифровой форме можно учитывать значительно больше параметров САУ и обеспечить более высокое качество управления.

Переход к прерывистому режиму работы САУ порождает ряд особенностей в типовой функциональной схеме САУ (рис. 5.1).

Непрерывный выходной сигнал $U_{\text{вых}}(t)$ объекта управления (рис. 5.2) с помощью аналого – цифрового преобразователя (АЦП) дискретизируется в моменты времени t_k (преобразуется в цифровую форму $U_{\text{ос}}(n)$) и, затем, обрабатывается в соответствии с желаемым законом управления в цифровом регуляторе. В цифровом регуляторе можно относительно просто реализовать сложные алгоритмы управления, в том числе, ПИД регулирование, настраивая «программно» соответствующие коэффициенты и рассчитывая выходные воздействия. Выработанная управляющая цифровая последовательность преобразуется цифро – аналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговое воздействие на объект $U_{\text{воз}}(t)$ управления. Поскольку, как Вам известно, выходной сигнал ЦАП представляет собой процесс, «богатый» высокочастотными гармоническими составляющими, то он перед подачей на усилитель и исполнительное устройство (для простоты на схеме рис. 5.2 эти блоки не показаны) предварительно поступает на фильтр нижних частот. В памяти цифровой САУ содержится необходимая для выработки управляющих воздействий база данных, которая включает в себя сведения о предпочтительных законах управления объектом в различных режимах, о математических моделях объекта в различных ситуациях, константы и данные необходимые для реализации алгоритма управления. Синхронизирует работу САУ таймер.

Следует отметить, что алгоритм цифрового управления по сравнению с ранее рассмотренной аналоговой реализацией обладает рядом преимуществ:

А. Наличие цифрового вычислительного устройства, вырабатывающего управляющее воздействие (цифрового регулятора) позволяет относительно просто реализовывать различные алгоритмы управления, осуществлять их комбинирование или изменение, в зависимости от ситуации, в процессе работы. Можно проводить модернизацию системы управления, не меняя аппаратную часть, путем замены алгоритмов (программ) управления.

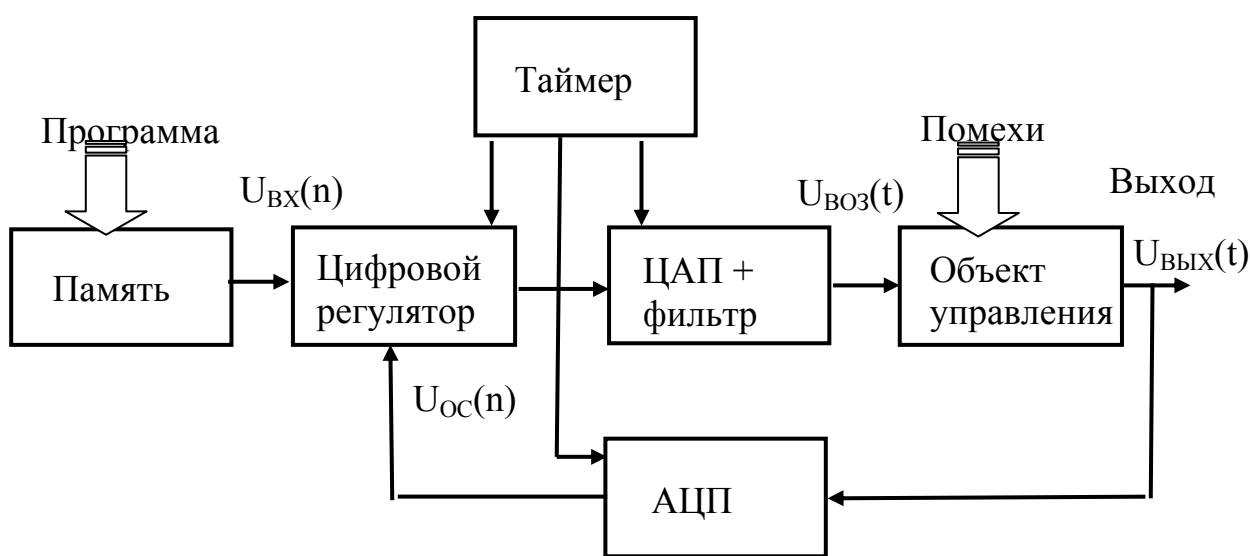


Рис. 5.2. Типовая функциональная схема импульсной (цифровой) САУ

Б. При цифровом управлении можно добиться высокой точности реализации сложных и нелинейных алгоритмов управления, высокой помехозащищенности и надежности управления.

В. В импульсных САУ можно относительно просто реализовать удобные человеко – машинные графические интерфейсы, позволяющие наглядно представить ход процесса управления, проводить диагностику работы САУ и т. п..

Вместе с тем следует учитывать ряд особенностей работы цифровых САУ:

1. Информация о поведении объекта управления поступает на цифровой регулятор не непрерывно, а лишь в дискретные моменты

времени. По этой причине между моментами дискретизации система управления является разомкнутой. Квантование сигнала по уровню и во времени влечет за собой появления ошибок квантования и округления чисел.

2. Для цифровой САУ характерна последовательность операций обработки информации, и, как следствие, в системе управления существует определенное временное запаздывание между моментом «снятия» выходной информации с объекта и формированием управляющей цифровой последовательности.

3. Управляющее воздействие на объект определяется не только алгоритмом управления, но и зависит от особенностей функционирования ЦАП.

Как отмечалось, непрерывная система управления является постоянно замкнутой, а формирование управляющего воздействия в ней происходит практически без временных задержек. Кроме того, в ней отсутствуют такие дополнительные устройства как АЦП и ЦАП.

5.2. Общие сведения о микроконтроллерах

Сразу оговорим, что сказанное в дальнейшем о микроконтроллерах, об их общих особенностях преследует лишь одну цель: кратко рассказать о микроконтроллерах, чтобы стало понятным дальнейшее изложение материала о контроллерах для управления двигателями. Детальные сведения Вы можете получить в справочниках, в каталогах и на сайтах фирм производителей.

Рынок, как движущая сила развития промышленного оборудования и бытовой техники, заставляет производителей искать новые пути создания конкурентной продукции, расширять функциональные возможности изделий, сокращать время их разработки. Настоящую «революцию» во всей электронике и в системах управления, в частности, произвело повсеместное использование контроллеров. Управляющие и регулирующие устройства, которые не в столь давние времена были чрезвычайно энергоемкими, медленно действующими, зачастую не надежными сейчас, по сути, содержат в своем составе однокристалльный микроконтроллер и несколько дополнительных электронных компонентов. О микроконтроллерах в системах управления стали говорить как о чем-то са-

мо собой разумеющемся. Их можно встретить во множестве повседневных вещей.

Необходимость выполнения сложных функций управления привела к созданию микроконтроллеров – управляющих устройств, выполненных на основе одной полупроводниковой интегральной схемы. Они выполняют одновременно функции обработки данных, логического их анализа и выработки сигналов управления. Однокристалльный микроконтроллер это программно – управляемое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненное в виде одной интегральной схемы высокой степени интеграции электронных элементов.

В отличие от высокопроизводительных микропроцессоров, наподобие Pentium (имеющих сложное устройство и, соответственно, дорогостоящих), однокристалльные микроконтроллеры практически не требуют для своей работы дополнительных элементов и предлагаются на рынке по цене до 25 долларов.

В последнее время на рынке пальму первенства удерживают восьмиразрядные RISC (Reduced Instruction Set Computer – компьютер с сокращенным набором команд) микроконтроллеры. К таким RISC – контроллерам, относятся семейство PIC компании – изготовителя Microchip и семейство AVR компании Atmel. Повышение уровня надежности, снижение уровня энергопотребления, использование, к тому же, флэш – памяти, позволяет решать с помощью таких контроллеров, приемлемых в отношении цены и производительности, огромный набор задач управления. Стало общепринятым управление электродвигателями путем использования широтно – импульсной модуляции или изменения фазового угла. Применение микроконтроллеров для управления двигателями, обеспечивая высокую гибкость управления, позволяет, к тому же, реализовать интерфейс пользователя.

Отличительными признаками современных RISC контроллеров являются:

А. В одном полупроводниковом кристалле объединены все элементы цифровой системы управления: центральный процессор (вычислительный модуль, процессорное ядро), обрабатывающий информацию; «память» (оперативное и постоянное запоминающие устройства), организованную по так называемой Гарвардской модели (что подразумевает разделение памяти для программ и данных); порты ввода/ вывода;

внутренние магистрали адреса, данных, сигналов управления; таймеры/счетчики; схема формирования синхронизирующих сигналов; модули АЦП и ЦАП; формирователи ШИМ сигналов управления электродвигателями и прочее.

Б. Центральный процессор CPU в микроконтроллерах RISC позволяет реализовывать сложные цифровые алгоритмы управления с замкнутой петлей обратной связи. Кроме того, запас по производительности, улучшенный набор команд и режимов адресации, поддержка языков высокого уровня позволяют использовать процессорное ядро и для решения других задач.

RISC - контроллеры, обладая ограниченным набором высокоэффективных команд, используют так называемую конвейерную обработку. Это, в первом приближении, означает, что за время выполнения одной команды выполняется загрузка следующей команды из памяти программ. Благодаря этому удается обработать команду за время одного системного такта и добиться высокой скорости выполнения вычислений.

При этом CPU (рис. 5.3) функционирует, в самом первом приближении, следующим образом.

Устройство управления, состоящее из счетчика команд (Program Counter) и схемы декодирования, выполняет последовательное считывание и декодирование команд из памяти программ. Операционное устройство, состоящее из арифметико – логического устройства (ALU - АЛУ) и набора регистров, в соответствии с командой выполняет требуемую операцию. АЛУ выполняет три категории операций – арифметические, логические, поразрядные. Интерфейс ввода / вывода позволяет обмениваться данными с периферийными устройствами.

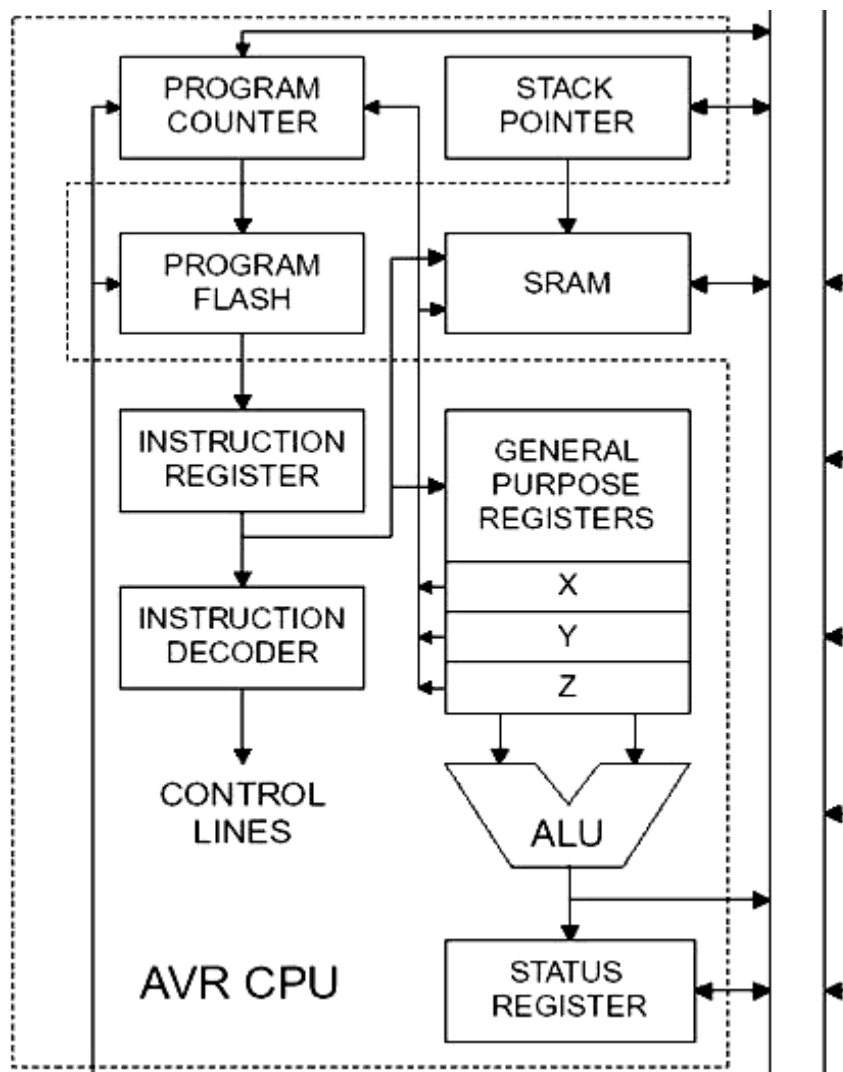


Рис. 5.3. Типовая функциональная схема центрального процессора

Благодаря своему устройству (говорят – архитектуре) у микроконтроллеров RISC исключен ярко выраженный недостаток обычных процессоров, у которых логические и арифметические операции выполняются исключительно в так называемом накапливающем сумматоре (из – за этого потом требовалось обращение к вспомогательным регистрам и промежуточным запоминающим устройствам). У RISC контроллеров задействовано 32 равноправных регистра, напрямую связанных с арифметико – логическим устройством, поэтому указанный недостаток отсутствует.

В. RISC контроллеры используют «закрытую» архитектуру. Контроллер представляет собой законченную систему обработки данных, в которой отсутствует вывод линий магистралей адреса и данных на

внешние выводы микросхемы. В такой системе не предполагается наращивание памяти или применение периферийных устройств с использованием параллельных магистралей адреса.

Г. RISC контроллеры построены по так называемому модульному принципу.

В самом центральном процессоре (рис. 5.3) реализован модуль памяти программ (двухбайтовая) на основе программируемой и электрически стираемой флэш –технологии.

Известно, что существенно влияют на успех продвижения продукции в соответствующем секторе рынка сокращенное время разработки изделия, появление в последнем новых возможностей, «гибкость» в приспособлении к потребностям покупателей. Чтобы обеспечить эти качества применительно к продукции, содержащей микроконтроллеры, необходимо обеспечить «легкость» программирования и быструю «загрузку» программного обеспечения в память. Микроконтроллер, содержащий флэш – память объемом 32 килобайта, может быть запрограммирован за несколько секунд. При этом микросхему контроллера можно установить на печатную плату и затем запрограммировать после включения питания. Возможно также обновление части программы (например параметров) непосредственно на плате в то время когда выполняется другая часть программы. Такая гибкость, отсутствие необходимости возвращать оборудование на завод - изготовитель позволяет производителю всегда иметь последнюю версию программного обеспечения или, аналогично, легко выполнить технические требования и пожелания заказчика.

Следует иметь в виду, что для энергонезависимых данных (т.е. данных, которые потеряются после отключения питания) внутренняя память представляет память SRAM. Для данных, которые должны сохраниться после отключения рабочего напряжения в контроллерах имеется память EEPROM.

Каждый микроконтроллер имеет некоторое количество линий ввода/вывода, которые объединены в 8 – разрядные параллельные порты ввода/вывода.

Большинство задач управления, которые возлагаются на микроконтроллер, должны выполняться в реальном времени (означает способность получить информацию о состоянии управляемого объекта, выполнить необходимые расчеты и сформировать управляющие воздейст-

вия в течение интервала времени, по истечении которого эти воздействия вызовут желаемое изменение поведения объекта). Чтобы организовать прием информации с датчиков и выдачу управляющих сигналов необходимо иметь таймер и использовать так называемые прерывания. «Менеджер» событий позволяет генерировать ШИМ сигнал, организовать ввод в контроллер «квадратурных» импульсных сигналов от импульсных датчиков скорости и положения. Чтобы не допускать «защелкивания» программ в микроконтроллере используют сторожевой таймер.

Д. В контроллере реализовано несколько периферийных функций.

Для связи системы управления с микроконтроллером с системой более высокого уровня (например, с офисным компьютером), для осуществления программирования в контроллер часто встраиваются модули последовательного (Serial UART) и параллельного (SPI Unit) интерфейса (рис. 5.4).

Важнейшая особенность современных микроконтроллеров, позволяющая использовать их для управления электродвигателями, состоит в том, что обычно в составе кристалла имеется модуль для генерации ШИМ сигнала. Он пригоден для управления двигателями большинства типов. ШИМ модуль, в принципе, может генерировать три комплементарные пары или шесть независимых ШИМ сигналов. Все выходы ШИМ модуля имеют высокую нагрузочную способность, что позволяет подключать к ним драйверы силовых устройств и оптоэлектронные развязки. Микроконтроллер обычно имеют в своем составе 8-разрядный таймер и 16-разрядный таймер (рис.18.4), которые также позволяют формировать ШИМ - сигналы.

Отличительной особенностью многих современных 8-разрядных микроконтроллеров является наличие размещенных на полупроводниковом кристалле модуля многоканального аналого – цифрового преобразователя. Этот модуль обычно предназначен для ввода в микроконтроллер аналоговых сигналов с датчиков физических величин и преобразования этих сигналов в двоичный код.

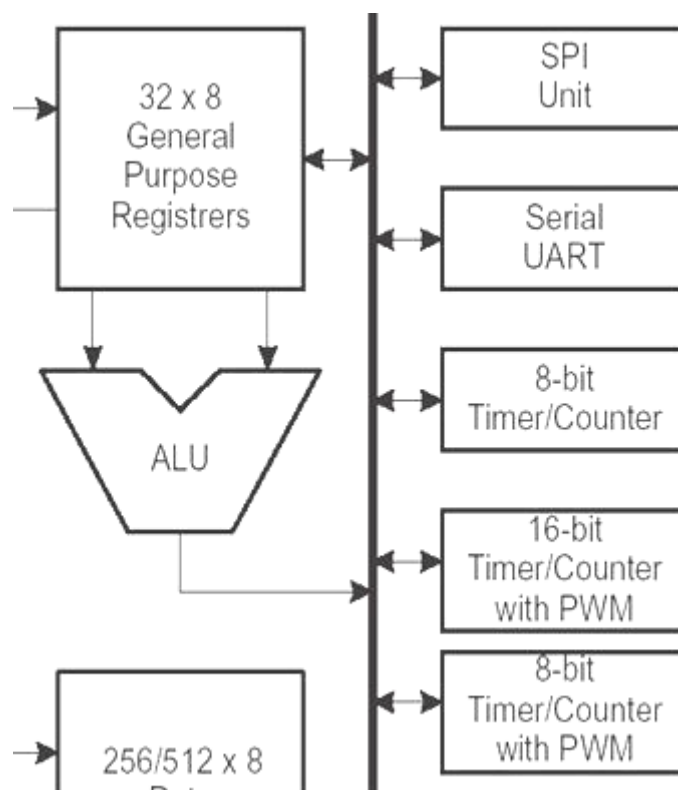


Рис. 5.4. Типовая функциональная схема центрального процессора

В состав микроконтроллера обычно входит модуль контроля напряжения питания, который прекращает вычислительный процесс при «просадках» напряжения питания.

