

С.В. Пономарев, А.Г. Дивин, Г.В. Мозгова, М.М. Мордасов, А.П. Савенков, А.А. Стенин

# КОМПОНЕНТЫ ПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное электронное издание на компакт-диске

Тамбов  
Издательство ФГБОУ ВПО "ТГТУ"  
2014



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический университет»



**С. В. ПОНОМАРЕВ, А. Г. ДИВИН, Г. В. МОЗГОВА,  
М. М. МОРДАСОВ, А. П. САВЕНКОВ, А. А. СТЕНИН**

# **КОМПОНЕНТЫ ПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Рекомендовано Ученым советом  
Тамбовского государственного технического университета  
в качестве электронного учебного пособия  
для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению  
подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Учебное пособие подготовлено в рамках выполнения  
совместного Европейского проекта по программе «Темпус»  
«Магистерская программа с двумя дипломами (ЕС и страны-партнера)  
по автоматизации/мехатронике»

Учебное электронное издание  
на компакт-диске



---

Тамбов  
• Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ» •  
2014



УДК 338.24.004.12(075.8)

ББК У291.823я73

П56

Рецензенты:

Доктор технических наук,  
профессор Технического университета – София (Болгария)

*Любомир Димитров*

Кандидат технических наук, Первый заместитель генерального директора  
ОАО «Завод подшипников скольжения» (г. Тамбов, Россия)

*А. В. Колмаков*

Доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (г. Тамбов, Россия)

*М. В. Соколов*

Авторский коллектив:

*С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Г. В. Мозгова, М. М. Мордасов,*

*А. П. Савенков, А. А. Стенин*

**Пономарев, С. В.**

П56

Компоненты приводов мехатронных устройств [Электронный ресурс] : учебное пособие / С. В. Пономарев [и др.]. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 5,34 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана. – ISBN 978-5-8265-1294-4.

Изложены теоретические и практические аспекты разработки, использования и обслуживания приводов мехатронных устройств. Рассматриваются исполнительные механизмы различных типов, преобразователи движения и вопросы моделирования приводов. Представлен учебный материал по электродвигателям постоянного и переменного тока; поршневым, сильфонным, мембранным и другим пневматическим и гидравлическим исполнительным механизмам. Приводятся основные характеристики, достоинства и недостатки, объясняется принцип работы компонентов приводов мехатронных устройств. Представлены электрические, гидравлические и пневматические схемы управления соответствующими исполнительными механизмами.

Предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника».

УДК 338.24.004.12(075.8)

ББК У291.823я73

Проект финансируется при поддержке Европейской Комиссии.  
Содержание данной публикации/материала является предметом ответственности автора и не отражает точку зрения Европейской Комиссии.

ISBN 978-5-8265-1294-4

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2014

Ministry of Education and Science of Russia

Tambov State Technical University



**S. V. PONOMAREV, A. G. DIVIN, G. V. MOZGOVA,  
M. M. MORDASOV, A. P. SAVENKOV, A. A. STENIN**

# **THE COMPONENTS OF DRIVES FOR MECHATRONIC DEVICES**

Recommended by the Academic Council of Tambov State Technical University  
as a study guide for Bachelor and Master students studying  
in the direction 15.03.06 «Mechatronics and Robotics»

The study guide was prepared during realization of Joint European Project  
«EU-PC Double Degree Master Program in Automation / Mechatronics»



---

Tambov

• FSBEI HPE «TSTU Publishing House» •

2014

UDK 338.24.004.12(075.8)  
BBK Y291.823я73  
P56

Reviewers:

Doctor of Eng., Professor of Technical University of Sofia (Bulgaria)  
*Lubomir Dimitrov*

Candidate of Technical Sciences,  
First Deputy Director of JSC «Plant of Plain Bearings» (Tambov, Russia)  
*A. V. Kolmakov*

Doctor of Technical Sciences,  
Assistant Professor of Tambov State Technical University (Tambov, Russia)  
*M. V. Sokolov*

Group of authors:

S. V. Ponomarev, A. G. Divin, G. V. Mozgova,  
M. M. Mordasov, A. P. Savenkov, A. A. Stenin

**Ponomarev, S. V.**

P56 The components of drives for mechatronic devices [Electronic Resource] : study guide / S. V. Ponomarev [et al.]. – Tambov : Tambov State Technical University, 2014. – 1 CD-ROM. – System requirements : Computer of Pentium class II ; CD-ROM-driver ; 5,34 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; Mouse. – Title on Screen. – ISBN 978-5-8265-1294-4.

The study guide presents the theoretical and practical aspects of the development, use and servicing of the drives for mechatronic devices. Different types of actuators, motion transformers and topics of drives simulation are considered. Training material on electric AC and DC motors; piston, bellow, diaphragm and other pneumatic and hydraulic actuators is presented. The basic characteristics, advantages and disadvantages, the operating principle of the drives components for mechatronic devices are described. The electrical, hydraulic and pneumatic control circuits for corresponding actuators are presented.

The guide is destined for study the courses «Fundamentals of Mechatronics and Robotics», «Details of mechatronic modules, robots, and their design», «Electric and hydraulic actuators of mechatronic and robotic devices,» «Control of mechatronic systems and industrial networks» by students of Bachelor's and Master's degree programs in direction of training 15.03.06 «Mechatronics and Robotics».

UDK 338.24.004.12(075.8)  
BBK Y291.823я73

The project is funded with support of the European Commission.  
The contents of this publication / material is the sole responsibility of the author and do not reflect the views of the European Commission.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Предлагаемое учебное пособие подготовлено группой авторов ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», профессором Киевского политехнического университета А. А. Стениным и включает в себя:

введение (д.т.н., профессор С. В. Пономарев);

главу 1. Электрические исполнительные механизмы (к.т.н., доцент А. П. Савенков, д.т.н., доцент А. Г. Дивин);

главу 2. Пневматические приводы систем мехатроники (д.т.н., профессор М. М. Мордасов);

главу 3. Гидравлические исполнительные механизмы и гидроприводы в составе мехатронных и робототехнических систем (д.т.н., профессор С. В. Пономарев);

главу 4. Механические преобразователи движения (к.т.н., доцент Г. В. Мозгова);

главу 5. Моделирование приводов мехатронных систем (д.т.н., профессор А. А. Стенин).

Учебное пособие подготовлено по результатам многократных чтений лекций, посвященных рассмотрению основных компонентов технических средств и приводов автоматических мехатронных систем, в том числе:

- электродвигатели постоянного и переменного тока;
- поршневые, сильфонные, мембранные и другие пневматические и гидравлические исполнительные механизмы;
- преобразователи движения.

## ВВЕДЕНИЕ

---

Мехатроникой называют область науки и техники, основанной на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей и вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатронную систему можно условно разделить на несколько частей:

- механическую, обеспечивающую перемещение рабочих органов;
- управляющую, построенную на основе микропроцессоров или логических устройств;
- электронную, обеспечивающую передачу сигнала от датчиков к микропроцессорам и от микропроцессоров к исполнительным механизмам;
- программную, реализующую заданные алгоритмы управления.

Автоматизация является одной из ветвей мехатроники, а системы автоматического регулирования (САР) – составной частью мехатронных систем. Рассматривая приводы мехатронных систем, невозможно не говорить об обратной связи. Перемещение рабочего органа должно быть полностью контролируемым. По этой причине для понимания принципа работы приводов мехатронных систем рассмотрим основные положения теории автоматического управления.

Структурную схему системы автоматического регулирования (САР) в теории автоматического управления принято изображать так, как показано на рис. В.1, а. С точки зрения теории автоматического управления в состав САР входят:

- а) объект регулирования, входными сигналами которого являются регулирующее воздействие  $x_p$  и возмущающие воздействия  $x_1^B, x_2^B, \dots, x_n^B$ , а выходным сигналом – регулируемый параметр  $y$ ;
- б) автоматический регулятор, входными сигналами которого являются регулируемый параметр  $y$  и сигнал задания  $u_3$ , а выходным сигналом – регулирующее воздействие  $x_p$ .

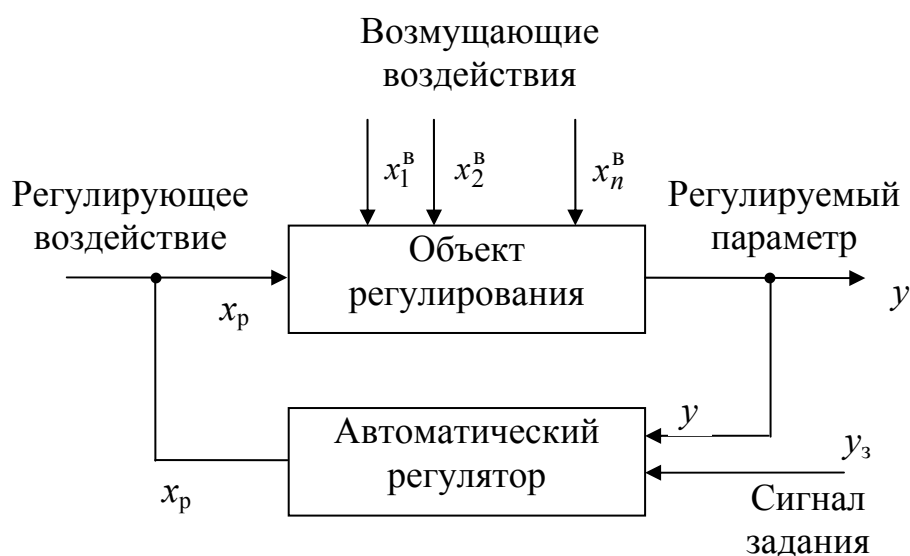
Автоматический регулятор сравнивает регулируемый параметр  $y$  с сигналом задания  $u_3$ , и в зависимости от знака и величины сигнала рассогласования  $\varepsilon = y - u_3$ ,

вырабатывает такое регулирующее воздействие  $x_p = f(\varepsilon)$ , чтобы вернуть регулируемый параметр  $y$  к заданному значению  $y_3$ .

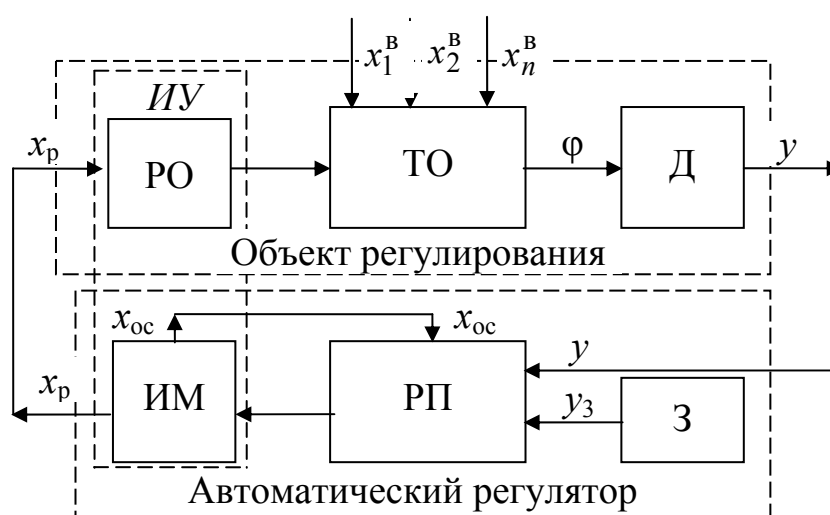
Основными техническими средствами автоматики, входящими в состав САР (см. рис. В.1, б), являются:

ТО – технологический объект (аппарат);

Д – датчик (термопара, термосопротивление, манометр, влагомер и т.п.), преобразующий измеряемую физическую величину  $\varphi$  в электрический, пневматический или гидравлический сигнал  $y$ , удобный для дальнейшего пользования;



а)



б)

Рис. В.1. Структурная схема САР (а) и основные технические средства автоматики (б), входящие в состав САР



РП – регулирующий прибор, который сравнивает значение регулируемого параметра  $y$  с сигналом задания  $y_3$  и совместно с исполнительным механизмом ИМ формирует заданный закон регулирования;

З – задатчик, служащий для формирования сигнала задания  $y_3$  (задатчик часто конструктивно выполняется в составе регулирующего прибора РП);

ИМ – исполнительный механизм (электродвигательный, электромагнитный, пневматический, гидравлический), служащий для перемещения затвора регулирующего органа РО; в некоторых случаях с выхода исполнительного механизма ИМ на вход регулирующего прибора РП подается сигнал обратной связи  $x_{ос}$ ;

РО – регулирующий орган (клапан, вентиль, задвижка, шибер, активное электрическое сопротивление и т.п.), служащий для изменения подводимого к объекту материального или энергетического потока.

Если сопоставить схемы, приведенные на рис. В.1, *а* и рис. В.1, *б*, то видно, что в теории автоматического управления к объекту регулирования относят технологический объект ТО, датчик Д и регулирующий орган РО, а автоматическим регулятором считается комплект, состоящий из регулирующего прибора РП, задатчика З и исполнительного механизма ИМ.

Комплект, состоящий из исполнительного механизма ИМ и регулирующего органа РО, часто называют исполнительным устройством ИУ. Исполнительный механизм является устоявшимся термином у инженеров по автоматизации. Более широко распространен термин «привод», который применяют во всех инженерных науках. Учитывая, что в мехатронных системах привод, как правило, является составной частью системы автоматического регулирования, в настоящей работе оба термина используются равнозначно.

Рассмотрим подробнее принцип действия и устройство исполнительных механизмов и регулирующих органов.

## **В. 1. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ**

Исполнительным механизмом является звено исполнительного устройства, преобразующее получаемую энергию в перестановочное усилие для управления затвором регулирующего органа. По виду используемой энергии, создающей пе-

рестановочное усилие, исполнительные механизмы делятся на электрические, пневматические и гидравлические.

В пневматических исполнительных механизмах перестановочное усилие создается за счет действия давления сжатого воздуха на мембрану, поршень или сильфон. Соответственно различают поршневые, мембранные и сильфонные исполнительные механизмы. Они могут быть пружинными и беспружинными. В пружинных механизмах давление сжатого воздуха подводится к одной рабочей полости, причем перестановочное усилие в одном направлении создается силой давления сжатого воздуха, а в обратном – силой упругости сжатой пружины, т.е. значительная часть усилия, создаваемого за счет действия давления, тратится на сжатие пружины. От этого недостатка свободны беспружинные исполнительные механизмы, в которых перестановочное усилие в противоположных направлениях создается действием давления с обеих сторон мембраны или поршня (давление с одной стороны возрастает, а с другой уменьшается, или же наоборот). Сильфонные исполнительные механизмы применяются весьма редко и лишь для создания небольших перестановочных усилий.

Прямолинейные мембранные пружинные и беспружинные механизмы, дополненные рычажной передачей, обеспечивают поворотное перемещение выходного звена.

Наиболее широко применяются гидравлические исполнительные механизмы в виде поршневых механизмов, однако при небольших давлениях жидкости и небольшой длине хода могут применяться мембранные и сильфонные гидравлические исполнительные механизмы. Обычно поршневые гидравлические исполнительные механизмы применяются при давлении жидкости в диапазоне 2,5 – 20 МПа (25 – 200 кгс/см<sup>2</sup>), поэтому они могут развивать большие перестановочные усилия, сохраняя при этом относительно небольшие габариты. Как правило, они не имеют возвратных пружин, т.е. перемещение поршня в обоих направлениях осуществляется силой давления жидкости.

Существуют также лопастные гидравлические исполнительные механизмы, в которых выходное звено совершает поворот вокруг своей оси примерно на 250 – 300°, однако применяются они в настоящее время достаточно редко ввиду сложности изготовления и ремонта.

Электрические исполнительные механизмы по принципу действия подразделяются на электродвигательные и электромагнитные; электродвигательные исполнительные механизмы, основные параметры которых определены ГОСТ 7192–62, по характеру движения выходного звена подразделяются на поворотные (однооборотные), многооборотные и прямоходные.

Электромагнитные исполнительные механизмы обеспечивают лишь поступательное перемещение выходного звена. Электромагнитные исполнительные механизмы имеют ограниченное применение: они могут применяться лишь для позиционного регулирования при небольших ходах до 10 – 45 мм и для создания небольших перестановочных усилий. Электрические исполнительные механизмы могут выпускаться в нормальном и взрывоопасном исполнении. При этом следует отметить, что взрывоопасное исполнение значительно увеличивает габариты, вес и стоимость электрических исполнительных механизмов.

Для создания больших перестановочных усилий также применяются гидравлические исполнительные механизмы. Эти механизмы содержат в себе электродвигатели, местную насосную станцию, а также поршневые и вспомогательные устройства.

На рисунке В.2 показана классификация наиболее распространенных конструкций исполнительных механизмов.