Для получения представлений о типовом функциональном строении и параметрах контроллеров в качестве примера приведем состав блоков микроконтроллера AT90PWM3, который является недорогой и экономичный однокристальный микроконтроллер, достигающий производительности до 16 миллионов инструкций в секунду. Он предназначен для выполнения функций управления трехфазными асинхронными электродвигателями и безколлекторными электродвигателями постоянного тока, синхронными электрическими машинами на основе постоянных магнитов.

Микроконтроллер AT90PWM3 включает в себя следующее.

А. Ядро микроконтроллера на основе 8-разрядного ядра AVR с архитектурой RISC.

Б. Программируемую флэш-память 8 кбайт.

В. Статическое ОЗУ 512 байт для хранения переменных и таблиц, используемых прикладной программой.

Г. Электрически перепрограммируемое ПЗУ 512 байт для хранения данных и таблиц.

Д. Один 8-разрядный таймер и один 16-разрядный таймер.

Е. 6 ШИМ - каналов, оптимизированные под полумостовую топологию силовой схемы управления.

Ж. 11-канальный 10-разрядный АЦП и 10-разрядный ЦАП.

З. Три встроенных компаратора.

И. Программируемый сторожевой таймер со встроенным генератором.

5.3. Управление электродвигателями с помощью микроконтроллера

Для приведения в движение рабочих машин и механизмов, управления их движением в процессе их дальнейшей работы необходимо регулировать переменные электродвигателя, которые называют фазовыми координатами (в пространстве состояний). Наиболее характерными регулируемыми координатами электродвигателя являются угловая частота вращения вала (скорость), момент (ток).

Для реализации функций управления в электроприводах всегда имеются управляющие устройства. Как правило, они осуществляют регулирование по отклонению координаты от заданного значения с помощью отрицательной обратной связи по регулируемой величине или реализуют программное управление. При этом обычно для управления используется «энергетический» способ, когда с помощью управляющего воздействия меняется скорость идеального холостого хода.

В электроприводах постоянного тока, в простейшем случае, за счет ШИМ изменяется напряжение источника питания при неизменном магнитном потоке двигателя. В асинхронных двигателях используют методы широтно – импульсного регулирования, когда при управлении напряжение и частота меняются таким образом, чтобы их отношение оставалось постоянным.

Использование микроконтроллеров позволяет придать системе управления электроприводом новое качество. Рассмотрим типичные примеры таких систем.

5.3.1. Управление бесколлекторными электродвигателями постоянного тока с помощью микроконтроллера

Бесколлекторные электродвигатели постоянного тока (БКЭПТ), как отмечалось ранее, широко используются в различных электронных устройствах. В частности, они применяются в вентиляторах персональных ЭВМ охлаждения процессора, источников питания и в ряде других приложений. По сравнению с коллекторными двигателями, БКЭПТ отличаются более легким весом, быстрым разгоном, излучением меньшего уровня электрических и акустических шумов, а также не требуют технического обслуживания (исключен износ коллекторного узла).

БКЭПТ состоят из ротора с постоянными магнитами и статора с несколькими обмотками. Количество полюсов на постоянных магнитах и количество статорных обмоток варьируется в зависимости от желаемых характеристик двигателя. Устройство двухфазного БКЭПТ показано на рис. 5.5.

На рисунке представлен двигатель с 4 обмотками и 2 наборами полюсов. Верхняя и нижняя, левая и правая обмотки соединены последовательно.

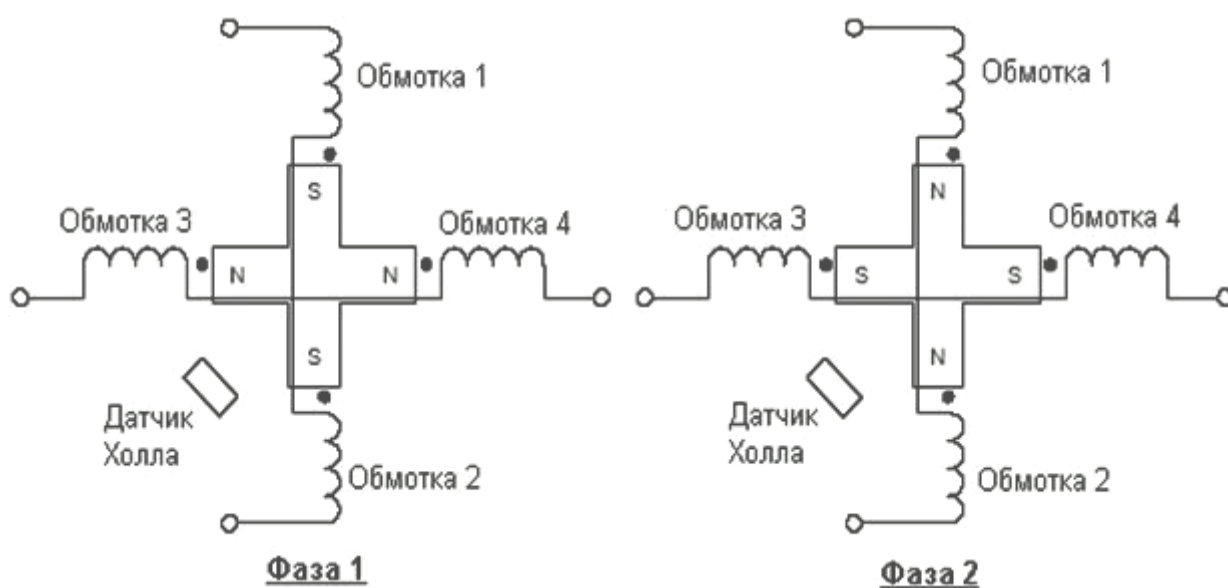


Рис. 5.5. Упрощенное изображение устройства бесколлекторного электродвигателя постоянного тока

Для характеристики процесса коммутации электродвигателя обычно используют следующие термины. Обмотка, через которую протекает электрический ток, создающий магнитное поле, называется активной или запитанной. Пассивная или не запитанная обмотка - обмотка, которая генерирует магнитное поле, вращающее ротор (т.к. через эту обмотку не протекает ток). В нормальном режиме работы БКЭПТ, в любой момент времени одна обмотка является активной, а другая пассивной.

Вращение ротора поддерживается за счет изменения магнитного поля, генерированного статорными обмотками. Изменение положения ротора происходит за счет изменения электрического тока через обмотки. Соответственно, от положения роторных магнитов зависит, какая обмотка должна быть запитана для вращения ротора в нужном направлении. При запитывании на рис. 5.5 обмоток 1 и 2 (фаза 1) к ним будут притягиваться S - полюса роторных магнитов. Как только начнется вращение, инерцией ротора будет гарантироваться, что ротор не только притянется к активным обмоткам, но и пройдет мимо них. Как только магнит пройдет мимо активных обмоток, должны быть активизированы другие обмотки (фаза 2) и вращение, таким образом, продолжится. Если переключение выполнить в нужный момент, то магнитные поля обмоток изменятся таким образом, что сформированный вращающий момент будет всегда в одном направлении. Если же переключение обмоток выполнить раньше или позже, то в течение короткого времени будет сформирован вращающий момент в противоположном направлении, что уменьшит частоту вращения ротора. Таким образом, необходима информация о положении роторных магнитов относительно обмоток для достижения максимальных рабочих характеристик.

Процесс коммутации обмоток двухфазного БКЭПТ обычно основывается на информации, поступающей с датчиков Холла. По ней определяется положение ротора. Датчик Холла является прибором, который позволяет определить направление магнитного поля и его величину. В БКЭПТ он позволяет зафиксировать магнитное поле, создаваемое роторными магнитами. Датчик Холла, в зависимости от полярности магнитного поля, генерированного роторными магнитами, создает на своем выходе напряжение (логического 0 или 1). Если датчик Холла расположить между обмотками 2 и 3 (как показано на рис. 5.5), то логические состояния его выхода будут соответствовать моментам, когда роторные

магниты совпадают с обмотками, т.е. когда магнитные поля двух полюсов компенсируют друг друга и изменяется полярность магнитного притяжения.

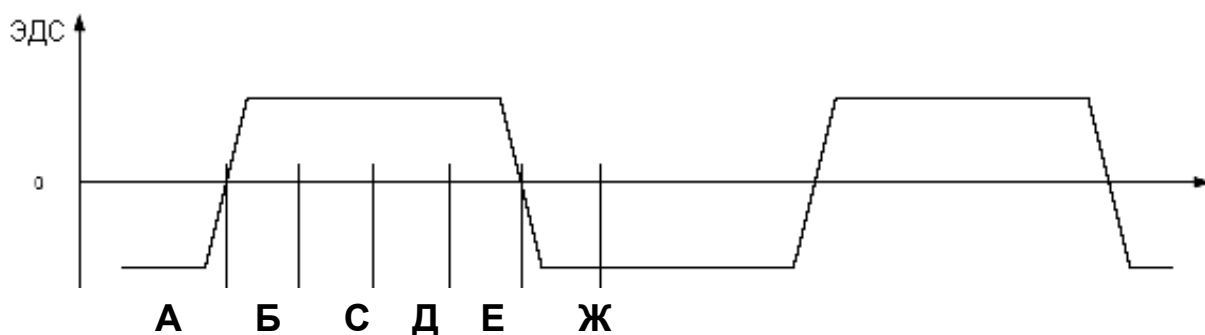
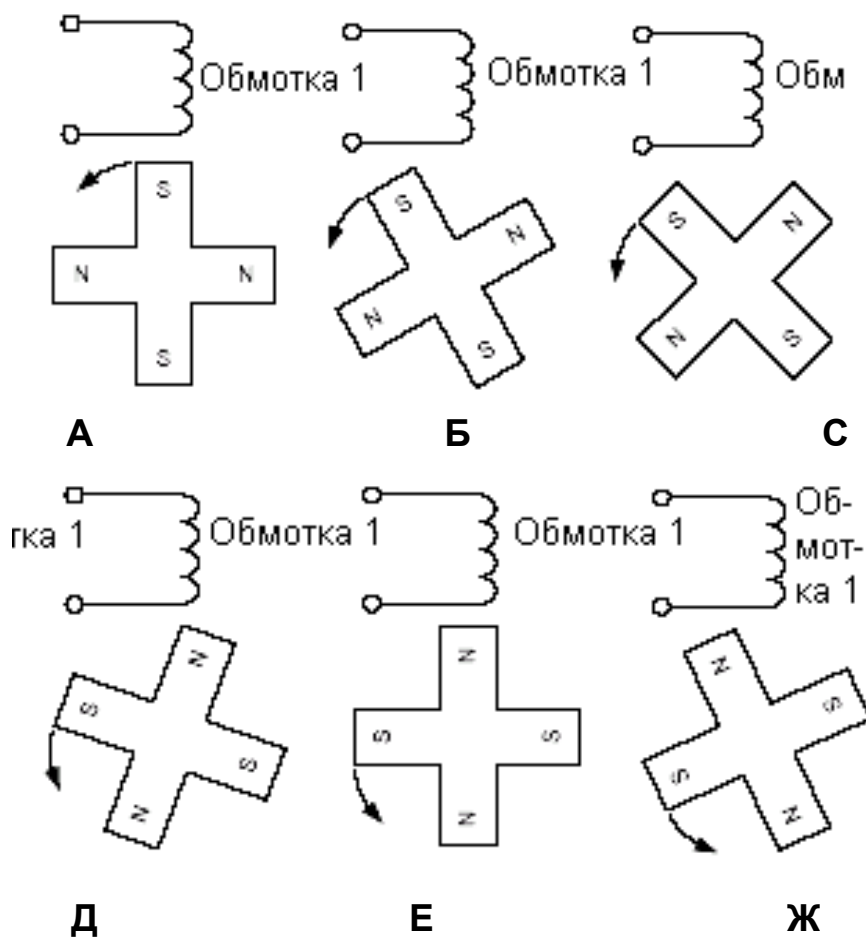


Рис. 5.6. ЭДС, которая генерируется на статорных обмотках во время вращения ротора

Датчики Холла в устройствах управления электродвигателем предоставляют информацию о том, когда необходимо выполнить переключе-

чение обмоток для поддержания вращения. Недостатками использования данного способа управления коммутацией являются дороговизна датчика Холла и необходимость точного позиционирования датчика для получения надежной информации.

Существенное влияние на работу БКЭПТ оказывает электродвижущая сила (ЭДС), которая генерируется на статорных обмотках во время вращения ротора. ЭДС, генерированная переменным магнитным полем (магнитами при вращении ротора) создает напряжение на индуктивности (обмотке). Форма ЭДС у БКЭПТ приблизительно трапециидальная, как показано на рис. 5.6.

Амплитуда ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного поля (со стороны обмотки) или, иными словами, амплитуда ЭДС пропорциональна частоте вращения электродвигателя. Когда электродвигатель достигнет заданной скорости, амплитуда ЭДС будет равна напряжению, используемому для запитывания обмоток. ЭДС генерируется не только в запитанной обмотке, но также и в пассивной. ЭДС пассивной обмотки можно измерить и использовать для определения положения ротора. На рис. 5.6. показана трапециидальная ЭДС, индуцированная в пассивной обмотке, в функции положения (угла) роторного магнита. ЭДС изменяет полярность, когда роторный магнит находится на одной линии с обмоткой. В этот же момент изменяется состояние на выходе датчика Холла. Данная особенность используется для управления БКЭПТ без датчиков. Обычно способ управления без датчиков с использованием ЭДС, применяется для управления трехфазным БКЭПТ. ЭДС, которая генерируется в пассивной статорной обмотке может быть использована для определения положения ротора при вращении роторных магнитов двухфазного двигателя и, таким образом, для синхронизации процесса коммутации.

При управлении двигателем без использования датчиков нет информации о начальном положении ротора. Таким образом, перед запуском электродвигателя ротор должен быть переведен в известное положение. При активизации одного набора обмоток магниты ротора поворачиваются и сравниваются с обмотками таким образом, что северные полюса магнитов становятся напротив южных полюсов статора или наоборот. Активизируя обмотки таким способом, можно перевести ротор в известное положение. Однако знание положения ротора не достаточно

для гарантирования того, что двигатель будет вращаться в нужном направлении.

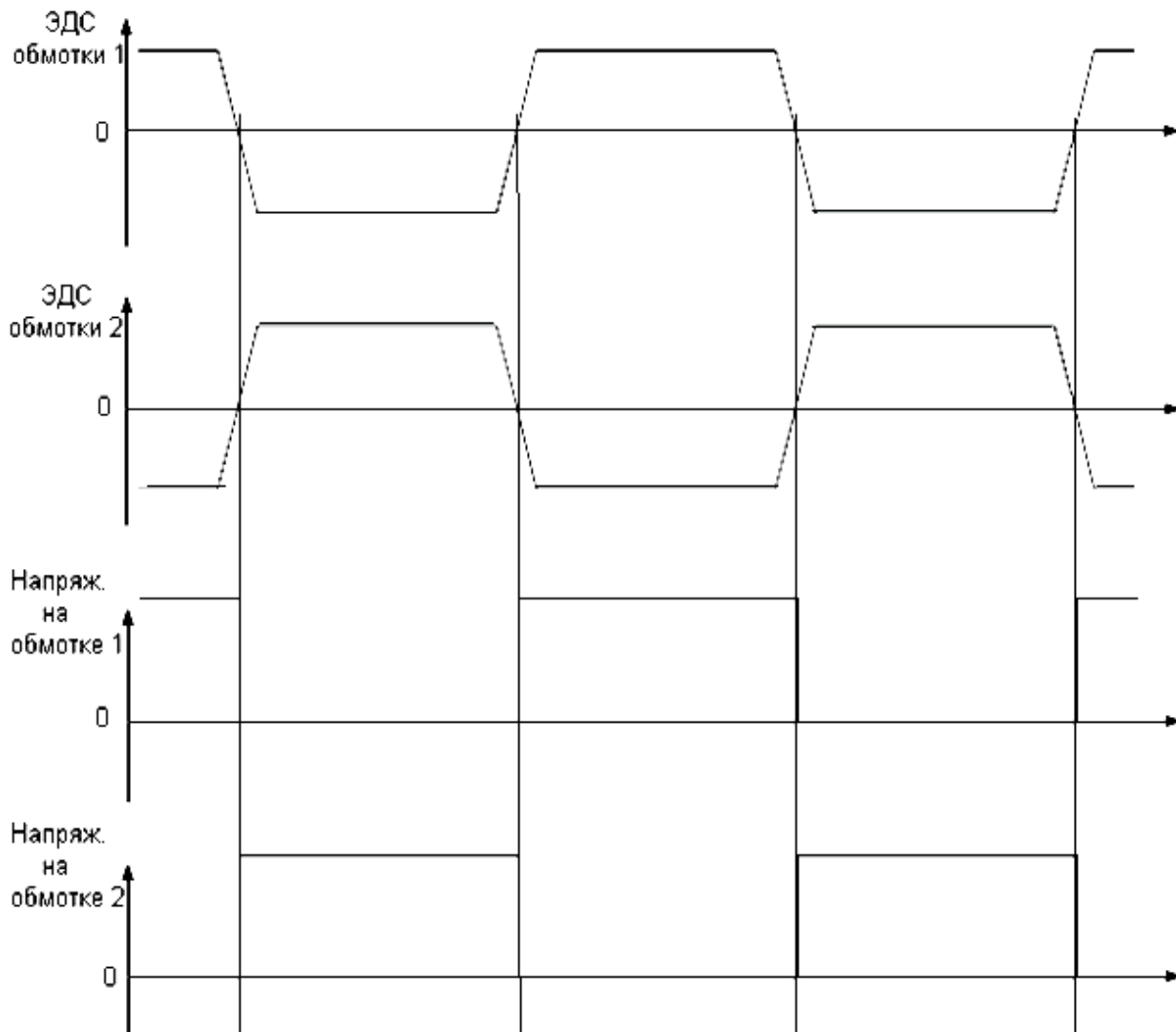


Рис. 5.7. Форма напряжений на обмотках электродвигателя при коммутации

Для вращения двигателя в нужном направлении нужно предусмотреть специальную конструкцию магнитного сердечника – с сужением воздушного зазора. Воздушный зазор между роторным магнитом и статором непостоянный. Когда статорные обмотки не запитаны, роторный магнит принимает положение, в котором воздушный зазор между полюсами магнитов и магнитного сердечника - наименьшее (т.е., где наименьшее магнитное сопротивление). Таким образом, положение ротора, становится известным и далее направление вращения управляется пу-

тем выбора соответствующего порядка коммутации. В большинстве электродвигателей используется прямоугольная форма напряжений в процессе коммутации (в этом случае коммутация называется блочной). Переключение (рис. 5.7) выполняется при пересечении нуля напряжением ЭДС (изменение полярности) для поддержания равенства знака фазного тока и знака ЭДС.