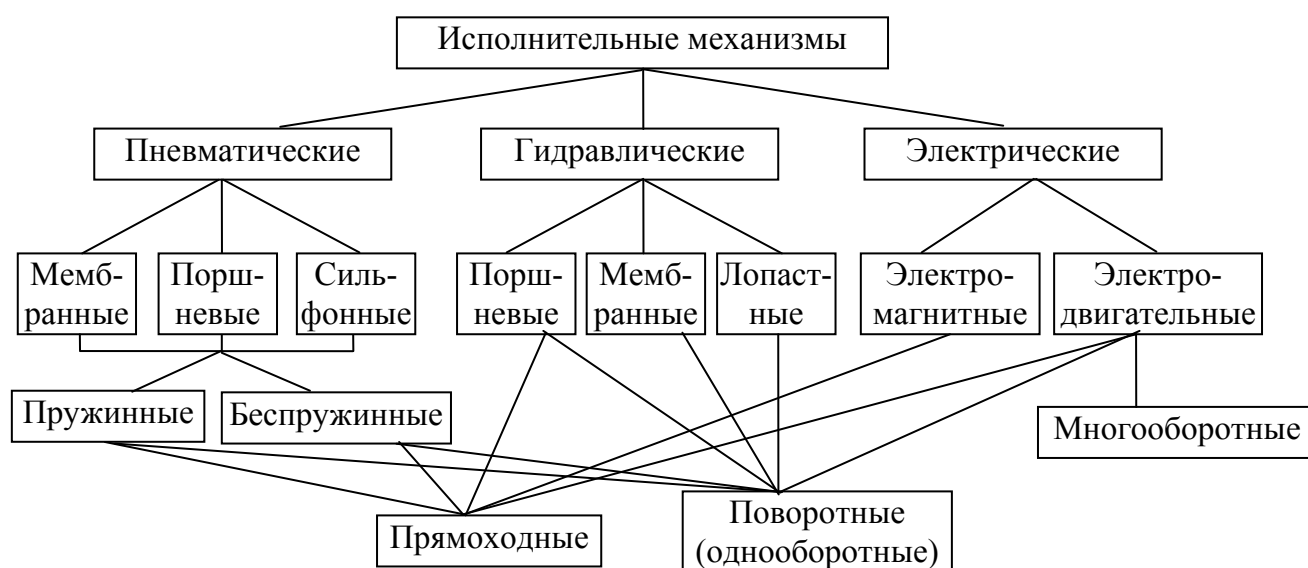


Рис. В.2. Классификация исполнительных механизмов

Исполнительные устройства в зависимости от вида исполнительного механизма называются пневматическими, гидравлическими, электрическими или электрогидравлическими.

## В.2. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ

Регулирующим органом называется звено исполнительного устройства, представляющее собой переменное гидравлическое (пневматическое, электрическое, магнитное и т.п.) сопротивление и воздействующее на расход (поток) среды (энергии) за счет изменения своего сопротивления, например, за счет изменения проходного сечения. Наиболее часто для непрерывного регулирования применяют следующие типы регулирующих органов (рис. В.3), а именно:

а) заслоночные, в которых изменение пропускной способности достигается поворотом затвора (заслонки);

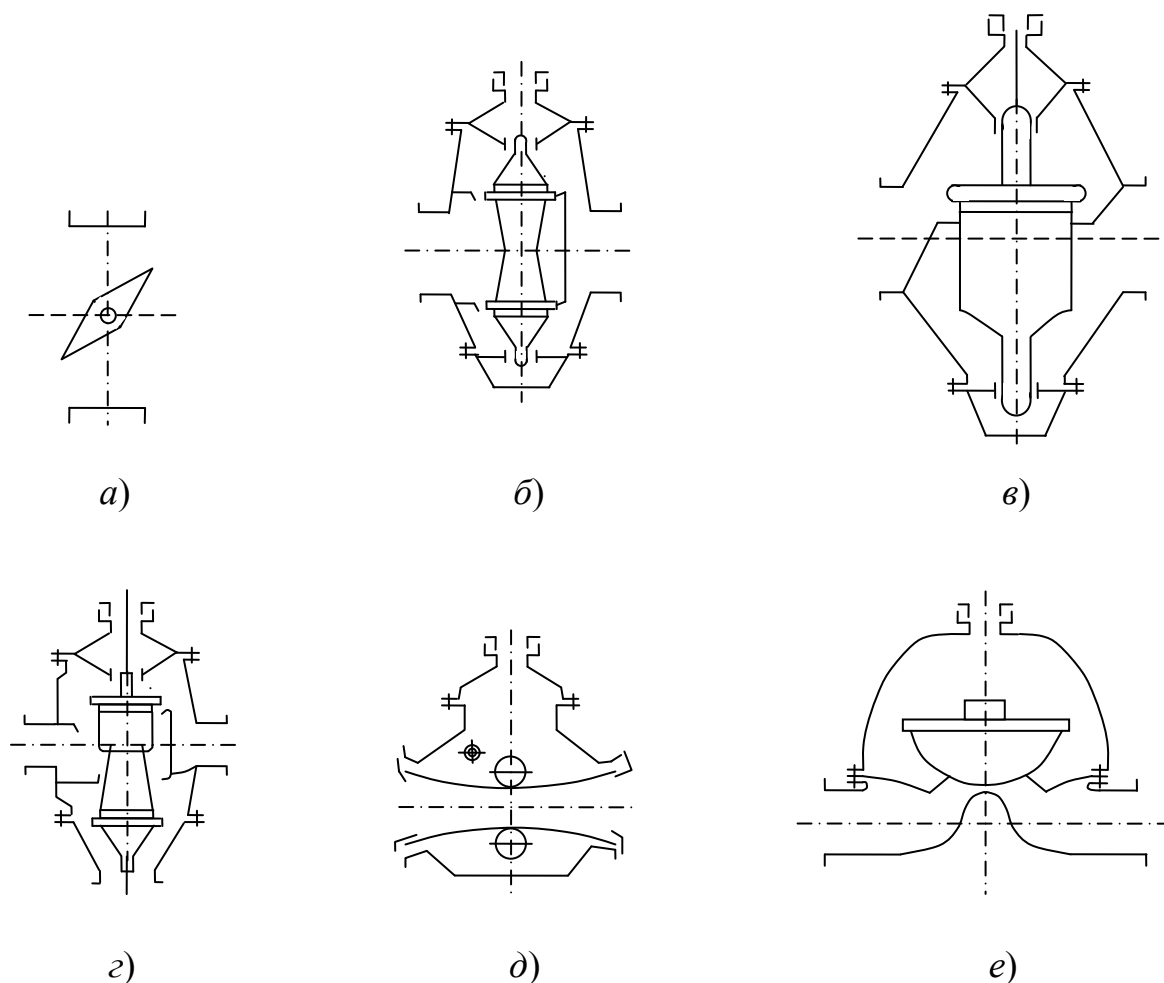
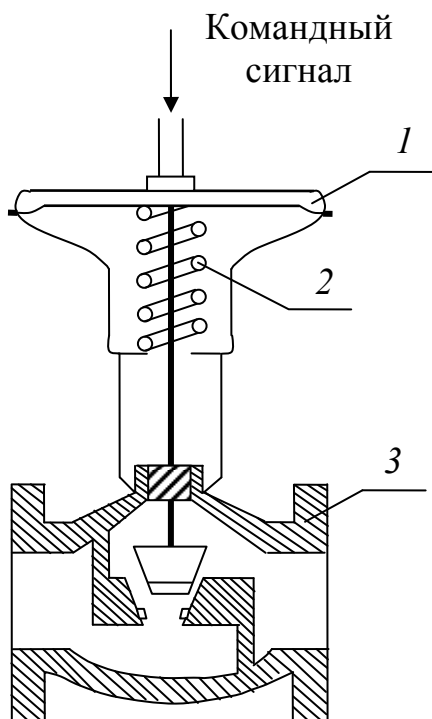


Рис. В.3. Типы регулирующих органов

- б) двухседельные, в которых изменение пропускной способности достигается поступательным перемещением затвора вдоль оси проходов двух седел корпуса;
- в) односедельные, в которых изменение пропускной способности достигается поступательным перемещением затвора вдоль оси прохода седла корпуса;
- г) трехходовые, в которых пропускная способность изменяется при поступательном перемещении затвора вдоль оси проходов двух седел, и при этом корпус имеет три присоединительных прохода, через которые один поток разделяется на два или два потока соединяются в один;
- д) шланговые, в которых изменение пропускной способности достигается изменением проходного сечения упругого патрубку (отрезка шланга);
- е) диафрагмовые, в которых изменение пропускной способности достигается поступательным перемещением центра диафрагмы относительно седла.

Исполнительные устройства (в зависимости от типа регулирующего органа) называются заслоночными, двухседельными, односедельными, трехходовыми, шланговыми или диафрагмовыми.



**Рис. В.4. Принципиальная схема одного из типов пневматического исполнительного устройства**

Пример реализации схемы исполнительного устройства показан на рис. В.4, где изображено пневматическое односедельное устройство, состоящее из двух основных блоков: пневматического мембрано-пружинного исполнительного механизма и односедельного регулирующего органа.

При изменении (увеличении или уменьшении) давления в рабочей полости 1 подвижная система, преодолевая действие пружины 2, перемещается (вверх или вниз), изменяя пропускную способность регулирующего органа 3 и, следовательно, расход среды через него. Система находится в равновесии, когда усилие, развиваемое мембранным элементом, уравнивается усилием от пружины.

### **В.3. СОЕДИНЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ С РЕГУЛИРУЮЩИМ ОРГАНОМ**

Соединения выходного элемента исполнительного механизма с входным элементом рабочего органа могут быть непосредственными, жесткими или тросовыми.

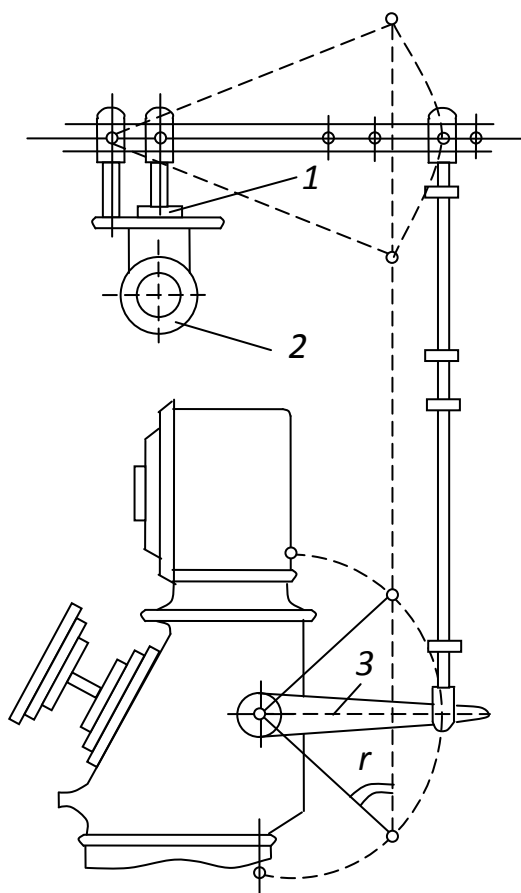
Непосредственное соединение выходного вала (штока) исполнительного механизма с валом или штоком рабочего органа является наиболее простым. Значения перемещений выходного устройства исполнительного механизма и подвижной части рабочего органа при этом способе соединения одинаковы, а скорости равны. Подобные способы сочленения широко применяются при использовании электромагнитных, однооборотных электрических, гидравлических и пневматических исполнительных механизмов, а также многооборотных исполнительных механизмов (электроприводов, гидроприводов и пневмоприводов), приводящих в действие запорную трубопроводную арматуру.

Жесткое соединение осуществляется при помощи рычагов или реечных передач. Жесткое соединение может быть как линейным, так и нелинейным. При линейной жесткой связи значения перемещений выходного вала исполнительного механизма и подвижного элемента рабочего органа различаются только масштабом. При нелинейности жесткой связи можно создать неравные перемещения затвора рабочего органа при относительно равных перемещениях выходного элемента исполнительного механизма, а также расширить границы возможных взаиморасположений рабочего органа и механизма.

В качестве примера рассмотрим схему сочленения колонки дистанционного управления типа КДУ с регулирующим органом (рис. В.5). Сочленение колонки дистанционного управления выбирают таким образом, чтобы полный ход  $S$  штока  $1$  регулирующего органа  $2$  обеспечивался поворотом рычага выходного вала  $3$  исполнительного механизма на угол  $90^\circ$ . Во избежание заклинивания в крайнем положении угол должен быть не менее  $90^\circ$ .

Общим требованием, которое предъявляется к отдельным деталям и узлам, применяемым для сочленения исполнительных механизмов с рабочими органами, является необходимость обеспечения достаточной жесткости соединений и ми-





**Рис. В.5. Сочленение исполнительного механизма (колонки дистанционного управления КДУ) с регулирующими органами**

нимальных люфтов в кинематических парах. При этом влияние на качество работы систем управления как упругих деформаций передаточных звеньев, так и зазоров в соединениях, вызывающих небольшие люфты в шарнирах многозвенного сочленения в сумме могут составить до 5 – 10% общего хода рабочего органа и внести таким образом в САР значительную нелинейность. Для обеспечения нормальной работы исполнительных механизмов необходимо руководствоваться монтажно-эксплуатационными инструкциями для данного типа исполнительного механизма, разработанными заводами-изготовителями этих механизмов.

В основных главах данного учебного пособия рассматриваются:

- электромагнитные и электродвигательные исполнительные механизмы;
- пневматические исполнительные механизмы;
- гидравлические исполнительные механизмы;
- преобразователи движения;
- мехатронные модули движения.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

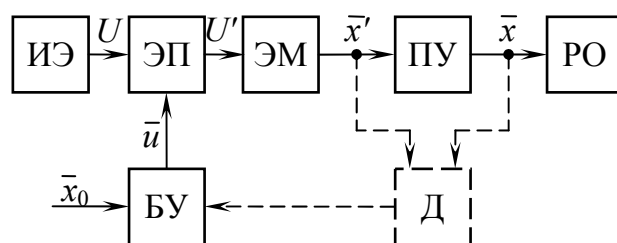
*Электроприводом* называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение рабочих и регулирующих органов машин и механизмов и управления их технологическим процессом, состоящая из электродвигателя, устройства управления и передаточного устройства.

В устройствах различного назначения преимущественно используются электромоторный и электромагнитный приводы. В их основе лежат электрические двигатели и электромагниты, преобразующие электрическую энергию в линейное перемещение штока или вращение вала.

Структурная схема автоматизированного электропривода представлена на рис. 1.1.

Электрическая энергия постоянного или переменного тока от источника ИЭ напряжением  $U$  преобразуется электрическим преобразователем ЭП к виду  $U'$ , необходимому для приведения выходного элемента электродвигателя или электромагнита ЭМ в движение. На выходе ЭМ формируется вектор  $\bar{x}'$  выходных фазовых координат, которыми могут быть линейное перемещение  $x'$  штока, угол  $\phi'$  поворота вала, линейная и угловая скорости  $\dot{x}'$  и  $\dot{\omega}' = \dot{\phi}'$ , линейное или угловое ускорения  $\ddot{x}'$  и  $\ddot{\omega}' = \ddot{\phi}'$ . Передаточное устройство ПУ преобразует эти параметры движения в требуемые параметры  $\bar{x}$  для совершения механической работы рабочим органом РО в выполняемом процессе.

В зависимости от энергии, необходимой для совершения механического перемещения, на валу электродвигателя или на штоке электромагнита создается требуемый момент  $M$  или усилие  $F$ . В ряде случаев от этих параметров зависят сила тока  $I$  в обмотках электродвигателя и мощность  $P$ , потребляемая от источника ИЭ.



**Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода**

Требуемые параметры перемещения задаются с внешнего устройства в виде вектора  $\bar{x}_0$ . Для контроля выполнения этого задания в электроприводе может быть применен датчик Д соответствующих фазовых координат, который может быть подключен как к выходу ЭМ, так и к выходу ПУ. Типичные датчики перемещения – *энкодеры*, рассмотрены в одном из разделов настоящей главы. Блок управления БУ сравнивает получаемые в ходе движения параметры  $\bar{x}$  с заданными  $\bar{x}_0$  и в зависимости от результата сравнения формирует вектор  $\bar{u}$  управляющих воздействий, которые посредством электрического преобразователя изменяют параметры движения  $\bar{x}'$  и  $\bar{x}$ . В отдельных случаях, например, при использовании шаговых электродвигателей, применения датчиков движения не требуется.

Основой электропривода является электродвигатель. В настоящем пособии материал, изложенный в главе, поделен на разделы в зависимости от типа электродвигателя, используемого в электроприводе. Электрические преобразователи, в качестве которых выступают коммутаторы, импульсные преобразователи, инверторы, рассматриваются применительно к конкретному типу электродвигателя. Передаточные устройства, которыми, например, являются редукторы и преобразователи вращательного движения в поступательное, рассматриваются в главе 4.

Интересно отметить, что в настоящее время в промышленности существует тенденция минимизации количества передаточных устройств в приводах. Вместо электродвигателя с редуктором применяют двигатель с меньшей частотой вращения и большим моментом, вместо электродвигателя с преобразователем вращательного движения в поступательное – линейный электродвигатель.

Особенности источников питания и блоков управления для электроприводов в настоящем пособии не рассматриваются. Рекомендуем ознакомиться со следующей литературой по этим темам: [3, 4] – по источникам питания, [4, 5] – по блокам управления. Так же, при отсутствии необходимых знаний для понимания рассматриваемого в пособии материала рекомендуем обращаться к учебным пособиям по электротехнике и электронике, например, [6].

Несмотря на широкое развитие новых типов электродвигателей, например, линейных, в настоящее время в электроприводах в большинстве случаев применяют электродвигатели вращательного движения. Такие двигатели состоят из

подвижной и неподвижной частей. Традиционно для машин переменного тока (асинхронных и синхронных электродвигателей) подвижная часть называется *статором*, а неподвижная – *ротором*. Для машин постоянного тока неподвижная часть называется *станиной* (станиной с индуктором), а подвижная – *якорем*. Строго говоря, все эти части присутствуют как в машинах постоянного тока, так и в машинах переменного тока. Так, станина – это основная несущая часть машины, на которой монтируются постоянные магниты или магнитопроводы для обмоток статора, а также подшипниковые щиты, в которых закрепляются подшипники вала ротора. Обратимся к определениям, приведенным в ГОСТ 27471–87 [7].

*Статор* вращающейся электрической машины – часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой.