В ряде случаев возникает необходимость управления частотой вращения двигателя. Одним из способов управления частотой вращения двигателя является управление его рабочим напряжением. Однако, формировать регулируемое напряжение для питания электродвигателя без специальной схемы питания на практике затруднено. Намного удобнее, если для управления коммутацией используется микроконтроллер, использовать широтно - импульсную модуляцию (ШИМ), чтобы менять среднее значение напряжения в обмотках питания. Если связать выход ШИМ - генератора с обмотками электродвигателя, то можно управлять средним значением напряжения и, следовательно, током через обмотки (рис. 5.8).

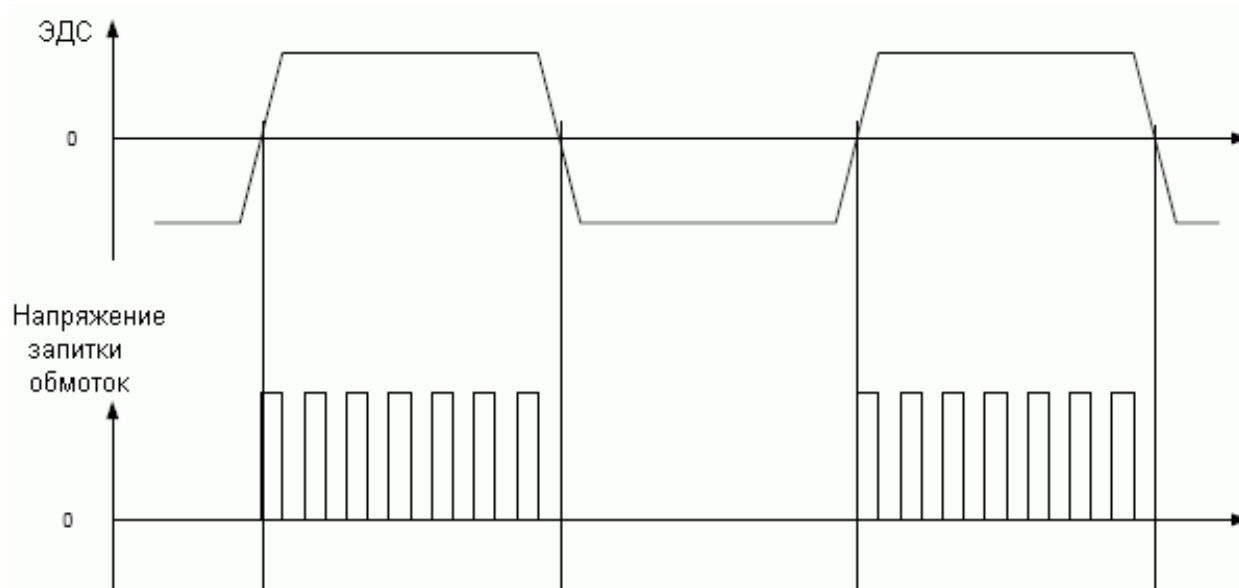


Рис. 5.8. Форма напряжений на обмотках электродвигателя при коммутации

Коэффициент заполнения импульсов ШИМ - сигнала определяет среднее значение напряжения питания обмоток. Увеличение заполнения

импульсов ШИМ - сигнала приводит к увеличению скорости вращения и вращающего момента электродвигателя.

Вполне понятно, что при использовании ШИМ - управления скоростью БКЭПТ желательно иметь встроенный в микроконтроллер генератор ШИМ - сигнала. Использование ШИМ - генератора гарантирует корректность временной диаграммы без паразитных импульсов, что делает возможной регулировку напряжения (заполнение импульсов) во всем диапазоне от 0% до 100%. Одно из основных требований при использовании ШИМ - управления скоростью вращения является расположение основной частоты ШИМ за пределами диапазона слышимости (20 Гц...20 кГц). Это означает, что желательно использовать основную частоту ШИМ существенно выше 20 кГц.

Желаемая частота вращения двигателя в большинстве приложений регулируется с помощью внешнего сигнала. В качестве последнего выступает аналоговый сигнал, сформированный, например, датчиком температуры. Использование микроконтроллера со встроенным АЦП позволяет оперировать с любым типом внешнего сигнала для задания скорости двигателя. После получения заданной скорости в цифровом виде можно варьировать заполнением импульсов ШИМ - сигнала для управления напряжением питания обмоток. Таким образом, имеется возможность реализовать управление частотой вращения с обратной связью, когда ШИМ - сигнал постоянно изменяется для минимизации разности между заданной и фактической частотой вращения.

Заметим, что при управлении двухфазным БКЭПТ без использования датчиков необходимо два канала АЦП для измерения ЭДС и два ШИМ - выхода для управления коммутацией и скоростью. Кроме того, один канал АЦП требуется, если необходимо внешнее задание скорости. Если необходимо формировать информацию о частоте вращения, то понадобится дополнительный выход. Таким образом, всего требуется 6 линий ввода-вывода.

Функции управления двухфазным БКЭПТ без датчиков, с учетом «опроса» внешнего аналогового напряжения уставки по скорости и формирования сигнала с информацией о частоте вращения, способен выполнять простейший 8-выводной микроконтроллер. При этом потребности во внешних компонентах могут быть сведены до минимума при наличии у микроконтроллера встроенного АЦП, двух каналов ШИМ. При измерении с помощью АЦП следует применить внутренний источник

опорного напряжения. Распределение выводов микроконтроллера для такого случая, в качестве примера, показано на рисунке 5.9.

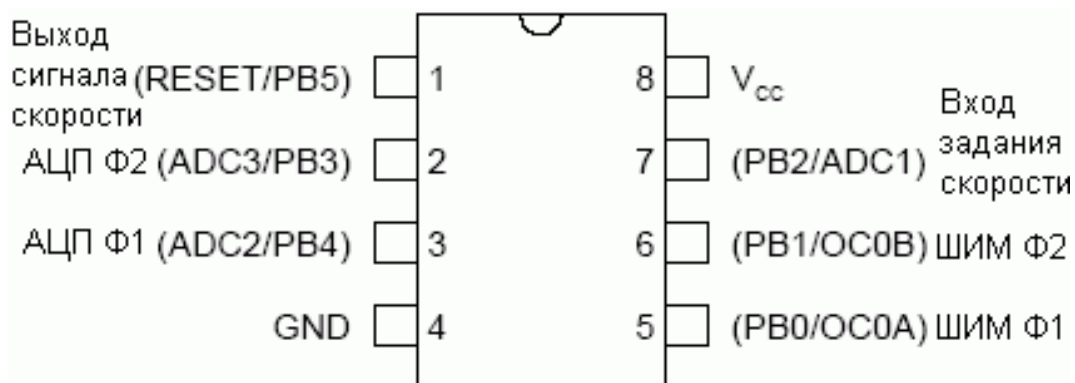


Рис. 5.9. Распределение выводов микроконтроллера при управлении двухфазным БКЭПТ

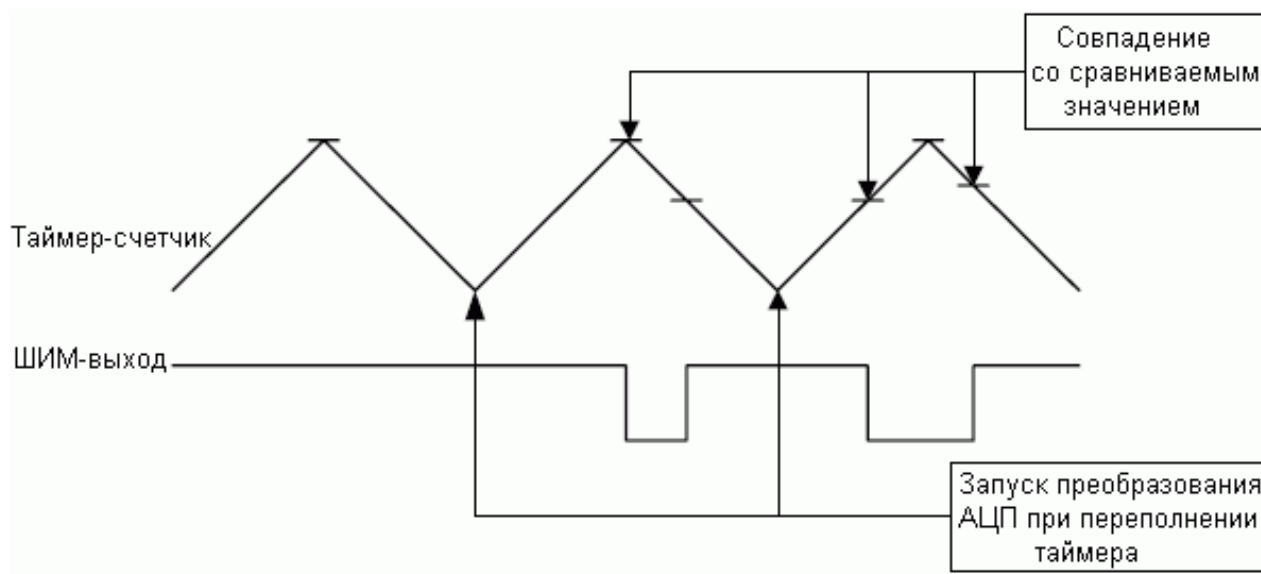


Рис. 5.10. Формирование ШИМ импульсов с помощью таймера - счетчика

Для реализации ШИМ используется таймер/счетчик.

Таймер генерирует три события: два события совпадения, при которых устанавливается или сбрасывается соответствующий выход, и одно прерывание при переполнении. Двухнаправленный счет и ШИМ - выход представлены на рис. 5.10. Основной причиной использования двухнаправленного режима счета таймера является возможность запуска

преобразования АЦП при переполнении таймера, т.е. когда коммутационные шумы не накладываются на сигнал ЭДС. При возникновении прерывания по переполнению таймера также запускается процедура обработки прерывания, в которой оценивается положение ротора и выполняется коммутация, если для этого имеются необходимые условия (т.е., когда ЭДС, измеренное АЦП, пересекает заданный порог). Выходы ШИМ каналов связаны с транзисторами силового каскада (рис. 5.11) управления (драйверами силовых транзисторов).

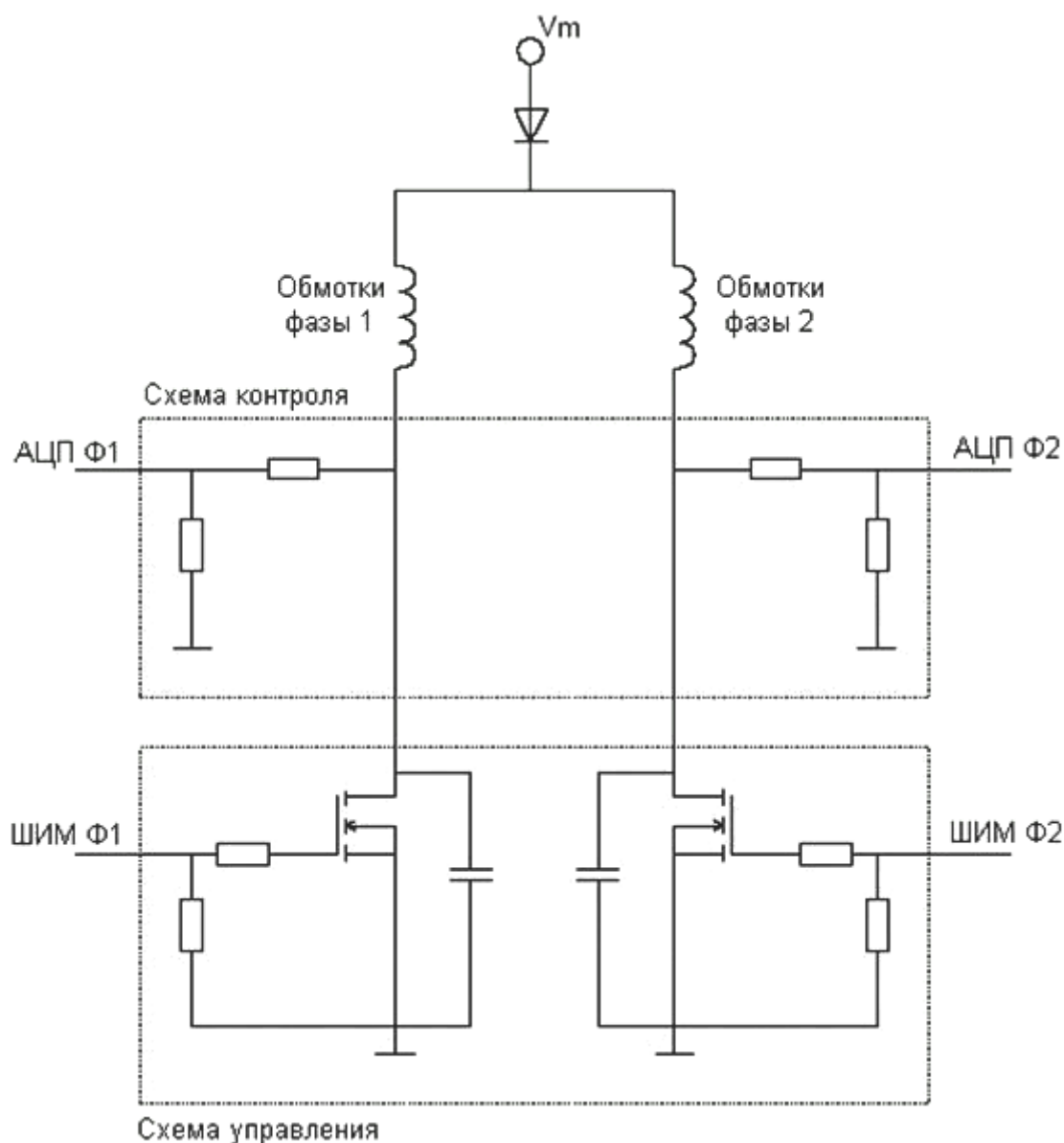


Рис. 5.11. Драйверы и схема контроля при управлении БКЭПТ без датчиков

Как правило, это два ключа, которые при включении делают возможным протекание электрического тока через обмотки. В качестве ключей используются транзисторы. Конденсаторы параллельно транзисторам позволяют сгладить переходные напряжения, которые возникают при размыкании индуктивной нагрузки, а также уменьшают шумы, возникающие при коммутации. Фрагменты схемы, обозначенные как "Схема контроля", выполняет обработку сигнала. Для этого используется только делитель напряжения, позволяющий согласовать по напряжению источник сигнала с АЦП микроконтроллера. Диод между напряжением питания и обмотками двигателя выполняет функцию защиты от перемены полярности, а также гарантирует непопадание напряжения со стороны двигателя в цепь питания. Выводы, обозначенные "АЦП Ф1/2" и "ШИМ Ф1/2", являются подключениями к микроконтроллеру.

Предварительное позиционирование ротора выполняется путем увеличения напряжения питания обмоток и задержки на заданное время до тех пор, пока ротор не установится в желаемое положение. После этого напряжение питания обмоток уменьшается, чтобы ротор перешел в положение покоя. Этим гарантируется известность положения ротора. После этого двигатель запускается без обратной связи, с задержками между переключениями в соответствии с таблицей преобразования. Это позволяет адаптировать управление под механические характеристики управляемого двигателя. Аналогично без использования датчиков на основе недорогого микроконтроллера может быть реализовано устройства управления 3 фазным безколлектным электродвигателем постоянного тока (БКЭПТ).

На рис. 5.12 показаны осциллограммы трапецеидальной ЭДС и соответствующие напряжения управления 3-фазным БКЭПТ. На каждой ступени коммутации, обмотка одной фазы подключается к положительному напряжению питания, другая - к отрицательному, а третья - остается неподключенной. ЭДС неподключенной фазы в результате пересекает ноль при пересечении среднего значения положительного и отрицательного напряжений. Пересечения ноля отмечены на рис. 5.12, как "ПН". Пересечение ноля возникает всегда в центре между двумя коммутациями. На постоянной скорости или медленно изменяющейся скорости период времени от одной коммутации до пересечения нуля и время от пересечения нуля до следующей коммутации равны. Это использует-

ся в качестве основы в данной реализации устройства управления без использования датчиков.