*Ротор* электрической машины – вращающаяся часть электрической машины.

*Якорь* синхронной машины (коллекторной машины постоянного тока) – часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуктируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки.

*Индуктор* синхронной машины – статор или ротор синхронной машины, на котором размещены постоянные магниты или обмотка возбуждения.

Следовательно, понятия *статор* и *ротор* применимы ко всем вращающимся электрическим машинам, независимо от их типа, в том числе и к машинам постоянного тока с постоянными магнитами. Традиционно, якорем у синхронных машин является статор, у машин постоянного тока – ротор. В асинхронном электродвигателе и статор, и ротор – якоря. Индуктором у машин постоянного тока является статор, у синхронных машин – ротор.

Рекомендуем ознакомиться с определениями других основных деталей и сборочных единиц вращающихся электрических машин в [8].

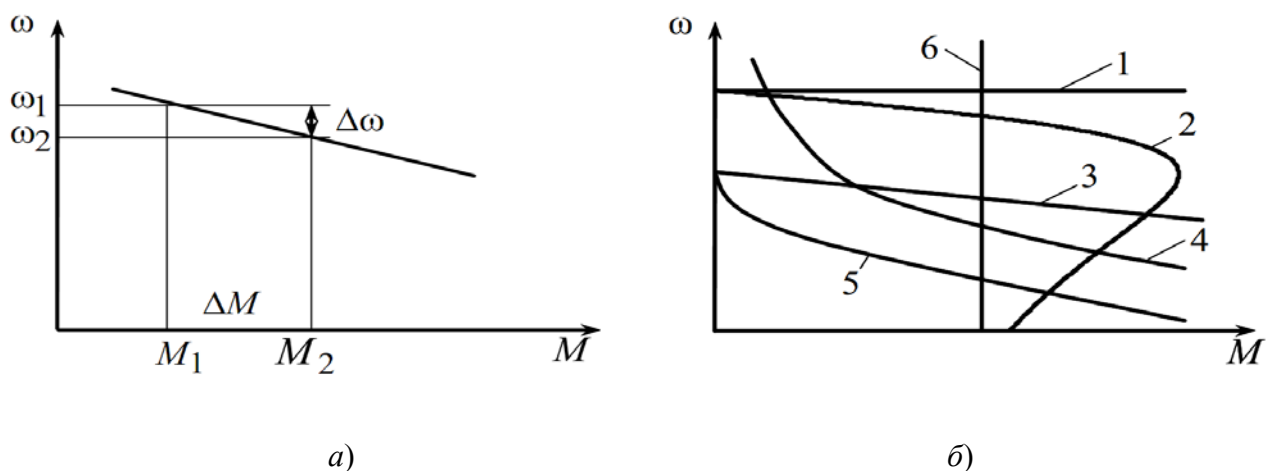
Основные технические характеристики электродвигателей определяются параметрами входных электрических воздействий и выходного механического движения. К электрическим параметрам относятся: род тока, номинальное напряжение питания  $U_0$ , частота  $f$  переменного тока, коэффициентом мощности  $\cos\varphi$ , номинальная потребляемая мощность  $P$ . С этими величинами связаны сопротивление  $R$  обмоток и номинальный ток потребления  $I$ . Параметрами выходного

вращательного движения являются номинальная частота вращения  $n$  (число оборотов в минуту или секунду) или угловая скорость  $\omega = 2\pi n$ , номинальный момент на валу  $M_0$  и коэффициент полезного действия  $\eta$ . Для большинства электродвигателей выходные механические параметры взаимозависимы. Частота вращения  $\omega$  зависит от нагрузки на валу (момент  $M$ ). Основной характеристикой, позволяющей судить о работе двигателя при различных нагрузках, является *механическая характеристика*.

Механическая характеристика электродвигателя – это зависимость скорости вращения  $\omega$  от момента  $M$  на валу. Часто вместо угловой скорости  $\omega$  используют внесистемную физическую величину – частоту вращения  $n$ .

Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических машин неодинакова и различается в зависимости от *жесткости* механических характеристик (см. рис. 1.2) [8].

Жесткостью механической характеристики называется отношение приращения момента  $M$  к приращению скорости  $\omega$ :  $\beta = \Delta M / \Delta \omega$ , где  $\Delta M = M_2 - M_1$ ,  $\Delta \omega = \omega_2 - \omega_1$ ;  $M_1$  и  $M_2$  – моменты, соответствующие угловым скоростям  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (см. рис. 1.2, а). Для нелинейной механической характеристики ее жесткость зависит от момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$ .



**Рис. 1.2. Механические характеристики электродвигателей:**

а – к расчету жесткости характеристики;

б – механические характеристики различных электродвигателей

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их жесткости (рис 1.2, б) [8].

При *абсолютно жесткой механической характеристике* скорость с изменением момента остается неизменной (прямая 1,  $\beta \rightarrow \infty$ ). Такой характеристикой обладают *синхронные электрические машины*. В этих машинах скорость вращения вала полностью определяется частотой электрических сигналов на входе электродвигателя, которые позволяют точно определять угол поворота вала.

*Жесткая механическая характеристика* отличается незначительным изменением угловой скорости с изменением момента. Жесткой механической характеристикой обладают *асинхронные двигатели* (кривая 2) и *двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения* (линия 3).

*Мягкая механическая характеристика* отличается значительным изменением угловой скорости с изменением момента. Такой характеристикой обладают *двигатели постоянного тока последовательного возбуждения* (кривая 4) и *двигатели постоянного тока смешанного возбуждения* (кривая 5).

В случае *абсолютно мягкой механической характеристики* момент двигателя остается неизменным с изменением угловой скорости (прямая 6,  $\beta = 0$ ). Абсолютно мягкой механической характеристикой обладают *двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока*.

Механическая характеристика является основой для выбора типа электродвигателя при проектировании электропривода. Кроме механической характеристики электродвигателя важную роль для экономичной эксплуатации электропривода играют механические характеристики приводимых в движение механизмов. Эти характеристики также рассматриваются в [8, 9].

Кроме механических характеристик электродвигателей используют [9]:

- регулировочные характеристики – зависимость частоты вращения двигателя от какого-либо влияющего параметра (напряжения питания, величины тока в обмотке возбуждения, частоты переменного тока и т.д.);

- энергетические характеристики, устанавливающие связь между частотой вращения и каким-либо энергетическим показателем двигателя (коэффициентом полезного действия, коэффициентом мощности и т.п.)



## 1.1. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1.1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рисунке 1.3, *a* представлена упрощенная схема, поясняющая принцип работы электрических машин постоянного тока.

Между полюсами постоянного магнита  $I$  расположен проводник, по которому через щетки  $4$  и пластины коллектора  $3$  протекает ток  $I$ . При взаимодействии магнитного поля проводника с полем постоянного магнита возникает сила  $F$ , действующая на проводник. Направление силы  $F$  можно определить по правилу левой руки. Силы  $F$  действует на верхнюю и нижнюю (по схеме) части проводника в противоположные стороны, в результате чего формируется момент пары сил  $M$ , поворачивающий проводник против часовой стрелки. После поворота на  $180^\circ$  верхняя и нижняя части проводника поменяются местами, но направления тока  $I$ , силы  $F$  и момента  $M$  сохранятся, так как одновременно с поворотом произойдет переключение в щеточно-коллекторном узле  $3-4$ . Этот узел является одним из основных элементов машин постоянного тока и отличает их от других электрических машин. Он необходим для сохранения постоянного направления вращения.

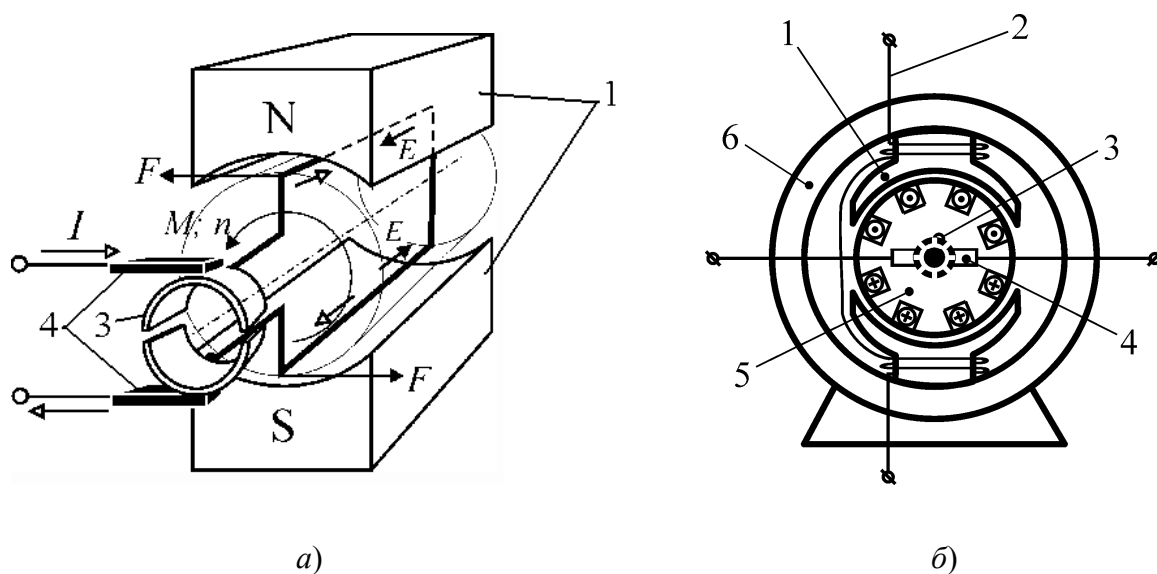


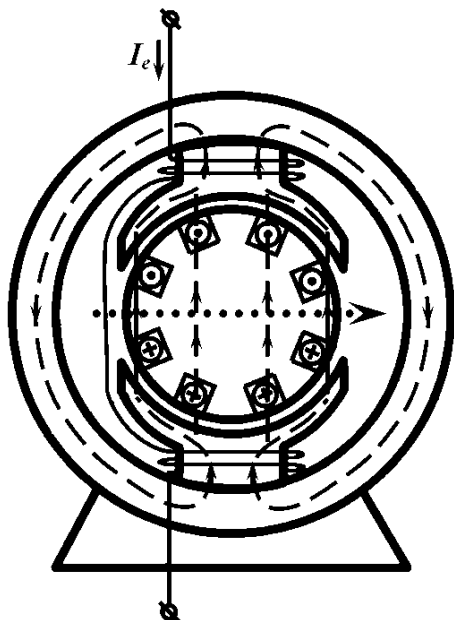
Рис. 1.3. Схемы электрических машин постоянного тока:

*a* – к пояснению принципа работы; *б* – к пояснению устройства

Из рисунка 1.3, *а* видно, что при повороте проводника на  $90^\circ$ , на него не будет действовать момент  $M$ , так как плечо пары сил  $F$  будет равно нулю, а, кроме того, между щетками 4 произойдет короткое замыкание через пластины коллектора 3. Поэтому реальные электрические машины постоянного тока никогда не изготавливают с одной обмоткой и двумя пластинами коллектора. Минимальное число обмоток и пластин коллектора равно трем. Причем так изготавливают только дешевые малогабаритные электродвигатели для неответственных устройств. Обычно число коллекторных пластин не менее пяти даже у маломощных электродвигателей.

На рисунке 1.3, *б* представлена упрощенная схема устройства электрической машины постоянного тока. В станине 6 установлены полюсы 1 индуктора, создающего постоянное магнитное поле за счет протекания тока возбуждения по обмоткам цепи 2. Щетки 3 и коллектор 4 обеспечивают подвод электрической энергии к обмоткам якоря 5. Плоскость, проходящая через ось электродвигателя посередине между соседними полюсами, называется *геометрической нейтралью*. На рисунке 1.3 линии два полюса  $N$  и  $S$ , поэтому геометрическая нейтраль горизонтальна и на рис. 1.3, *б* совпадает с изображенными проводниками щеток 4. Проводники якоря, находящиеся на геометрической нейтрали, как было указано выше, не участвуют в формировании вращающего момента  $M$ . По этой причине полюсы 1 не имеет смысла подводить близко к геометрической нейтрали, а щетки по ряду причин, наоборот, целесообразно располагать именно на ней. В каком бы положении ни находился якорь, схема соединения его обмоток с пластинами коллектора обеспечивает противоположное направление протекания токов по разные стороны от геометрической нейтрали.

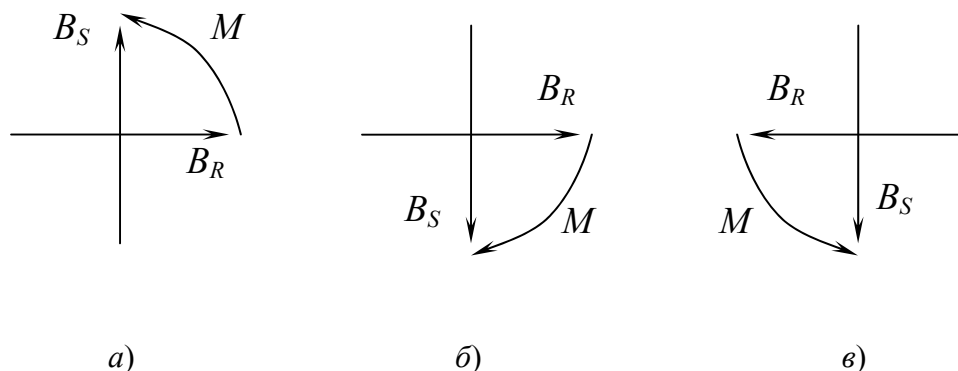
Станина, полюса индуктора и якорь представляют собой магнитную цепь. В электродвигателе с обмотками возбуждения все части магнитной цепи изготавливаются из магнитомягкого материала, в электродвигателе с постоянным магнитом ротор – из магнитомягкого, а статор – из магнитотвердого [6]. На рисунке 1.4 штриховыми линиями со стрелками показаны направления магнитного поля в различных частях электрической машины при протекании по обмоткам возбуждения тока  $I_e$  в направлении, указанном стрелкой.



**Рис. 1.4. Направления магнитных полей в электродвигателе постоянного тока**

Все обмотки якоря соединены последовательно. Точками соединения являются пластины коллектора. Ток проходит по всем обмоткам за исключением тех, концы которых подключены к пластинам коллектора, замыкаемым щетками. Обмотки якоря создают в нем магнитное поле, направление которого показано на рис. 1.4. пунктирной линией со стрелкой. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора приводит к формированию вращающего момента, который стремится выровнять направления магнитных полей, т.е. на ротор действует момент, направленный против часовой стрелки. Схема такого взаимодействия представлена на рис. 1.5, а.

Если изменить направление тока в обмотках возбуждения, то вектор индукции  $B_S$  магнитного поля статора изменит свое направление на противоположное (рис. 1.5, б). На ротор будет действовать момент  $M$ , который также будет стремиться повернуть вектор индукции  $B_R$  магнитного поля ротора в сторону вектора  $B_S$ , но будет направлен по часовой стрелке. Если теперь путем изменения полярности подключения щеток изменить направление тока в обмотках ротора, то свое направление изменит и вектор индукции  $B_R$ , а момент  $M$  примет исходное



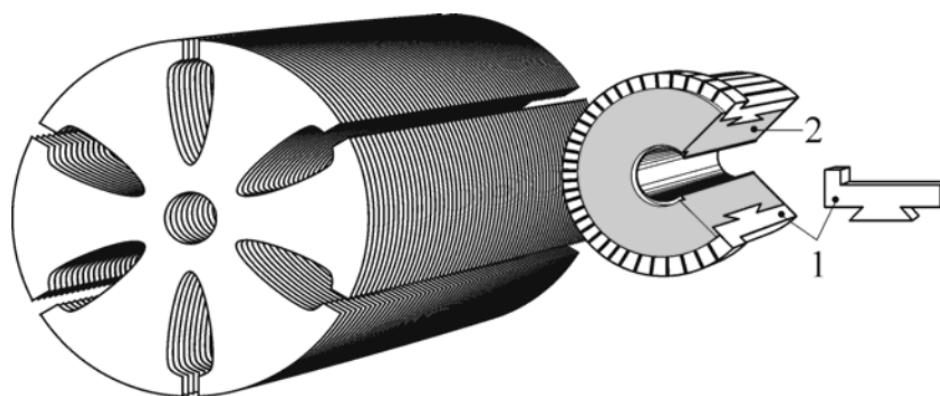
**Рис. 1.5. Схема взаимодействия магнитных полей статора и ротора**

направление против часовой стрелки (рис. 1.5, в). Таким образом, изменение направления тока в любой части электрической машины приводит к изменению направления вращения на противоположное.

При работе электрической машины под нагрузкой магнитные поля статора и ротора складываются, и в области якоря и полюсных наконечников формируется сложное магнитное поле. Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле статора называется реакцией якоря и является негативным эффектом [10, 11].

### 1.1.2. УСТРОЙСТВО ЯКОРЯ

Якорь электрических машин постоянного тока является наиболее сложным узлом. Кроме коллектора он содержит ряд обмоток, которые укладываются в пазы магнитопровода, находящиеся под разными полюсами. Конструкции магнитопровода и коллектора якоря показаны на рис. 1.6.



**Рис. 1.6. Конструкции магнитопровода и коллектора якоря**

В связи с тем, что в обмотках якорей машин постоянного тока из-за коммутации на коллекторе протекает импульсный ток, для уменьшения потерь в стали необходимо набирать пакет из отдельных тонких пластин электротехнической стали. Коллектор состоит из набора изолированных друг от друга медных пластин 1, залитых в пластмассовую втулку 2 (рис. 1.6). Пакет ротора и коллектор напрессовываются на вал якоря, и в открытые пазы пакета укладывается обмотка, концы секций которой припаиваются к пластинам коллектора.