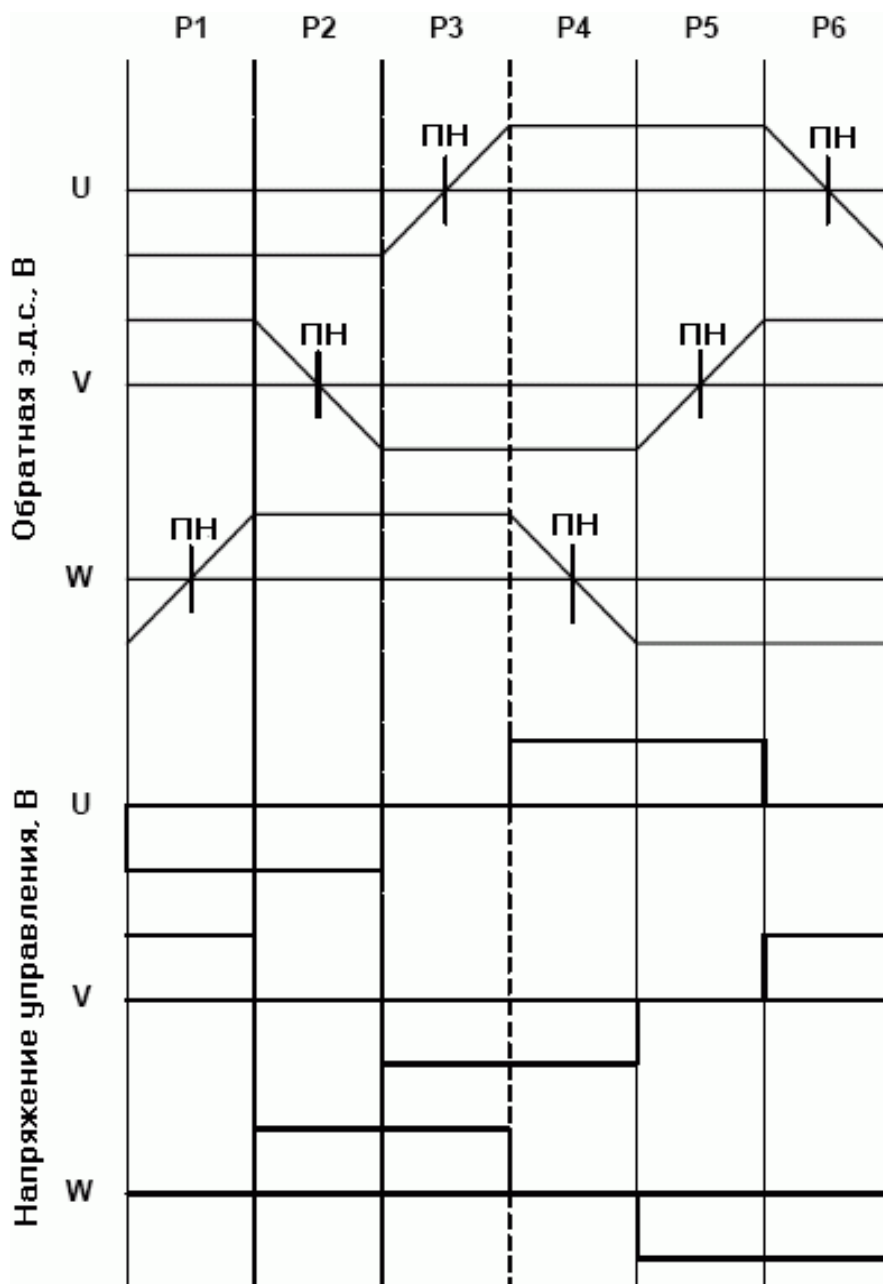


Рис. 512. Осциллограммы ЭДС и соответствующие напряжения управления 3-фазным БКЭПТ

Неподключенная фаза, на которой необходимо выявлять пересечение нуля, изменяется на каждой ступени коммутации. Поэтому, для обнаружения пересечений нуля в каждой фазе понадобится три канала АЦП.

Устройство управления 3-фазным БКЭПТ без использования датчиков состоит из шести частей: AVR-микроконтроллер; 3-фазный БКЭПТ; силовой каскад; схема обработки сигнала обратной ЭДС; вход задания скорости; схема измерения тока. Схема соединения частей показана на рис. 5.13.

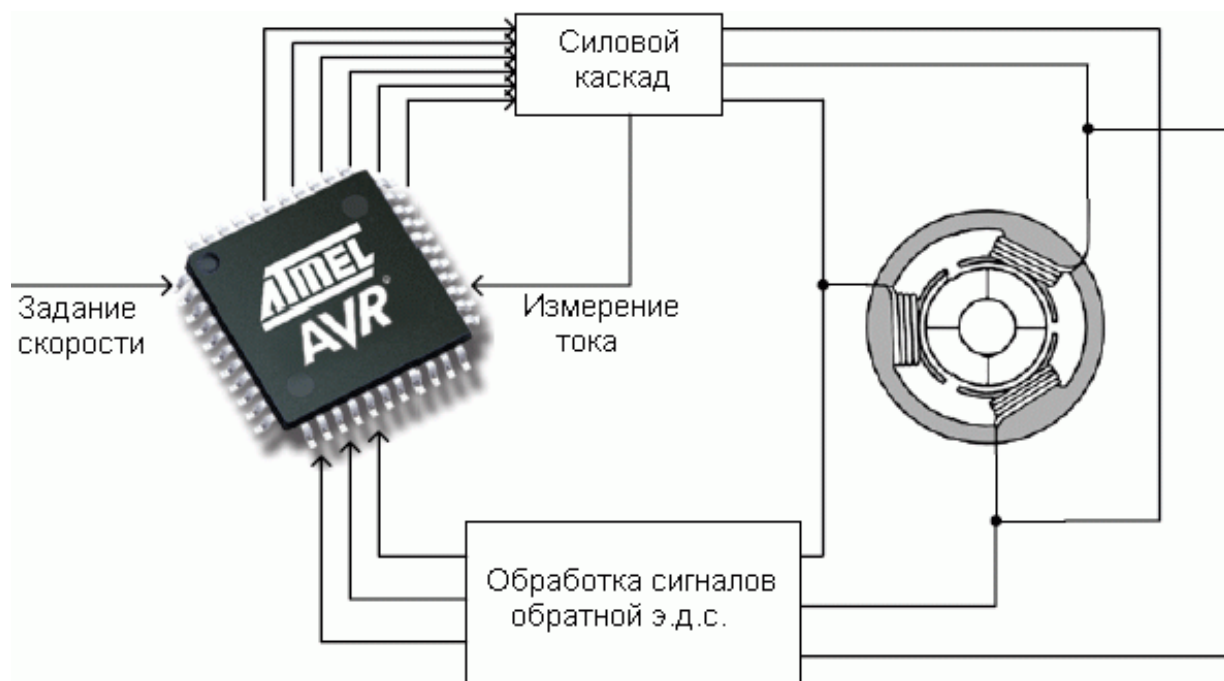


Рис. 5.13. Устройство управления БКЭПТ без датчиков

Силовой каскад состоит из трех стандартных полумостов, которые часто используются для управления трехфазными двигателями. На рис. 5.14 показана укрупненная схема силового каскада. U, V и W - каждая из трех фаз обмоток двигателя.

Сигналы, обозначенные XX_PWM, являются сигналами управления микроконтроллера. Ключи, как правило, реализуются на транзисторах. Ключи, подключенные к $V_{дв}$, называются верхними ключами. Ключи, подключенные к общему проводу, по аналогии, называются нижними ключами. При работе БКЭПТ, как показано на рис. 5.14, могут быть открыты только один верхний и один нижний ключ, создавая путь протекания электрического тока через две фазные обмотки двигателя и оставляя одну обмотку двигателя неподключенной. Диоды параллельно каждому ключу обычно называются обратными диодами и предназначены для защиты ключей от высоковольтных выбросов напряжения, возни-

кающие при коммутации больших индуктивных нагрузок. Некоторые транзисторы имеют такой диод в своем корпусе. Для измерения потребляемого двигателем тока используется один шунтовый резистор, включенный между силовым каскадом и общим проводом. Поскольку через шунт могут протекать большие токи, то его сопротивление должно быть как можно более малым, но при этом также достаточным до восприятия падения напряжения на этом резисторе со стороны АЦП. При выборе шунтового резистора также необходимо убедиться, что он способен рассеивать мощность при максимальном токе.

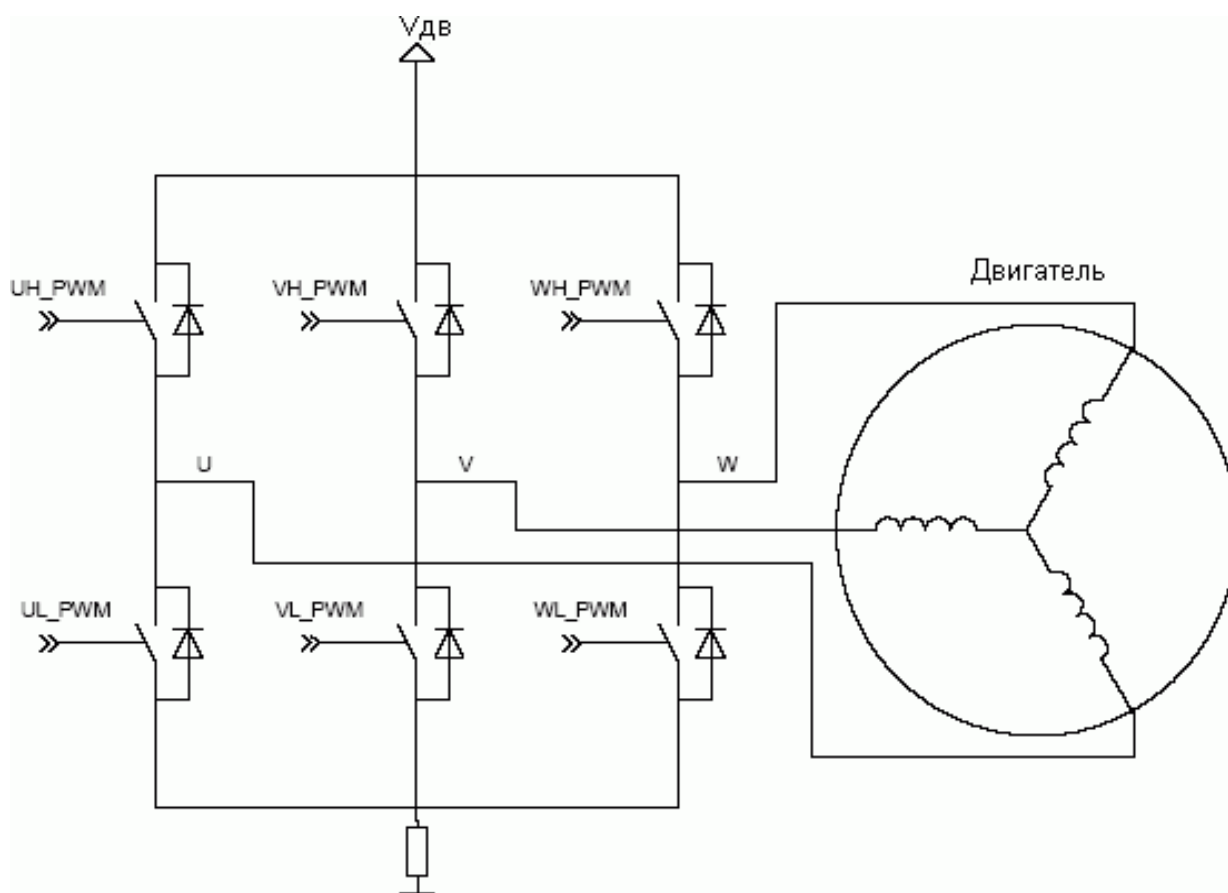


Рис.5.14. Устройство силового каскада

Для управления силовым каскадом необходимы шесть синхронизированных ШИМ - сигналов, которые могут быть индивидуально включены и выключены. Генерировать эти шесть ШИМ - сигналов может микроконтроллер, используя таймеры-счетчики. Часто является целесообразным использовать только один таймер-счетчик для синхронизации процесса коммутации. Действительно, можно генерировать только один

ШИМ - сигнал, который в дальнейшем, с помощью шести внешних логических элементов И, будет подключаться к активным ключам. Каждый И - элемент управляет одним ключом силового каскада. ШИМ - сигнал подается на вход каждого элемента И. Оставшиеся шесть входов логических элементов соединяются с линиями ввода-вывода, которые будут выступать в качестве выходов разрешения. Схема распределения ШИМ - сигнала показана на рис. 5.15. Напряжения 3 фаз обмоток двигателя должны быть подключены к входам АЦП посредством трех пассивных делителей напряжения и фильтров нижних частот (ДН/ФНЧ).

Данная схема представлена на рис. 5.16. Фильтры должны иметь тот же коэффициент передачи, что и фильтр опорного напряжения АЦП. Это позволит использовать весь диапазон преобразования АЦП. Фильтр низких частот должен обеспечивать как можно более полную фильтрацию высокочастотного шума, но при этом не должен вносить существенных задержек сигнала ЭДС.

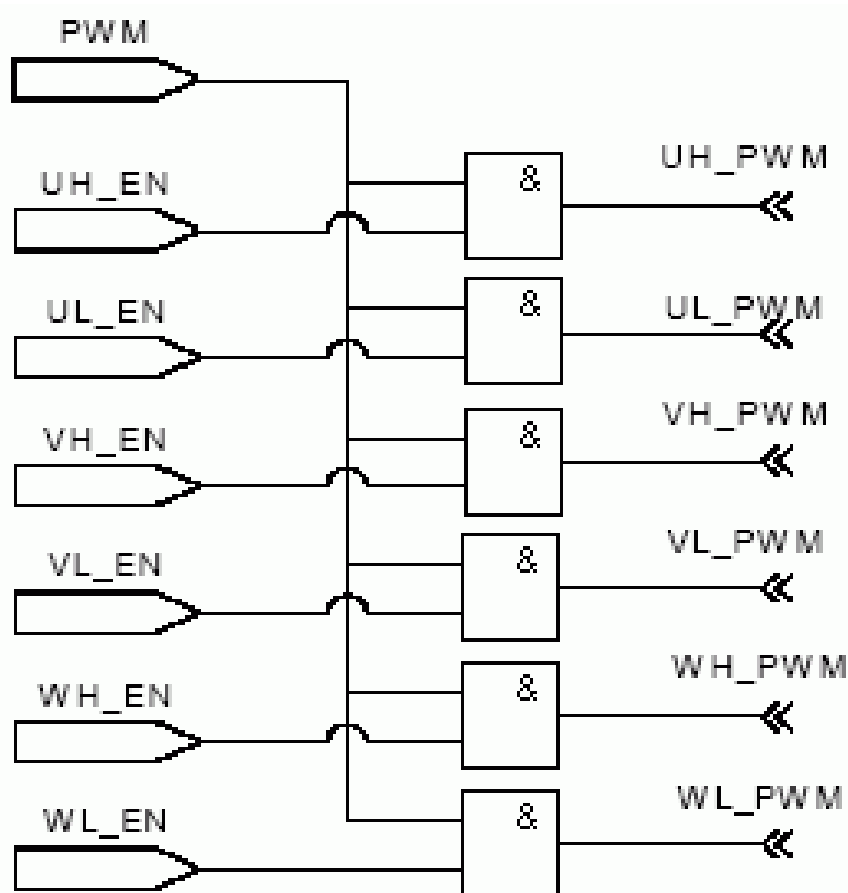


Рис. 5.15. Распределения ШИМ-сигнала с помощью схем И

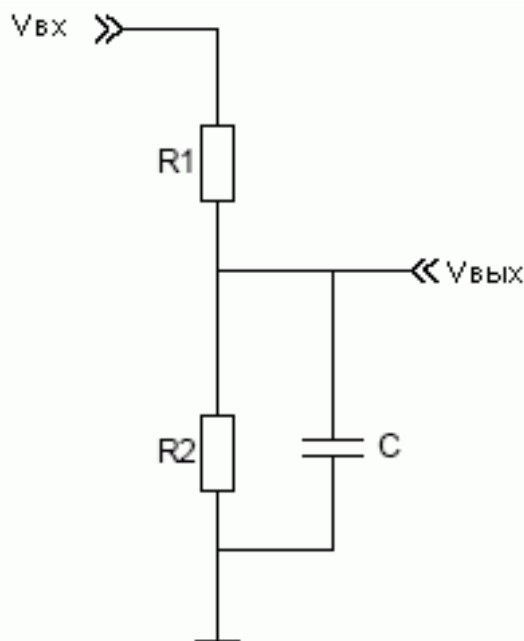


Рис. 5.16. Схема делителя напряжения и фильтра нижних частот на входе АЦП

Для точного измерения тока необходимо фиксированное, известное опорное напряжение. Микроконтроллер содержит встроенный источник опорного напряжения, который может быть измерен с помощью АЦП. В качестве данного опорного напряжения может использоваться любой источник, который характеризуется долговременной стабильностью и уровень которого заранее известен. Измерение тока с помощью АЦП выполняется однократно в каждом цикле ШИМ, т.е. приблизительно каждые 50 мкс при основной частоте ШИМ 20 кГц. Если требуется более высокое быстродействие реагирования на токовую перегрузку, то можно использовать аналоговый компаратор. Отфильтрованное напряжение шунта подается ко входу аналогового компаратора. На второй вход компаратора подается фиксированное напряжение, которое соответствует напряжению на шунте при протекании через него максимального тока. Используя прерывание по срабатыванию компаратора можно отключить питание двигателя при возникновении токовой перегрузки. Можно также реализовать внешнюю схему защиты от токовой перегрузки, которая будет автономно управлять отключением ШИМ - сигнала.

Скорость вращения вала двигателя задается с помощью аналогового напряжения. В качестве датчика скорости может выступать любой сигнал, например, выход датчика температуры. Частота вращения дви-

гателя управляются с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ используется в так называемом режиме фазовой коррекции (рис. 5.17).

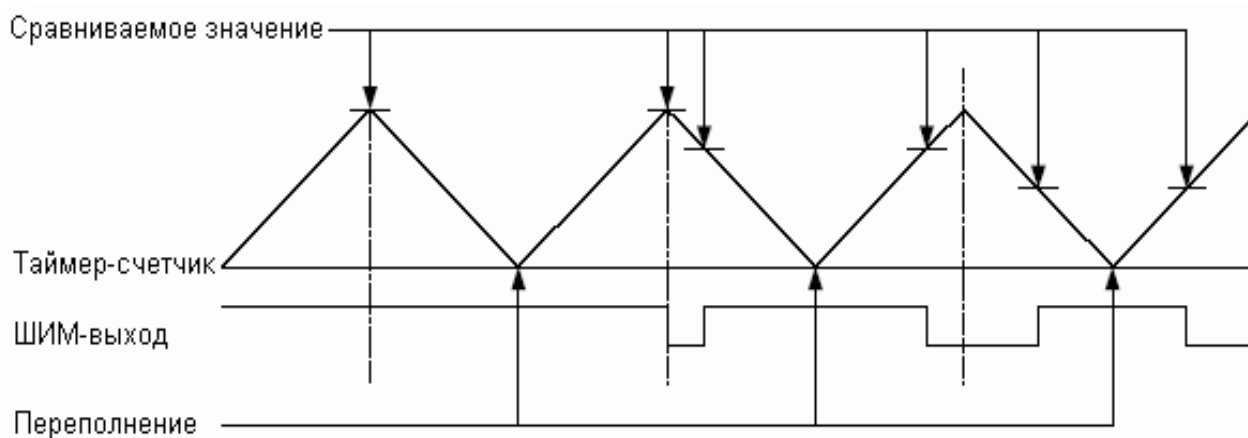


Рис. 5.17. Формирование ШИМ импульсов в режиме фазовой коррекции

В данном режиме счетчик работает в двух направлениях, что делает выход ШИМ симметричным в пределах одного периода ШИМ. Кроме того, сравниваемое значение, которое определяет рабочий цикл ШИМ - выхода, буферизуется с целью невозможности его обновления внутри цикла ШИМ. На рис. 5.17 показано соотношение между значением счетчика, сравниваемым значением и ШИМ -выходом. Каждый период ШИМ на рисунке выделен пунктирными линиями. Там же показано, что переполнение таймера возникает при достижении таймером нуля. Данное событие может использоваться для автоматического запуска преобразования АЦП. Если значение рабочего цикла ШИМ очень мало, то имеется точка, в которой ШИМ-выход будет стабильным в течение длительного времени. Это используется в целях гарантирования оцифровки напряжения неподключенной фазы в условиях низких шумов со стороны ШИМ.