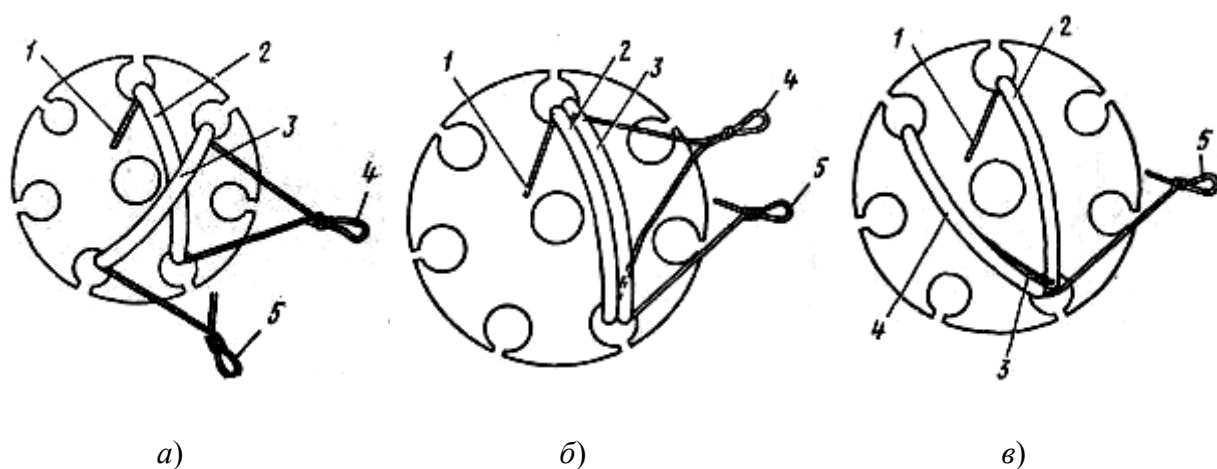
Количество пазов может совпадать с количеством пластин якоря и может быть в несколько раз меньше. Если количества пазов и пластин совпадают, то число обмоток в пазу  $u = 1$ , если количество пазов в два раза меньше числа пластин, то  $u = 2$ .

Обмотка якоря состоит из секций. Секция представляет собой наименьшую часть обмотки, заключенную между двумя присоединениями к коллектору. Секция может состоять из одного или нескольких витков.

Для понимания взаимного геометрического расположения обмоток и пластин коллектора на рис. 1.7 представлены схемы намотки якоря различными способами, а на рис. 1.8 – соответствующие рабочие схемы этих намоток.

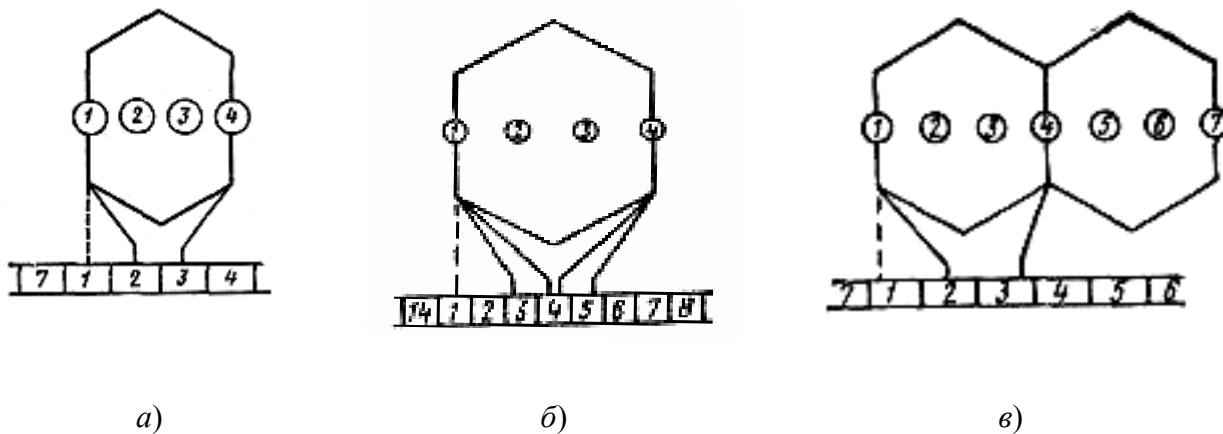
На схемах рис. 1.7, *а* и *б* позициями 1 обозначено начало намотки, 2 – первая секция. После намотки секции делается отвод 4 на пластину коллектора, а затем наматывается следующая секция 3, после чего вновь делается отвод 5. После завершения намотки якоря по схеме рис. 1.7, *а* в каждом пазу будет лежать по одной стороне от двух различных секций (всего две стороны), а по схеме рис. 1.7, *б* – по одной стороне от четырех различных секций (всего четыре стороны).

На схеме рис. 1.7, *в* позициями 1 обозначено начало намотки, 2 – первая полусекция, 3 – переход к второй полусекции, 4 – вторая полусекция, 5 – отвод для присоединения к пластине коллектора, после которого наматывается следующая секция.



**Рис. 1.7. Схемы расположения обмоток якоря на магнитопроводе при различных способах намотки:**

*а* – «простая» при  $u = 1$ ; *б* – «простая» при  $u = 2$ ; *в* – «в елочку»



**Рис. 1.8.** Рабочие схемы обмоток якоря при различных способах намотки:

*a* – «простая» при  $u = 1$ ; *б* – «простая» при  $u = 2$ ; *в* – «в елочку»

Рабочими схемами (рис. 1.8) пользуются при намотке якорей. Независимо от числа витков в секции показывают только один виток. Номерами в кружках обозначаются пазы магнитопровода, в прямоугольниках – пластины коллектора.

На рисунках 1.3 и 1.4 изображены схемы электродвигателя с одной парой полюсов  $N-S$ . Электрические машины постоянного тока изготавливают и с большим числом пар полюсов. При намотке их якорей различают петлевые и волновые обмотки. Подробную информацию о типах обмоток якорей и машинах постоянного тока с большим числом пар полюсов можно получить в [10, 11].

### 1.1.3. РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока обладают свойством обратимости. Это означает, что одна и та же машина может выполнять функцию генератора электрической энергии и электродвигателя. Более того, в каком бы режиме не использовалась машина, она работает и как генератор, и как двигатель одновременно. При протекании тока нагрузки по обмоткам якоря генератора он создает тормозящий момент, а при вращении якоря электродвигателя в обмотках наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции. По этой причине электродвигатель постоянного тока в различных режимах работы (например, во время пуска и торможения) является как двигателем, так и генератором.



Для пуска электродвигателя постоянного тока щетки 4 подключают к источнику с напряжением  $U$  (рис. 1.3, а). При движении проводников в магнитном поле в них возникает ЭДС  $E$  индукции, направление которой противоположно ЭДС источника, в чем можно убедиться, применяя правило левой руки. По второму закону Кирхгофа для якорной цепи запишем уравнение

$$U - E = IR, \quad (1.1)$$

где  $I$  – ток в обмотках якоря, А;  $R$  – полное сопротивление цепи якоря, состоящее из сопротивления всех обмоток якоря, обмоток дополнительных полюсов, компенсационных обмоток и соединительных проводов, Ом [10, 11].

ЭДС обмотки якоря можно найти в соответствии с уравнением Максвелла [11]:

$$E = k\Phi\omega, \quad (1.2)$$

где  $k = \frac{pN}{2\pi a}$  – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами электродвигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных (находящихся в области действия магнитного поля) проводников обмотки якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря;  $\Phi$  – магнитный поток, протекающий по магнитопроводу, Вб;  $\omega$  – угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Подставив (1.2) в (1.1) и решив полученное выражение относительно угловой скорости  $\omega$ , получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока

$$\omega(I) = \frac{2\pi a}{pN\Phi}(U - IR) \quad (1.3)$$

Электромагнитный момент двигателя можно определить исходя из уравнения Фарадея [10, 11]:

$$M = k\Phi I = \frac{pN\Phi}{2\pi a} I. \quad (1.4)$$

Из уравнений (1.3) и (1.4) можно сделать несколько важных выводов об основных параметрах работы электродвигателя постоянного тока: круговой частоте вращения  $\omega$  и моменте на валу  $M$ . Обратим внимание на все параметры, кроме

электрических  $I$  и  $U$ , о которых речь пойдет далее. Как и в любой другой механической системе конструктивные параметры, отвечающие за изменение момента и частоты вращения, взаимосвязаны. Так, при увеличении числа пар полюсов  $p$ , числа проводников  $N$  и магнитного потока  $\Phi$  возрастает момент  $M$  и в такое же число раз убывает частота вращения  $\omega$ . При увеличении числа параллельных ветвей  $a$  момент убывает, а частота вращения возрастает. Знание этих закономерностей при проектировании электродвигателей позволяет сконструировать машину с требуемыми механическими параметрами без использования редукторов. Кроме увеличения числа  $N$  проводников в обмотках якоря для повышения момента  $M$  целесообразно увеличивать магнитный поток  $\Phi$  путем увеличения тока в обмотках возбуждения.