5.3.2. Управление асинхронными электродвигателями

Уже отмечалось, что по всему миру правительства вводят правила, требующие от промышленных предприятий и производителей бытового электрооборудования выпускать продукцию более экономично расхо-

дующих электроэнергию. Часто этого можно достичь за счет эффективного управления весьма распространенными асинхронными электродвигателями (АД). Известно, что в настоящее время широко используются АД из-за высокой выносливости, надежности, низкой стоимости и высокого к.п.д. (80%) (промышленные электроприводы, подъемно – транспортные устройства, робототехника, полиграфическое оборудование, центробежные насосы, системы нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха, компрессоры, пылесосы, стиральные машины, вытяжки, холодильники). КПД управляющих устройств, содержащих в своем составе современные силовые преобразователи с ШИМ, составляет около 95 процентов. Это является причиной, почему разработчики оборудования в настоящее время заинтересованы в разработке недорогих и экономичных регулируемых электроприводов переменного тока.

Недостатком асинхронных двигателей является работа только на номинальной скорости при подключении к сети. Это объясняет, почему так необходимы устройства для регулировки частоты вращения асинхронных электродвигателей. Как отмечалось ранее, наиболее популярным алгоритмом управления трехфазным асинхронным электродвигателем является алгоритм, связанный с поддержанием постоянства отношения напряжение/частота (предложил М.П. Костенко в 1925 году) и использованием ШИМ управления инвертором напряжения. В современных асинхронных электроприводах, экономящих электроэнергию, в цепь статора АД включаются инверторы, которые изменяют свое выходное напряжение (первую гармонику) пропорционально корню квадратному из относительного момента (тока) двигателя. Принцип постоянства отношения напряжение/частота широко распространен в современных регулируемых асинхронных приводах с так называемым скалярным управлением, где используется модуль регулируемой величины. Этот принцип позволяет использовать синусоидальную модель асинхронного электродвигателя, в которой величина магнитного потока статора пропорциональна отношению амплитуды и частоты напряжения статорной обмотки. Если данное отношение поддерживать на постоянном уровне, то постоянство будет сохранять и магнитный поток статора и, таким образом, вращающий момент будет зависеть только от частоты скольжения. Грубо говоря, скалярный принцип управления " V/f " заключается в подаче на обмотки электродвигателя 3-фазного синусоидального напряжения, ам-

плитуда которого пропорциональна частоте, за исключением частот ниже порогового значения и выше номинального, как показано на рис. 5.18.

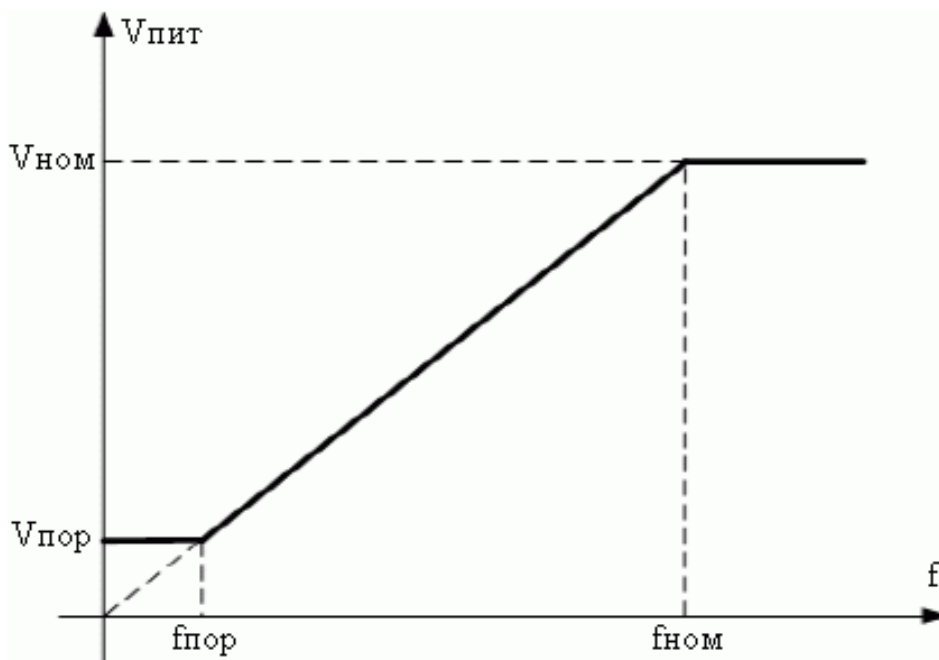


Рис. 5.18. **Зависимость амплитуды напряжения статора от частоты статора, следуемая из принципа V/f**

При управлении АД по закону М.П. Костенко абсолютное скольжение остается практически неизменным. По этой причине он может применяться для построения контуров автоматического управления скоростью (рис. 5.19), в которых отклонение желаемой скорости от фактического измеренного значения скорости поступает с датчика в ПИ-регулятор, где вычисляется значение частоты напряжения статора. В целях снижения сложности регулятора в качестве исходных данных для правила V/f и векторного ШИМ - алгоритма используется абсолютное значение частоты статорного напряжения.

Об алгоритме работы всей системы управления электродвигателем говорилось ранее. В такой системе управления АД с помощью датчика скорости измеряется угловая скорость вращения вала двигателя ω , которая сравнивается с заданным значением $\omega_{зад}$, и их разность направляется в ПИ – регулятор скорости. Выходная величина регулятора является сигналом ошибки. Напомним, что ПИ это сокращение от "пропорциональный и интегральный". Эти два термина описывают отдельные элементы регулятора. Пропорциональная часть выполняет умноже-

ние результирующего сигнала рассогласования (разницы измеренного выходного сигнала объекта управления и заданного значения угловой скорости) на постоянную величину, которая носит название коэффициент передачи пропорциональной части. Пропорциональная часть определяет краткосрочное поведение регулятора, т.к. она определяет, как сильно нужно реагировать регулятору на изменение заданных значений.

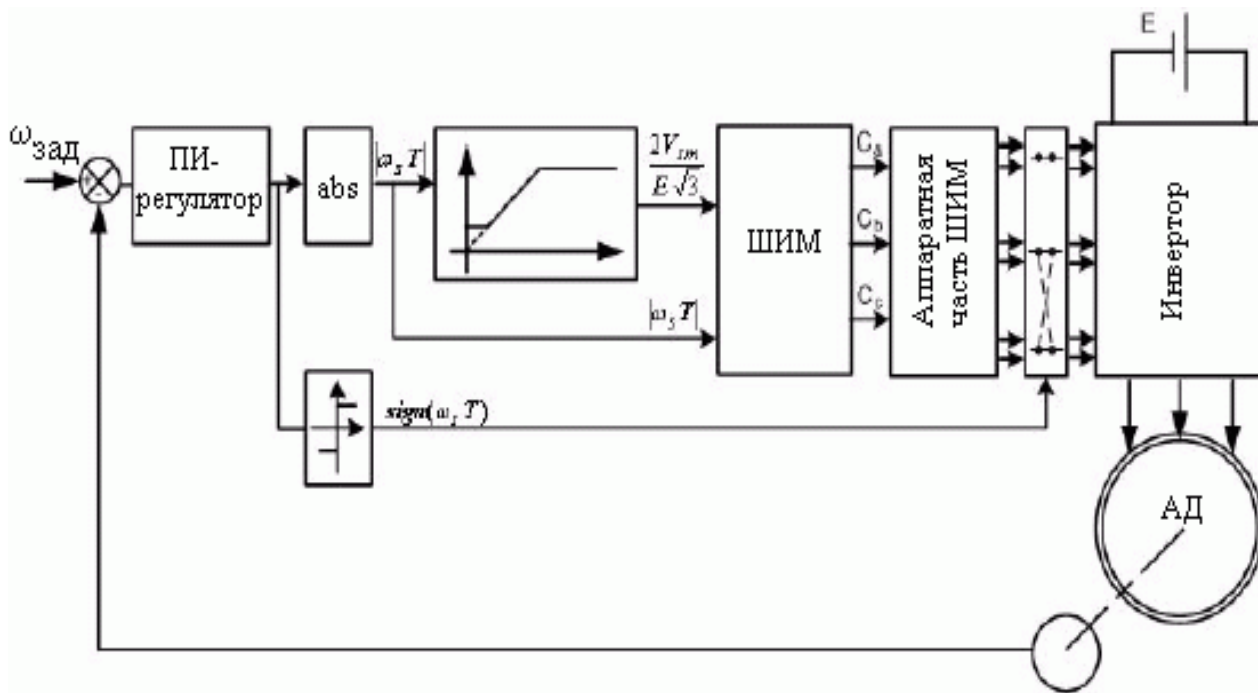


Рис. 5.19. Упрощенная схема системы автоматического управления скоростью по принципу V/f

Интегральная часть, которая добавляет точность регулятору и устойчивость в его работе. Данная часть регулятора вычисляет произведение суммы всех предшествующих сигналов рассогласования на постоянную величину, которая называется коэффициентом передачи интегрирующей части. Предшествующие значения сигнала рассогласования для вычисления суммы хранятся в памяти и обновляются пока значение рассогласования не равно нулю. Это позволяет регулятору убрать различия между измеренным выходным значением и желаемым (предпочтительным). При этом, снижается быстродействие замкнутой системы.

Как отмечалось ранее, помимо пропорциональной и интегрирующей части, в принципе, может быть третья - дифференцирующая. В этом случае регулятор называется ПИД (пропорционально – интеграль-

но - дифференцирующий). Однако применение такого регулятора для управления асинхронным электродвигателем по принципу постоянства V/f нецелесообразно. Его применение позволяет повысить быстродействие контура регулирования, но при этом также пропускаются шумы и снижается стабильность замкнутого контура.

Важную роль в управлении электродвигателем с обратной связью играют датчики скорости. Для определения частоты и направления вращения ротора могут использоваться несколько решений. Наиболее точным, но при этом и самым дорогим, является использование абсолютно го шифратора приращений. Стоимость данных оптических датчиков высока. Другим решением является использование тахогенератора, механически связанного с ротором электродвигателя. Для подключения данного датчика к микроконтроллеру потребуется один канал аналогово-цифрового преобразования. Третьим решением является использование датчиков на эффекте Холла. Данные недорогие бесконтактные датчики в настоящее время выпускаются в виде компактных корпусных интегральных схем, в состав которых входят собственно датчик и схема формирования выходного сигнала. Такие микросхемы формируют выходной сигнал, который может быть непосредственно подключен к порту ввода-вывода микроконтроллера.

Для формирования с помощью инвертора на обмотках статора трехфазной синусоидальной системы напряжений, со сдвигом по фазе 120 градусов, необходимо располагать мгновенными значениями этих напряжений в дискретные моменты времени. В цифровой системе управления для вычисления мгновенных значений напряжений, которые необходимо приложить к статору:

$$\begin{aligned} V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \operatorname{sita}(\theta_1[k]) \\ V_b[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \operatorname{sita}(\theta_2[k]) \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \operatorname{sita}(\theta_3[k]) \end{aligned} ,$$

где V_{sm} – амплитуда напряжения статора, определенная по принципу постоянства отношения напряжение-частота; sita – величина функции синус, вычисленная для текущих фаз в дискретные моменты времени, а T_s - период дискретизации для алгоритма управления,

$$\begin{aligned}\theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k]T_s \\ \theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k]T_s \\ \theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k]T_s\end{aligned}$$

Обычно формируется так называемая таблица синусов, которая «записывается» в «память». Следует отметить, что, используя некоторые свойства тригонометрических функций, имеется возможность сократить размер таблицы преобразования. Наиболее эффективным способом является использование таблицы преобразования со значениями синусов в диапазоне только от 0 до $\pi/3$.

Принцип общего формирования (в блоке ШИМ рис.5.19) данных (C_a , C_b , C_c), необходимых для работы инвертора, показан на рис. 5.20.

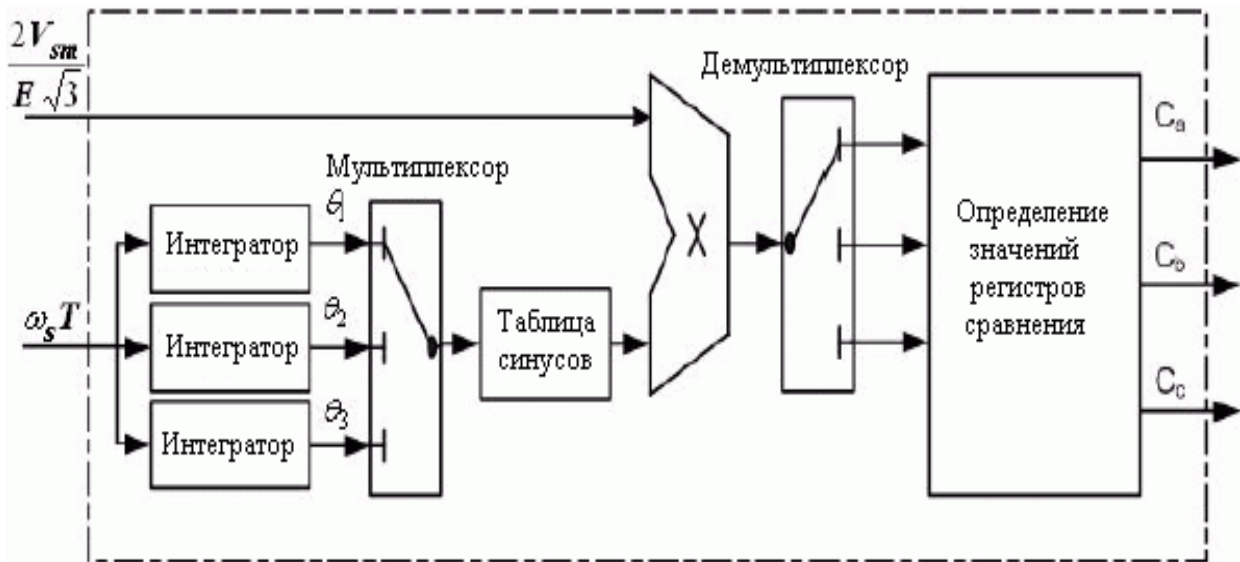


Рис. 5.20. Принцип формирования данных (C_a , C_b , C_c), необходимых для работы инвертора

В дальнейшем, полученные данные сравнивают со значениями на выходе реверсивного счетчика (используется в качестве генератора треугольных импульсов). Когда выходное значение реверсивного счетчика превышает данные значения, переключается соответствующий выход компаратора. Как результат, в каждом ШИМ-канале генерируются импульсы, коэффициент заполнения которых пропорционален соответствующему значению напряжения статора. Рассмотренный способ скалярного управления асинхронным двигателем (со стабилизацией аб-

солютного скольжения) может использоваться в приложениях, которые не требуют высоких динамических характеристик, а необходимо только эффективно варьировать частотой вращения в полном диапазоне. Кроме того, принцип управления, рассмотренный здесь, может использоваться только в приложениях, где поддерживается постоянный уровень скорости при любом допустимом моменте сопротивления. В приложениях, где необходимо поддерживать постоянство момента сопротивления при любых значениях частоты вращения, требуется измерение статорных токов и более сложные принципы управления. В частности, может применяться токовое управление АД. В этом случае для каждой фазы задаются мгновенные значения синусоидальных токов статора, которые обрабатываются быстродействующими регуляторами тока, включающими в себя компараторы с гистерезисом.

Более экономично расходовать энергию и улучшить качество переходных процессов позволяет использование метода векторного ШИМ - управления вместо скалярного ШИМ - управления. Скалярное управление АД обеспечивает хорошее качество регулирования в установившемся режиме (с умеренными требованиями к динамике). Но в динамическом режиме у АД магнитный поток не остается постоянным, поэтому в переходном процессе возможны колебания электромагнитного момента и скорости. Существуют механизмы с высокими требованиями к динамике (роботы, манипуляторы, станки с ЧПУ), где необходимо обеспечить максимальное быстродействие без колебаний скорости. Обеспечить это возможно, если поддерживать точно на заданном уровне магнитный поток и магнитный момент в переходном процессе работы двигателя. Достичь этого можно только при векторном управлении АД. В качестве управляющих воздействий при векторном управлении используются пространственные векторы электромагнитных величин и можно независимо менять магнитный поток и электромагнитный момент двигателя с помощью составляющих вектора тока статора. Принцип векторного управления АД был описан более 30 лет тому назад, однако практическая его реализация стала возможной только сейчас, когда появились хорошие силовые полупроводниковые приборы и системы цифровой обработки большого количества цифровой информации.

Электромагнитный момент АД определяется векторным произведением токов, потокосцеплений обмоток. Поэтому существует примерно два десятка видов такого управления. Обычно, на практике, используют

векторы, формирующие электромагнитный момент, которые являются взаимно перпендикулярными.

Упрощенная схема векторного управления трехфазным АД показана на рис. 5.21. Если подходить к ней формально, то несложно заметить, что она состоит почти из таких же функциональных блоков, что и при скалярном управлении. Она используется для построения контура управления, в котором разность между желаемой и измеренной скоростью поступает на вход ПИ-регулятора, в котором определяется частота статорного напряжения.

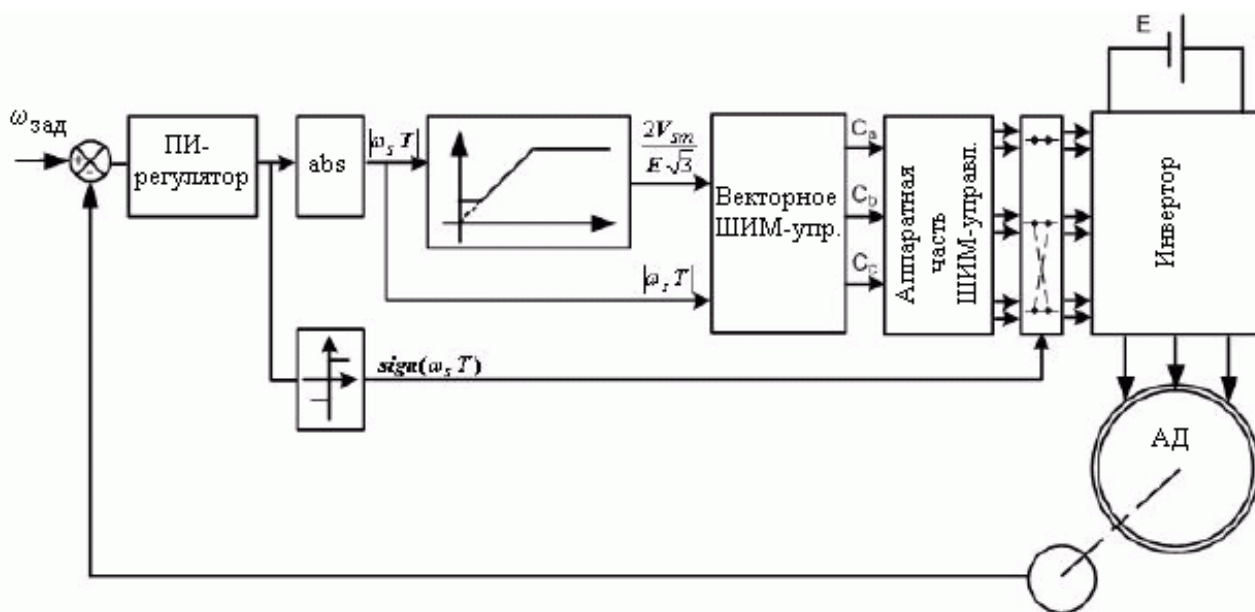


Рис. 5.21. Упрощенная схема системы автоматического управления скоростью АД, построенная по принципу V/f и использующая векторное управление

Однако функциональные блоки, с помощью которых выполняется преобразование переменных и формирование управляющих сигналов, принципы их работы, существенно отличаются от рассмотренных ранее.

Как уже отмечалось, удобно рассмотрение сложных вопросов векторного управления, осуществлять с использованием понятия пространственного вектора на выходе инвертора. В этом случае трехфазные напряжения, подаваемые на АД, представляется в виде одного вектора пространственное положение (угол поворота) и длина (модуль) которого зависит от амплитуд и начальных фаз статорных напряжений.

Фазные напряжения на АД - это выходные напряжения инвертора. Они, в свою очередь, при ШИМ управлении, зависят от состояния ключей инвертора. Если происходит переключение ключей, то и пространственный вектор (рис. 5.22) скачкообразно изменяет свое положение (угол, фазу). Каждому сочетанию ключей, на которые поданы отпирающие сигналы, соответствует свое положение пространственного вектора статорного напряжения.

На рис. 5.23 показана упрощенная структура инвертора напряжения в виде ключей, к которой подключены обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя.

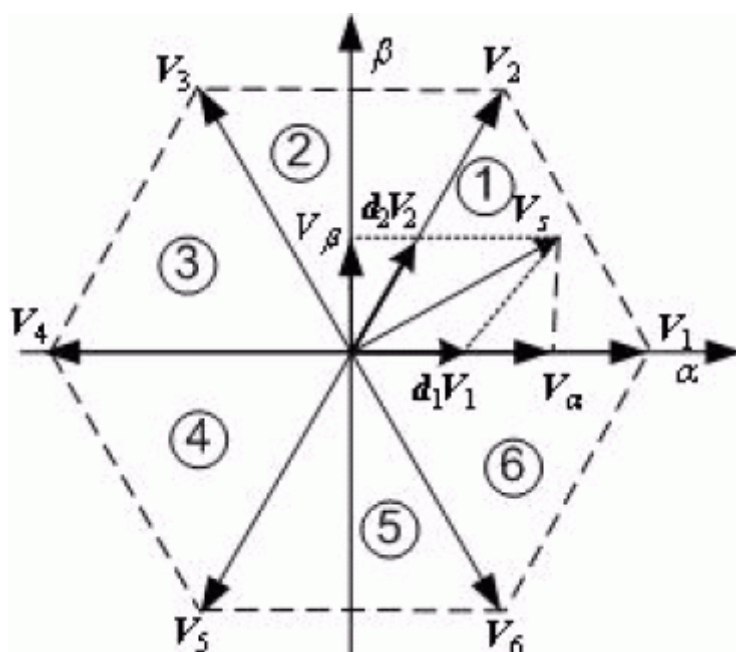


Рис.18.22. Пространственные векторы напряжения на выходе инвертора

Поскольку электродвигатель рассматривается как равномерная нагрузка с изолированной нейтралью, то $V_N = (V_A + V_B + V_C)/3$, $V_{AN} = V_A - V_N = (V_{AB} - V_{CA})/3$, $V_{BN} = V_B - V_N = (V_{BC} - V_{AB})/3$, а $V_{CN} = V_C - V_N = (V_{CA} - V_{BC})/3$.

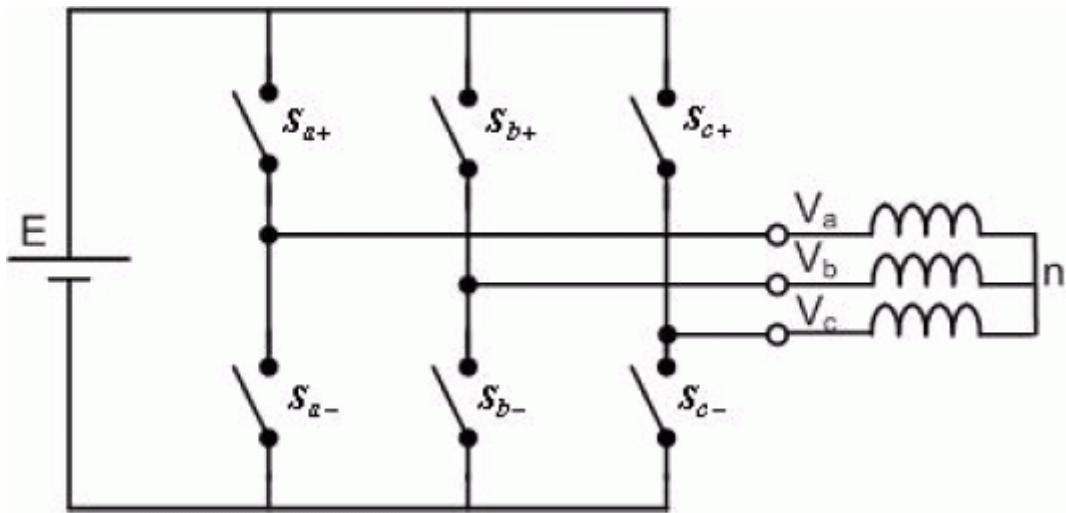


Рис.18.23. Упрощенная структура инвертора напряжения, подключенного к обмоткам асинхронного двигателя

В инверторах такого рода верхние силовые ключи могут находиться только во включенном или отключенном состоянии, а соответствующие нижние ключи, при этом, могут находиться только в противоположном состоянии. То есть в принципе возможно восемь состояний силовой схемы управления.

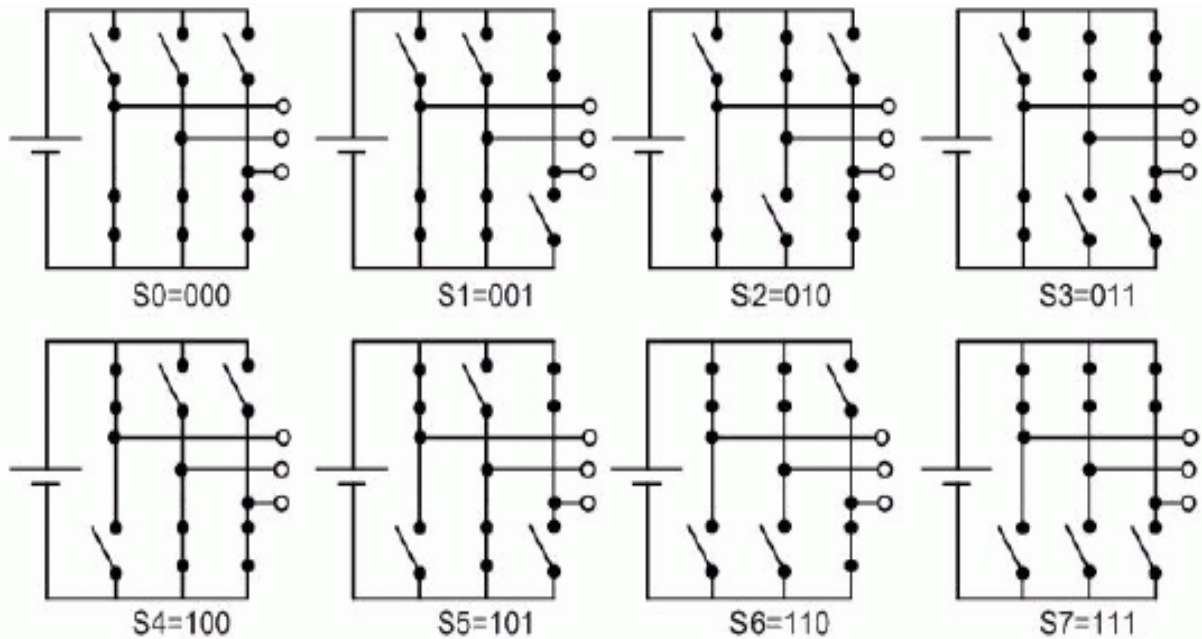


Рис. 5.24. Возможное положение ключей в схеме инвертора

Шесть из них приводят к формированию ненулевых фазных напряжений, а два оставшихся состояния приводят к формированию нулевых фазных напряжений.

Эти шесть ненулевых фазных напряжений, представляя пространственный вектор статорного напряжения, при переключении ключей образуют вершины шестиугольника (рис. 5.22).

Говорят, что на периоде выходного напряжения инвертора укладывается шесть периодов повторяемости пространственного вектора, каждому из которых соответствует определенное сочетание включенных полупроводниковых ключей.

С точки зрения поведения пространственного вектора статорного напряжения АД все способы управления можно поделить на следующие группы:

- а) регулирование модуля пространственного вектора;
- б) регулирование среднего модуля пространственного вектора;
- в) регулирование модуля и средней фазы пространственного вектора;
- г) регулирование среднего модуля и средней фазы пространственного вектора.

В системе координат, показанной рис. 5.22, любое статорное напряжение $V_s = V_b + j \cdot V_v = V_{sm} \cos(q) + j \cdot V_{sm} \sin(q)$ попадает вовнутрь одного из секторов шестиугольника и может быть выражено как линейное сочетание двух ненулевых фазных напряжений, которые определяют границы данного сектора: $V_s = d_k \cdot V_k + d_{k+1} \cdot V_{k+1}$. Приравнявая $d_k \cdot V_k + d_{k+1} \cdot V_{k+1}$ к $V_{sm} \cos(q) + j \cdot V_{sm} \sin(q)$ можно получить выражения для коэффициентов заполнения импульсов для каждого сектора.

Поскольку инвертор не может мгновенно генерировать напряжение V_s , то принцип векторного ШИМ - управления заключается в генерации напряжения с периодичностью T_s , среднее значение которого равно V_s , что достигается путем генерации напряжения V_k в течение $T_k = d_k \cdot T_s$ и V_{k+1} в течение $T_{k+1} = d_{k+1} \cdot T_s$. Поскольку $d_k + d_{k+1} \leq 1$ данные напряжения должны завершиться в течение периода коммутации T_s напряжением V_0 и/или V_7 .

Возможно несколько вариантов решений, у которых минимизация общих гармонических искажений статорного тока выполняется за счет приложения напряжений V_0 и V_7 одинаковой длительности $T_0 = T_7 = (1 - d_k - d_{k+1})T_s/2$. Напряжение V_0 эквивалентно приложенному напряжению в

начале и в конце периода коммутации, а V_7 - прикладывается по середине периода коммутации.

Выражения для коэффициентов заполнения импульсов имеют различный вид в каждом секторе. При внимательном их анализе можно прийти к выводу, что, все коэффициенты заполнения импульсов могут быть записаны унифицированным способом: $d_k = 2 \cdot V_{sm} \cdot \sin(q'') / E \cdot \sqrt{3}$ и $d_{k+1} = 2 \cdot V_{sm} \cdot \sin(q') / E \cdot \sqrt{3}$, где $q'' = p/3 - q'$, а $q' = q - (k-1)p/3$. Поскольку данные выражения не зависят от номера сектора, то их можно обозначить d_a и d_b . Поскольку область значений q' всегда находится в пределах $0 \dots p/3$, то при вычислении d_a и d_b необходима таблица синусов только для указанного интервала.

Это существенно снижает объем памяти, требуемый для хранения таблицы синусов.

Данные, необходимые для работы инвертора при векторном управлении и ШИМ, могут быть сформированы способом, показанным на рис. 5. 25.

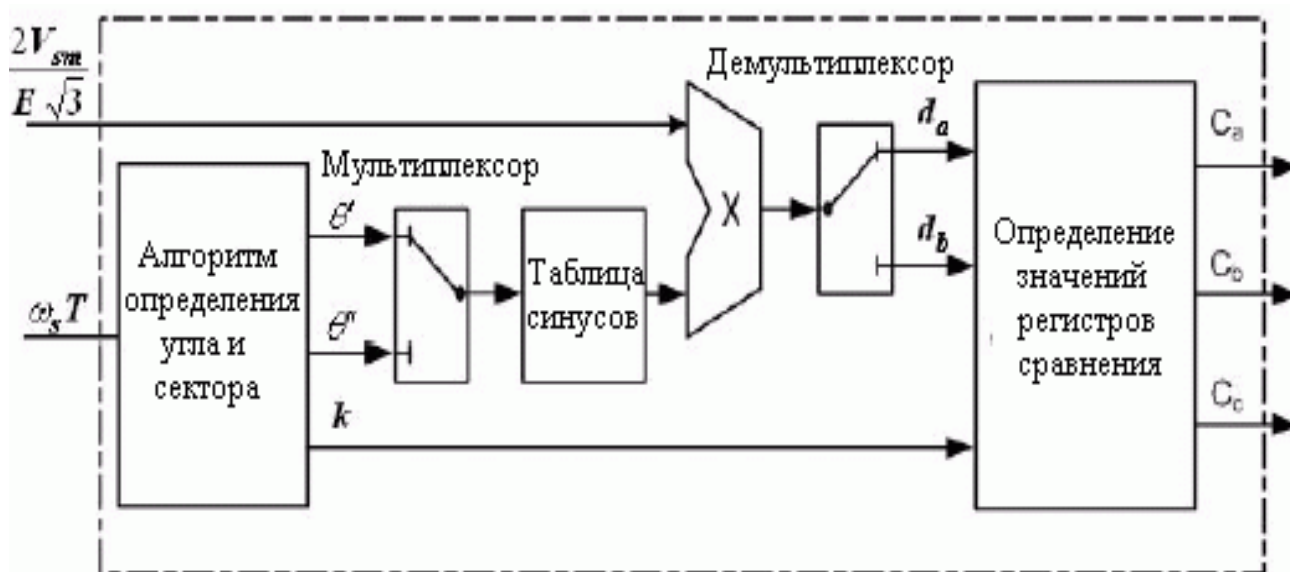


Рис. 5.25. Принцип формирования данных (C_a , C_b , C_c), необходимых для работы инвертора

Осциллограммы сигналов управления инвертором при этом будут иметь вид, показанный на рис. 5.26.

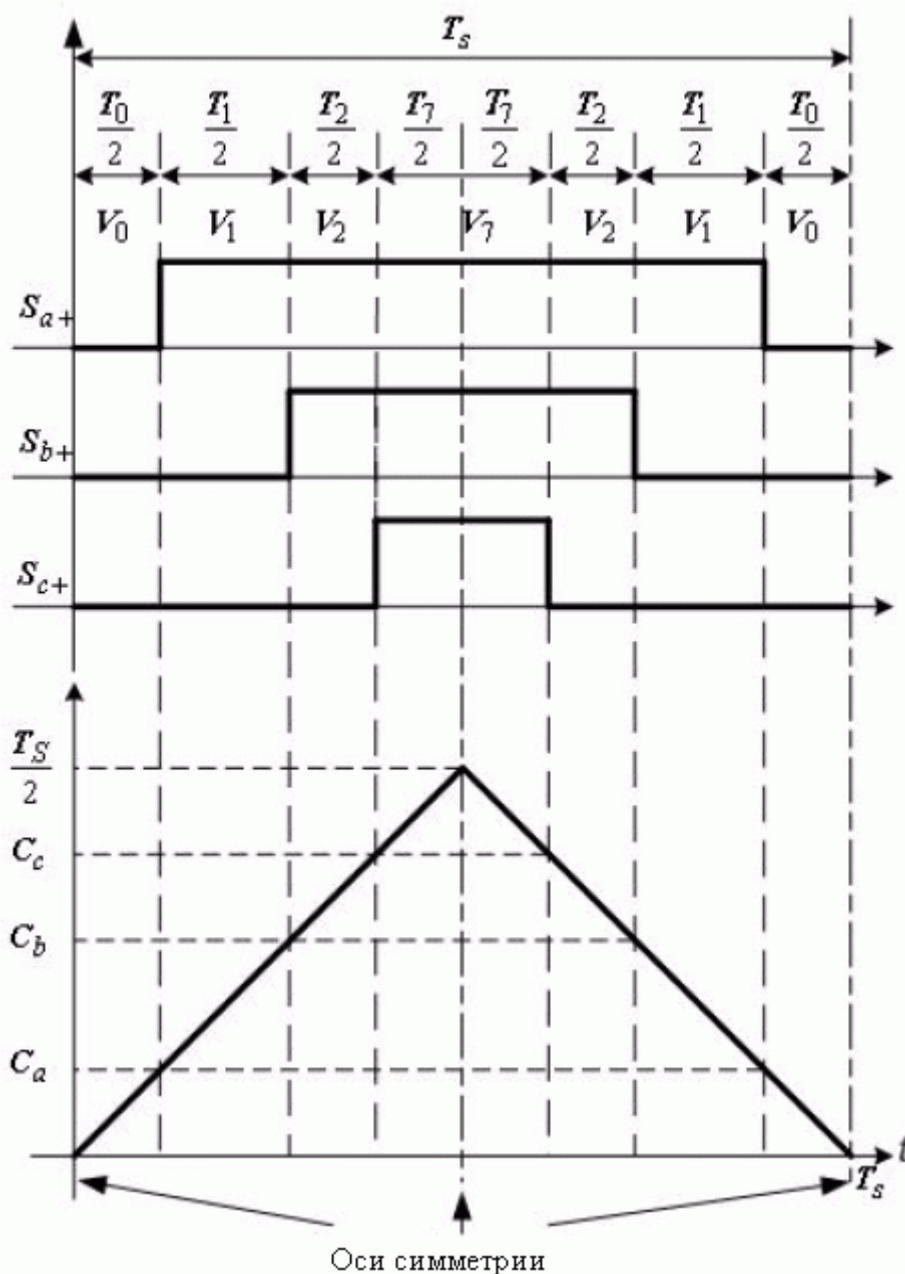


Рис. 5.26. Осциллограммы сигналов управления инвертором

5.3.3. Управление шаговыми электродвигателями

Для питания двигателя постоянного тока, в простейшем случае, требуется лишь источник постоянного напряжения, а необходимые коммутации обмоток выполняются коллектором. В шаговом двигателе все коммутации должен выполнять внешний контроллер. В настоящее время примерно в 95% случаев для управления шаговыми двигателями используются микроконтроллеры. В них для управления шаговым двигателем

лем в полношаговом режиме используют всего два сигнала, сдвинутые по фазе на 90 градусов.

Направление вращения зависит от того, какая фаза опережает. Скорость определяется частотой следования импульсов. В полушаговом режиме требуется уже минимум 4 сигнала.

Все сигналы управления шаговым двигателем в микроконтроллерах обычно формируются программно. Кроме того, применяют специальные микросхемы драйверов шагового двигателя, которые уменьшают количество требуемых от процессора динамических сигналов. Схема драйвера обычно выполняет три функции: включает и выключает ток в обмотках; меняет его направление; поддерживает заданное значение тока; обеспечивает как можно более быстрое нарастание и спад тока для получения хороших скоростных характеристик двигателя.

Типично эти микросхемы требуют тактовую частоту, которая является частотой повторения шагов и статический логический сигнал, который задает направление.

Иногда еще присутствует сигнал включения полушагового режима. Для микросхем драйверов, которые работают в микрошаговом режиме, требуется большее количество сигналов. Распространенным является случай, когда необходимые последовательности сигналов управления фазами формируются с помощью одной микросхемы, а необходимые токи фаз обеспечивает другая микросхема. Хотя в последнее время появляется все больше драйверов, реализующих все функции в одной микросхеме. Мощность, которая требуется от драйвера, зависит от размеров двигателя и составляет доли ватта для маленьких двигателей и до 10-20 ватт для больших двигателей.

При работе шагового двигателя требуется изменение направления магнитного поля независимо для каждой фазы. Изменение направления магнитного поля может быть выполнено разными способами.

В униполярных двигателях обмотки имеют отвод от середины или имеются две отдельные обмотки для каждой фазы. Направление магнитного поля меняется путем переключения половинок обмоток или целых обмоток. В этом случае требуются только два простых ключа А и В для каждой фазы (рис. 5.27).

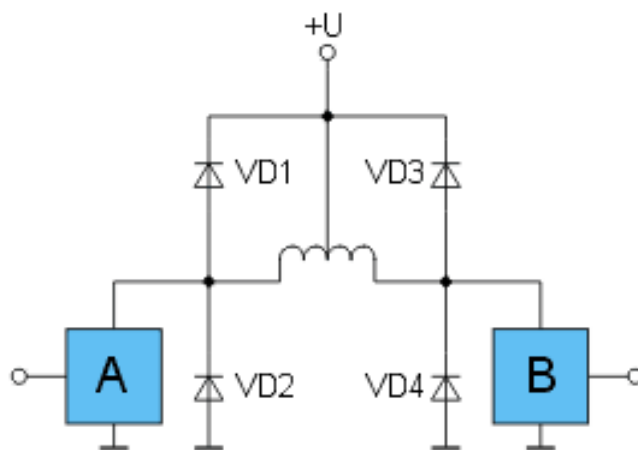


Рис. 5.27. Питание обмотки униполярного двигателя.

В биполярных двигателях направление меняется путем изменения полярности выводов обмоток. Для такой переполюсовки требуется полный H-мост (рис. 5.28). Управление ключами в том и другом случае должно осуществляться логической схемой, реализующей нужный алгоритм работы. Предполагается, что источник питания схем имеет номинальное для обмоток двигателя напряжение.

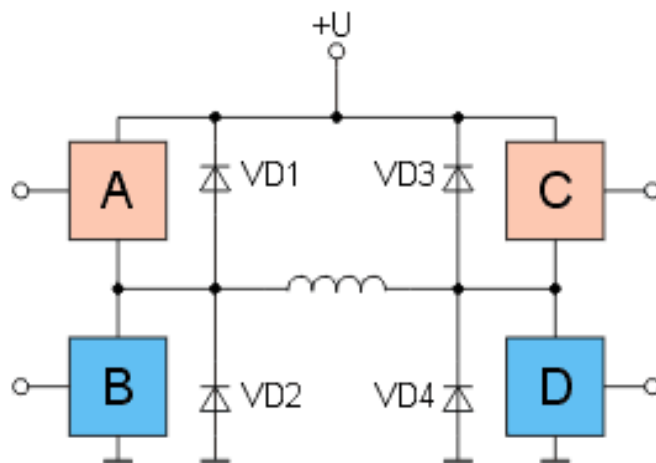


Рис. 5.28. Питание обмотки биполярного двигателя

Обмотки двигателя представляют собой индуктивность, а это значит, что ток не может бесконечно быстро нарастать или бесконечно быстро спадать без привлечения бесконечной разности потенциалов. При подключении обмотки к источнику питания ток будет с некоторой скоростью нарастать, а при отключении обмотки произойдет выброс напряже-

ния. Этот выброс способен повредить ключи, в качестве которых используются биполярные или полевые транзисторы. Для ограничения этого выброса устанавливают специальные защитные цепочки. Эти цепочки образованы диодами. При работе на больших скоростях требуется увеличивать скорость нарастания тока в обмотках, что возможно путем повышения напряжения источника питания. При этом максимальный ток обмотки должен быть ограничен с помощью дополнительного резистора.

Еще одним методом стабилизации тока в обмотках двигателя является ключевое широтно-импульсное регулирование. Современные драйверы шаговых двигателей используют именно этот метод. Ключевой стабилизатор обеспечивает высокую скорость нарастания тока в обмотках вместе с простотой его регулирования и очень низкими потерями. Еще одним преимуществом схемы с ключевой стабилизацией тока является и то, что она поддерживает момент двигателя постоянным, независимо от колебаний напряжения питания. Это позволяет использовать простые и дешевые нестабилизированные источники питания.

Для обеспечения высокой скорости нарастания тока используют напряжение источника питания, в несколько раз превышающее номинальное. Путем регулировки скважности импульсов, среднее напряжение и ток поддерживаются на номинальном для обмотки уровне. Поддержание производится в результате действия обратной связи. Последовательно с обмоткой включается резистор – датчик тока R (рис. 5.29а).

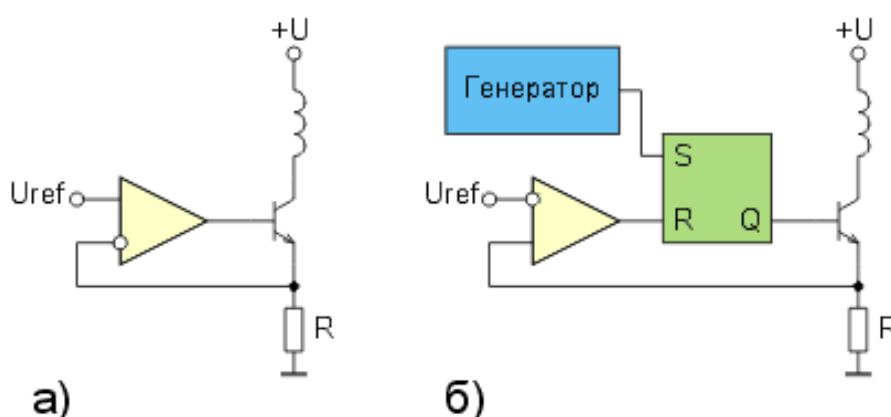


Рис. 5.29. Схемы стабилизации тока с ШИМ

Падение напряжения на этом резисторе пропорционально току в обмотке. Когда ток достигает установленного значения, ключ выключается, что приводит к падению тока. Когда ток спадает до нижнего порога, ключ снова включается. Этот процесс повторяется периодически, поддерживая среднее значение тока постоянным. Управляя величиной U_{ref} можно регулировать ток фазы, например, увеличивать его при разгоне и торможении и снижать при работе на постоянной скорости. Можно также задавать его с помощью ЦАП в форме синусоиды, реализуя, таким образом, микрошаговый режим. Такой способ управления ключевым транзистором обеспечивает постоянную величину пульсаций тока в обмотке, которая определяется гистерезисом компаратора. Однако частота переключений будет зависеть от скорости изменения тока в обмотке, в частности, от ее индуктивности и от напряжения питания. От указанных недостатков свободна схема с постоянной частотой переключения (рис. 5.29б). Ключевым транзистором управляет триггер, который устанавливается специальным генератором. Когда триггер устанавливается, ключевой транзистор открывается и ток фазы начинает расти. Вместе с ним растет и падение напряжения на датчике тока. Когда оно достигает опорного напряжения, компаратор переключается, сбрасывая триггер. Ключевой транзистор при этом выключается и ток фазы начинает спадать до тех пор, пока триггер не будет вновь установлен генератором. Такая схема обеспечивает постоянную частоту коммутации, однако величина пульсаций тока не будет постоянной. Частота генератора обычно выбирается не менее 20 кГц, чтобы двигатель не создавал слышимого звука.

Наиболее совершенные микросхемы драйверов имеют возможность регулировать скорость спада тока.

Драйвер шагового двигателя должен решать две основные задачи: это формирование необходимых временных последовательностей сигналов и обеспечение необходимого тока в обмотках. В интегральных реализациях обычно эти задачи выполняются разными микросхемами. К сожалению, существует некоторая путаница в терминологии относительно подобных микросхем. Понятие «драйвер» часто применяют ко многим микросхемам, даже если их функции сильно различаются. Иногда микросхемы логики называют «трансляторами». Далее мы будем называть «контроллером» микросхему, ответственную за формирование временных последовательностей; «драйвер» - мощная схема, предна-

значенную для питания обмоток двигателя. При этом термин «контроллер» может также обозначать законченное устройство управления шаговым двигателем. Необходимо отметить, что в последнее время все чаще контроллер и драйвер объединяются в одной микросхеме.

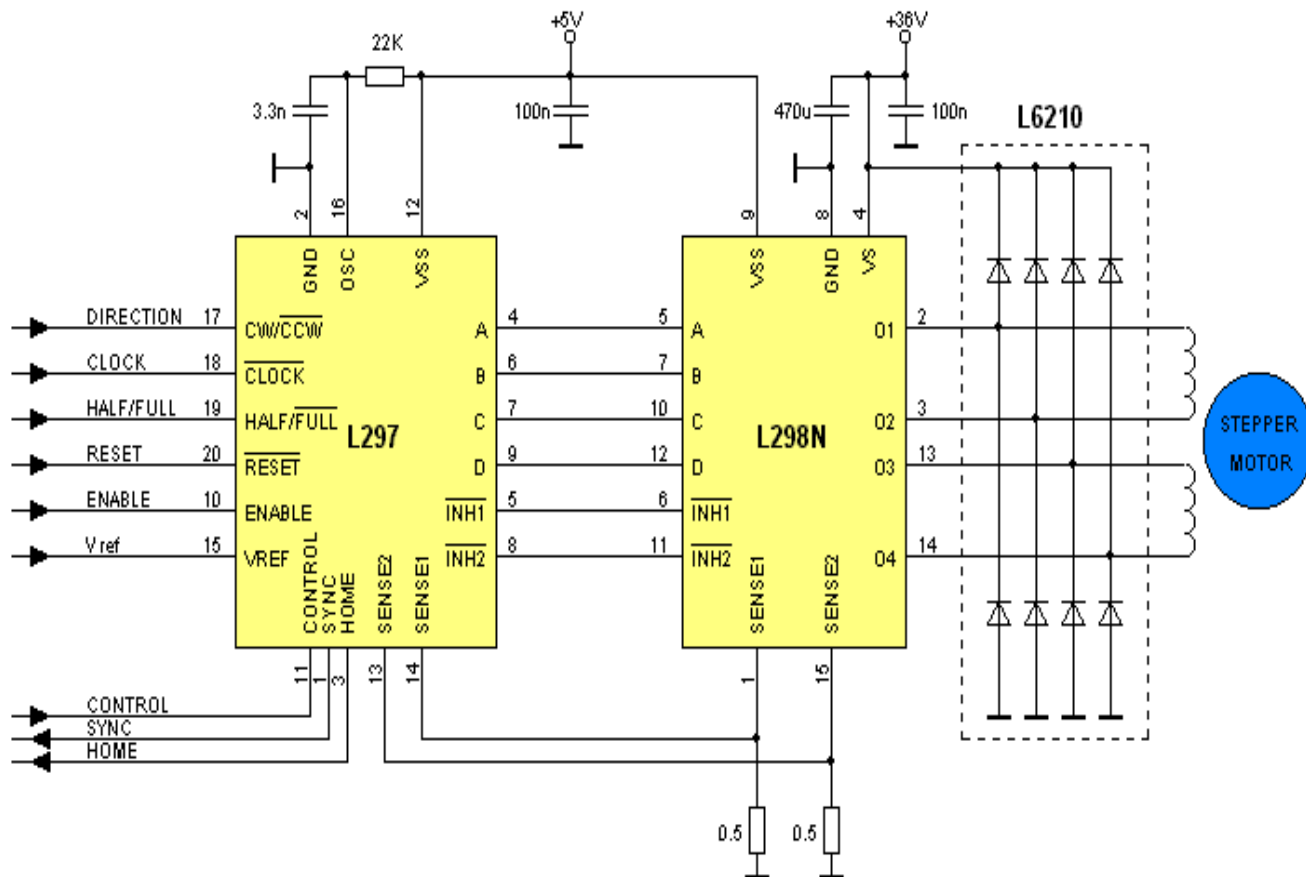


Рис. 5.29. Типовая схема включения микросхем L297 и L298N

Мостовые драйверы в интегральном исполнении выпускаются многими фирмами. Микросхемой, реализующей ШИМ - стабилизацию тока, является L297. Совместно с микросхемой мостового драйвера L293 или L298 они образуют законченную систему управления для шагового двигателя (рис. 5.30).

Микросхема L297 сильно разгружает управляющий микроконтроллер, так как от него требуется только тактовая частота CLOCK (частота повторения шагов) и несколько статических сигналов: DIRECTION – направление (сигнал внутренне синхронизирован, переключать можно в любой момент), HALF/FULL – полушаговый/полношаговый режим, RESET – устанавливает фазы в исходное состояние (ABCD = 0101),

ENABLE – разрешение работы микросхемы, V_{ref} – опорное напряжение, которое задает пиковую величину тока при ШИМ-регулировании. Кроме того, имеется несколько дополнительных сигналов. Сигнал CONTROL задает режим работы ШИМ - регулятора. При его низком уровне ШИМ - регулирование происходит по выходам INH1, INH2, а при высоком – по выходам ABCD. SYNC – выход внутреннего тактового генератора ШИМ. Он служит для синхронизации работы нескольких микросхем. Также может быть использован как вход при тактировании от внешнего генератора. HOME – сигнал начального положения (ABCD = 0101). Он используется для синхронизации переключения режимов HALF/FULL. В зависимости от момента перехода в полношаговый режим микросхема может работать в режиме с одной включенной фазой или с двумя включенными фазами.

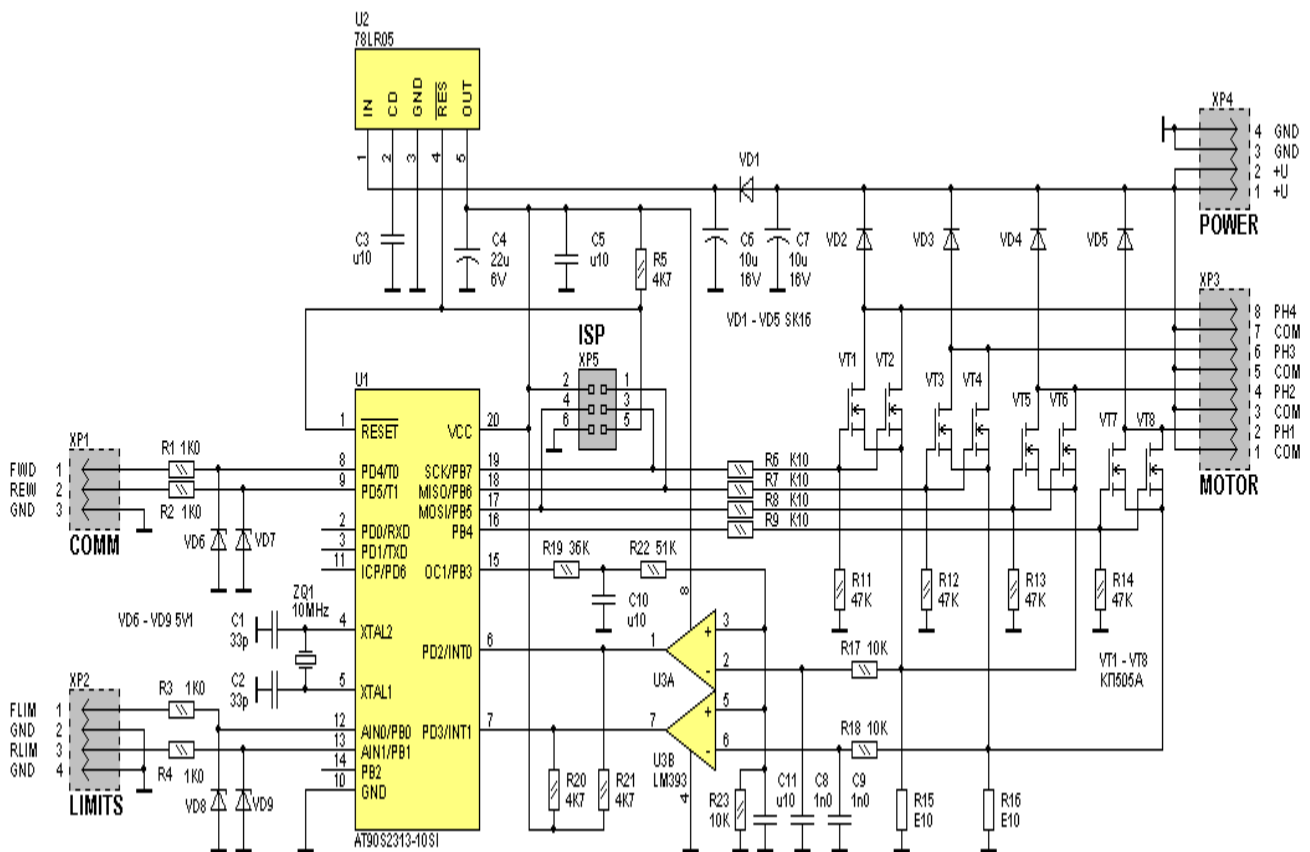


Рис. 5.30. Схема устройства для управления шаговым двигателем

Когда не предъявляется слишком жестких требований, контроллер можно реализовать полностью программно. При этом стоимость устройства управления получается очень низкой. Такой контроллер предна-

значен для управления униполярным шаговым двигателем (рис. 5.31) со средним током каждой обмотки до 2.5 А. Его также можно использовать и для управления менее мощными двигателями, например теми, что применялись для позиционирования головок в 5-дюймовых дисководах. Основой устройства (рис. 5.31) является микроконтроллер U1 (типа AT90S2313 фирмы Atmel). Сигналы управления обмотками двигателя формируются на портах PB4 – PB7 программно. Для коммутации обмоток используются 8 полевых транзисторов (VT1 – VT8), включенных параллельно по два (рис. 5.32) Эти транзисторы имеют корпус ТО-92 и могут коммутировать ток до 1.4А, сопротивление канала составляет около 0.3 Ома. Для того, чтобы транзисторы оставались закрытыми во время действия сигнала «сброс» микроконтроллера (порты в это время находятся в высокоимпедансном состоянии), между затворами и истоками включены резисторы R11 – R14. Для ограничения тока перезарядки емкости затворов установлены резисторы R6 – R9.

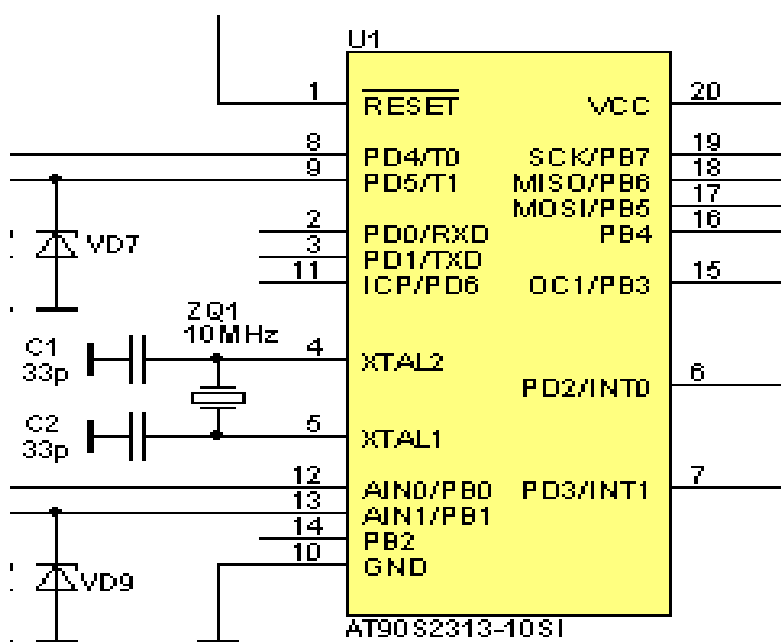


Рис. 5.31. Схема контроллера шагового двигателя

Данный контроллер не претендует на высокие скоростные характеристики, поэтому вполне устраивает медленный спад тока фаз, который обеспечивается шунтированием обмоток двигателя диодами VD2 – VD5. Для подключения шагового двигателя имеется 8-контактный разъ-

ем ХРЗ, который позволяет подключить двигатель, имеющий два отдельных вывода от каждой обмотки (как, например, ДШИ-200).

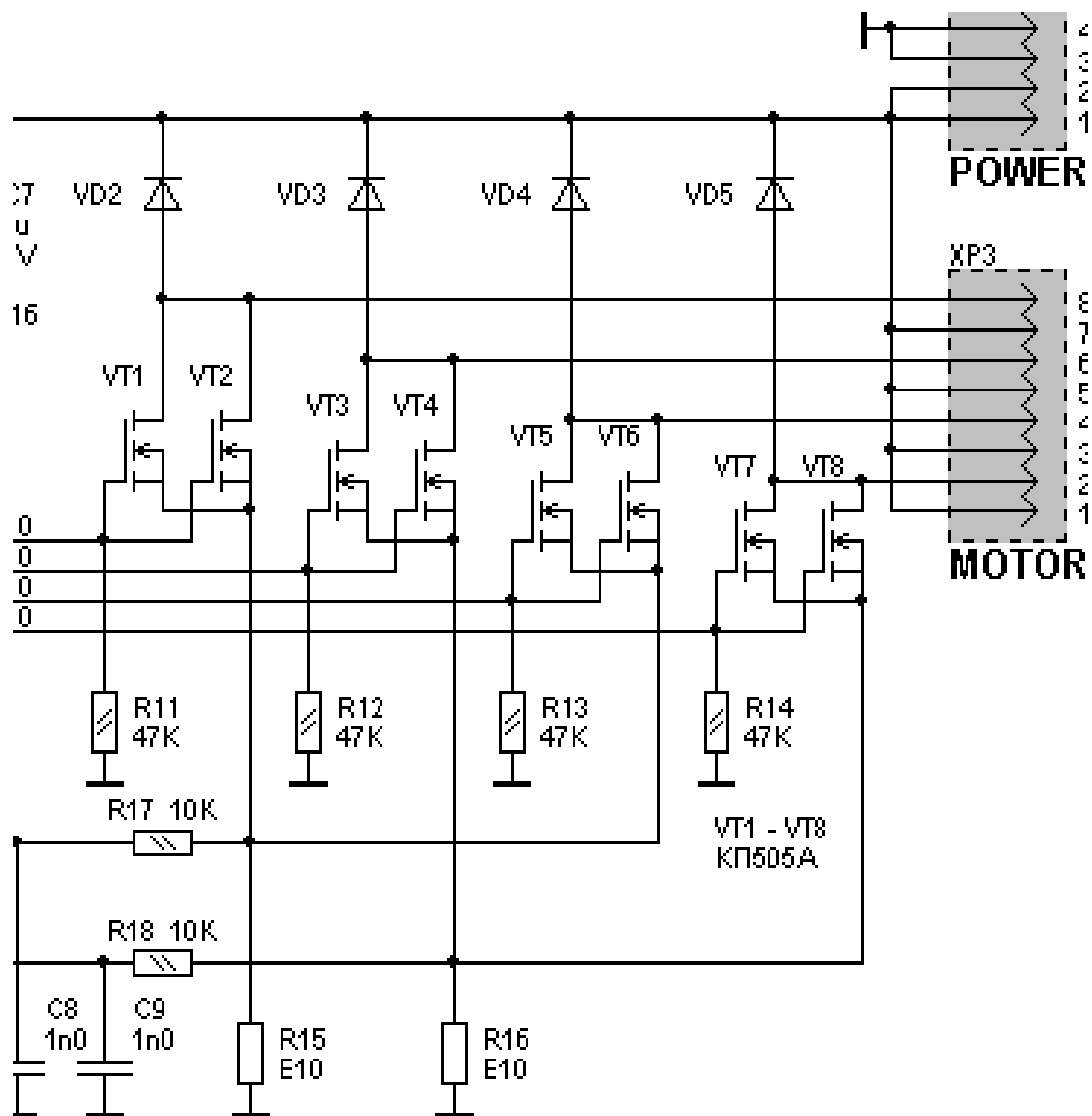


Рис. 5.32. Схема коммутации обмоток шагового двигателя

Для двигателей с внутренним соединением обмоток один или два общих контакта разъема останутся свободными. Стабилизация тока осуществляется с помощью ШИМ, которая тоже реализована программно. Для этого используются два датчика тока R15 и R16. Сигналы, снятые с датчиков тока, через ФНЧ R17C8 и R18C9 поступают на входы компараторов U3A и U3B. ФНЧ предотвращают ложные срабатывания компараторов вследствие действия помех. На второй вход каждого компаратора должно быть подано опорное напряжение, которое и определяет пиковый ток в обмотках двигателя. Это напряжение формируется

микроконтроллером с помощью встроенного таймера, работающего в режиме 8-битной ШИМ. Для фильтрации сигнала ШИМ используется двухзвенный ФНЧ R19C10R22C11. Одновременно резисторы R19, R22 и R23 образуют делитель, который задает масштаб регулировки токов фаз. В данном случае максимальный пиковый ток, соответствующий коду 255, выбран 5.11А, что соответствует напряжению 0.511В на датчиках тока. Учитывая тот факт, что постоянная составляющая на выходе ШИМ меняется от 0 до 5В, необходимый коэффициент деления равен примерно 9.7. Выходы компараторов подключены к входам прерываний микроконтроллера INT0 и INT1.

Для управления работой двигателя имеются два логических входа: FWD (вперед) и REW (назад), подключенных к разъему XP1. При подаче НИЗКОГО логического уровня на один из этих входов, двигатель начинает вращаться на заданной минимальной скорости, постепенно разгоняется с заданным постоянным ускорением. Разгон завершается, когда двигатель достигает заданной рабочей скорости. Если подается команда изменения направления вращения, двигатель с тем же ускорением тормозится, затем реверсируется и снова разгоняется.

Питание микроконтроллера формируется с помощью микросхемы стабилизатора 78LR05, которая одновременно выполняет функции монитора питания. При понижении напряжения питания ниже установленного порога эта микросхема формирует для микроконтроллера сигнал «сброс». Питание на стабилизатор подается через диод VD1, который вместе с конденсатором С6 уменьшает пульсации, вызванные коммутациями относительно мощной нагрузки, которой является шаговый двигатель. Питание на плату подается через 4-контактный разъем XP4, контакты которого задублированы.

Вычисление мгновенных значений скорости и периода следования шагов, обеспечивая необходимую кривую разгона, выполняет основная программа. Она позволяет осуществлять разгон и торможение двигателя с постоянным ускорением, а также вращение на постоянной скорости в полношаговом или полушаговом режиме.

Контрольные вопросы

1. Что означает понятие: управляемый объект (объект управления)?
2. Поясните типовую функциональную схему САУ.

3. На какие три типа могут быть подразделены в зависимости от характера изменения входного (задающего) управляющего сигнала $U_{вх}(t)$ САУ?
4. Поясните назначение системы автоматической стабилизации.
5. Поясните назначение системы программного управления.
6. Поясните назначение следящей системы.
7. Поясните понятие и назначение МИМО (multi – input multi – output, МИМО) системы управления.
8. Какими преимуществами обладает алгоритм цифрового управления по сравнению с аналоговой реализацией?
9. Перечислите основные особенности работы цифровых САУ.
10. Назовите и поясните отличительные признаки современных RISC контроллеров.
11. Как можно управлять частотой вращения двигателя управляя его рабочим напряжением?
12. Поясните способ скалярного управления асинхронным двигателем (со стабилизацией абсолютного скольжения) и его особенности.
13. Поясните метод векторного ШИМ – управления, его особенности и отличия от способа скалярного управления асинхронным двигателем.
14. На какие группы с точки зрения поведения пространственного вектора статорного напряжения АД можно поделить все способы управления?
15. Поясните метод стабилизации тока в обмотках двигателя: ключевое широтно-импульсное регулирование.

Рекомендуемая литература

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 221 с.
2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. – М.: Высшая школа, 2004. – 790 с.
3. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники. – М.: Высшая школа, 2000. – 752 с.
4. Иванов И.И. Электротехника: Учебник для вузов / И.И. Иванов, В.С. Равдоник. – М.: Высшая школа, 1984. – 375 с.
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 705 с.
6. Лачин В.В. Электроника: Учебное пособие для вузов / В.В. Лачин. – Ростов на Дону: Феникс, 2002. – 576 с.
7. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с.
8. Партала О.Н. Цифровая электроника. – СПб.: Наука и Техника, 2001. – 224 с.
9. Патон Б. Основы аналоговой и цифровой электроники. М.: Наука, 2002. – 203 с.
10. Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. СПб.; М.; Харьков; Минск: Питер, 2003. – 512 с.
11. Прянишников В.А. Электроника: Полный курс лекций. – 4 изд. – СПб.: КОРОНА-Принт, 2004. – 416 с.
12. Четверухин Б.М. Основы электротехники и электроники: Конспект лекций / Б.М. Четверухин, Г.С. Прокудин. – К.: Изд-во Европейского ун-та, 2002. – 149 с.

Содержание

Введение	3
1. Комбинационные цифровые устройства и цифровые автоматы	7
1.1. Комбинационные устройства и коммутаторы цифровой электроники	7
1.1.1. Общие сведения о комбинационных логических схемах.....	7
1.1.2. Шифраторы и дешифраторы	9
1.1.3. Мультиплексоры и демультимплексоры	15
1.1.4. Сумматоры и схемы сравнения двоичных чисел	21
1.2. Последовательностные цифровые устройства электроники.....	25
1.2.1. Общие сведения о триггерах, как элементах с «памятью».....	25
1.2.2. Асинхронные RS-триггеры.....	29
1.2.3. Синхронные (тактируемые) RS-триггеры	33
1.2.4. Т – триггеры	36
1.2.5. D-триггеры с задержкой двоичной информации	37
1.2.6. JK – триггеры	42
1.3. Счетчики и делители.....	46
1.3.1. Общие сведения о счетчиках и делителях.....	46
1.3.2. Двоично – десятичные счетчики. Делители частоты....	53
1.3.3. Таймеры/счетчики микроконтроллеров.....	58
Контрольные вопросы	58
2. Устройства ввода, вывода, преобразования и хранения цифровой информации	60
2.1. Регистры	61
2.2. Цифро – аналоговые и аналогово – цифровые преобразователи.....	77
2.2.1 Цифро – аналоговые преобразователи.....	77
2.2.2. Аналогово – цифровые преобразователи (АЦП).....	92
2.3. Устройства хранения цифровой информации (внутренняя память).....	119
Контрольные вопросы	128
3. Электрические машины постоянного тока	130
3.1. Общие сведения об электрических машинах постоян-	

ного тока	131
3.1.1. Принцип действия машины постоянного тока	131
3.1.2. Устройство и свойства коллекторного электри- ческого двигателя постоянного тока	138
3.2. Способы и схемы управления электрическими двигателями постоянного тока	162
Контрольные вопросы	164
4. Асинхронные и синхронные электрические машины	167
4.1. Асинхронные электрические машины.....	167
4.1.1. Устройство и принцип действия асинхронного электрического двигателя	167
4.1.2. Основные характеристики и параметры асинхронных двигателей	174
4.1.3. Разновидности асинхронных двигателей	184
4.2. Синхронные электрические машины	191
4.3. Особенности пуска двигателей с постоянными магнитами	200
4.4. Шаговые двигатели	201
Контрольные вопросы	218
5. Электронные системы управления с микроконтроллерами ...	220
5.1. Общие сведения о системах автоматического Управления	222
5.1.1. Задачи управления и общие положения, опре- деляющие принципы построения САУ	222
5.1.2. Особенности САУ с микроконтроллерами в контуре Управления	232
5.2. Общие сведения о микроконтроллерах	234
5.3. Управление электродвигателями с помощью микроконтроллера	241
5.3.1. Управление безколлекторными электродвигателями постоянного тока с помощью микроконтроллера	242
5.3.2. Управление асинхронными электродвигателями	257
5.3.3. Управление шаговыми электродвигателями	269
Контрольные вопросы	278
Рекомендуемая литература	280

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ
**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.
ИЗДЕЛИЯ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ**

Учебное пособие

Часть 4

Авторы: **Гоков Александр Михайлович**
Жидко Евгений Анатольевич

Ответственный за выпуск **Бондаренко Е. А.**
Ответственный редактор **Седова Л. Н.**

Редактор **Демченко Н. И.**
Корректор **Демченко Н. И.**

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ
**ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ЕЛЕКТРОНІКИ.
ВИРОБИ ЦИФРОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ
ТА ЕЛЕКТРОДВИГУНИ**

Навчальний посібник

Частина 4

Автори: **Гоков Олександр Михайлович**
Жидко Євген Анатолійович

ISBN 966-676-186-6

План 2007 г. Поз. №42-П.

Подп. в печ. *22.02.2009* Формат 60 x 90 1/16. Бумага MultiCopy. Печать Riso.
Усл.-печ. л. 17,75. Уч.-изд. л. 18,64. Тираж *400* экз. Зак. № *46*

Свидетельство о внесении в Государственный реестр субъектов издательского дела Дк №481 от 13.06.2001 г.

Издатель и изготовитель — издательство ХНЭУ, 61001, г. Харьков, просп. Ленина, 6а

Гоков А.М., Жидко Е.А.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ИЗДЕЛИЯ ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

У Ч Е Б Н О Е П О С О Б И Е

Излагаются вопросы, связанные с изучением построения и работы комбинационных цифровых устройств и цифровых автоматов. Изучаются устройства ввода, вывода, преобразования и хранения цифровой информации; принципы построения и функционирования электрических машин постоянного тока, асинхронных и синхронных машин; рассмотрены идеи, лежащие в основе работы электронных систем управления с микроконтроллерами. Излагаются основы теории функционирования систем управления с микроконтроллерами. Приведен широкий круг характерных практических примеров.



ИЗДАТЕЛЬСТВО **ХНЭУ**
ХАРЬКОВ 2007