Выразив из (1.4) ток  $I$  и подставив его в (1.3), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока

$$\omega(M) = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2}. \quad (1.5)$$

Уравнение (1.5) является линейным, поэтому график теоретической механической характеристики электродвигателя представляет собой прямую (линия 3 на рис. 1.2, б). Реальная механическая характеристика электродвигателя постоянного тока может иметь нелинейный характер из-за реакции якоря. Этот эффект проявляется при токах якоря, на 50...70% превышающих номинальное значение, и заключается в уменьшении магнитного потока  $\Phi$ . Уменьшение магнитного потока в соответствии с (1.5) приводит к увеличению частоты вращения. Поэтому при больших нагрузках в некоторых двигателях возможно увеличение скорости вращения. Двигатели с такими характеристиками неустойчивы, поэтому для стабильной работы в них устанавливают дополнительную стабилизирующую обмотку [10, 11].

Естественной механической характеристикой двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости  $\omega$  от момента  $M$ , полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. Все остальные характеристики называют искусственными. Искусственные характеристики получают при регулировании скорости вращения.

Рассмотрим особенности работы электродвигателя постоянного тока в различных режимах. Электродвигатель сравнительно небольшой мощности можно запустить подачей на его вход номинального напряжения. В момент включения частота вращения  $\omega$  равна нулю. В соответствии с (1.2) ЭДС  $E$  также равна нулю, следовательно, ток  $I$  ограничивается только сопротивлением  $R$  (см. (1.1)). Этот ток может быть очень большим, так как сопротивление  $R$  обмоток якоря мало. По этой причине двигатели большой мощности пускают в ход с помощью специальных пусковых устройств [9 – 11].

Большой пусковой ток  $I$  в соответствии с (1.4) создает большой момент  $M$ , под действием которого ротор двигателя быстро разгоняется. Увеличение скорости вращения приводит к увеличению ЭДС  $E$  (см. (1.2)) и уменьшению тока  $I$  (см. (1.1)). С ростом угловой скорости  $\omega$  угловое ускорение постоянно уменьшается, так как уменьшается движущая сила процесса – разность  $U - E$ . В установившемся режиме работы двигатель без нагрузки почти не потребляет энергии, так как  $U - E \rightarrow 0$ . Энергия расходуется только на преодоление сил сопротивления: механических и аэродинамических. Максимальная частота вращения двигателя может быть определена по формуле (1.3), если ток  $I$  принять равным нулю.

Если разогнанный двигатель нагрузить, например, путем приведения в соприкосновение с обрабатываемой деталью рабочего инструмента станка, то скорость вращения уменьшится, что в соответствии (1.2) и (1.1) приведет к увеличению тока  $I$ , который в свою очередь, в соответствии с (1.4) повысит вращающий момент до необходимого уровня. Уравнение (1.4) устанавливает связь между моментом  $M$  и током потребления  $I$  и является следствием закона сохранения энергии. Механическая мощность  $M \cdot \omega$  приближенно равна мощности  $U \cdot I$ , потребляемой от электрической сети.

#### 1.1.4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При разработке систем управления электрическим приводом, эксплуатируемым в динамическом режиме при непрерывном изменении угловой скорости и направления вращения, важно знать динамические характеристики электродвига-

теля: переходные характеристики, передаточную функцию и частотные характеристики. Эти характеристики необходимы для синтеза автоматических систем управления приводом с заданным запасом устойчивости [1, 2, 5, 8, 9].

Механическая часть электропривода описывается уравнением [1.8]

$$M - M_R = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.6)$$

где  $M$  и  $M_R$  – вращающий момент и момент сопротивления на валу двигателя, Н·м;  $J$  – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $d\omega/dt$  – угловое ускорение, рад/с<sup>2</sup>.

Подставляя (1.2) в (1.1), а (1.1) в (1.4), получим

$$M = k\Phi \frac{U - k\Phi\omega}{R} = k\Phi \frac{U}{R} - \frac{k^2\Phi^2\omega}{R},$$

откуда с учетом (1.6) имеем

$$J \frac{d\omega}{dt} + \frac{k^2\Phi^2}{R} \omega = k\Phi \frac{U}{R} - M_R$$

или

$$\frac{JR}{k^2\Phi^2} \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{U_R}{k\Phi}, \quad (1.7)$$

где  $U_R = k\Phi I_R R$  и  $I_R$  – напряжение и ток, определяемые моментом сопротивления, В и А, соответственно.

Уравнение (1.7) представляет собой дифференциальное уравнение апериодического звена первого порядка с передаточной функцией по каналу напряжение–частота вращения [1, 2]

$$W(s) = \frac{A}{Ts + 1}, \quad (1.8)$$

где  $T = \frac{JR}{k^2\Phi^2}$ ,  $A = \frac{1}{k\Phi}$ .

Уравнения (1.7) и (1.8) позволяют получить все остальные динамические характеристики электродвигателя постоянного тока. Для получения уравнений движения в форме Коши обычно используют две фазовые координаты:  $\varphi_1 = \varphi$  – угол поворота вала электродвигателя и  $\varphi_2 = d\varphi/dt = \omega$  [1, 2].

### 1.1.5. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока обладают следующими преимуществами [6]:

- возможностью плавного регулирования частоты вращения;
- хорошими пусковыми качествами;
- устойчивостью;
- разнообразием механических характеристик и возможностью их изменения;
- при питании от сети переменного тока максимальная частота не ограничивается частотой сети.

Хорошие пусковые качества электродвигателей обусловлены максимальным вращающим моментом при минимальной частоте вращения. Часто максимальный момент необходим при пуске электродвигателя. Это обусловлено необходимостью преодоления момента инерции. В машинах переменного тока пусковой момент меньше максимального, что затрудняет их запуск и приводит к необходимости использования электродвигателей большей номинальной мощности, чем необходимая. Частота вращения машин переменного тока определяется частотой напряжения питания. Максимальная частота вращения равна частоте сети. Для сети с частотой 50 Гц максимальная частота вращения синхронного или асинхронного электродвигателя составляет 3000 об/мин. Машины постоянного тока могут быть изготовлены для работы с частотой вращения до 30 000 об/мин.

Благодаря преимуществам электродвигателей постоянного тока их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования.

Общим недостатком электрических машин постоянного тока является сложность их конструкции, связанная со щеточно-коллекторным механизмом,

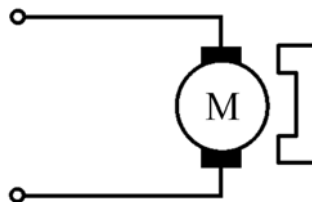
осуществляющим постоянную коммутацию цепей электрической машины, из-за которой возникает искрение. Это снижает надежность машин и ограничивает область их применения взрывобезопасными процессами. Про методы улучшения коммутации можно прочитать в работах [10, 11].

Актуальной задачей является разработка электродвигателей со свойствами двигателей постоянного тока без коллекторно-щеточного узла. В настоящее время эта задача решена в вентильных электродвигателях, где переключение обмоток осуществляется полупроводниковыми элементами (транзисторами или тиристорами).

### 1.1.6. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В электродвигателях постоянного тока малой мощности (до нескольких сотен ватт) для формирования постоянного магнитного поля обычно применяют постоянные магниты. Это позволяет упростить конструкцию, подключение и управление электродвигателем, поскольку не требуется наматывать, подключать и подавать напряжение на обмотку возбуждения.

В электрических машинах средней и большой мощности постоянные магниты применять нецелесообразно, так как это приводит к увеличению их массы, габаритов и стоимости. Постоянные магниты намагничиваются до использования электрической машины, поэтому магнитный поток формируется за счет остаточной индукции материалов, из которых они изготовлены. Магнитный материал (электротехническую сталь) индуктора с обмоткой возбуждения можно использовать в насыщении при максимальной магнитной индукции. Остаточная индукция ферритов – магнитотвердых материалов, наиболее часто применяемых в электродвигателях, – составляет 0,2...0,4 Тл, максимальная индукция электротехнической стали может достигать 2 Тл. Эти цифры показывают, что для достижения одного и того же магнитного потока требуется постоянный магнит гораздо большего размера, чем электротехническая сталь для электромагнита [6]. Применение магнитотвердых материалов с лучшими магнитными свойствами, например, ЮНДК («Альнико»), удорожает конструкцию и ухудшает эксплуатационные качества электродвигателя, так как эти материалы легче размагничиваются.



**Рис. 1.9. Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах**

Обозначение электродвигателя постоянного тока с постоянным магнитом на принципиальных электрических схемах показано на рис. 1.9.

### 1.1.7. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ С ОБМОТКАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

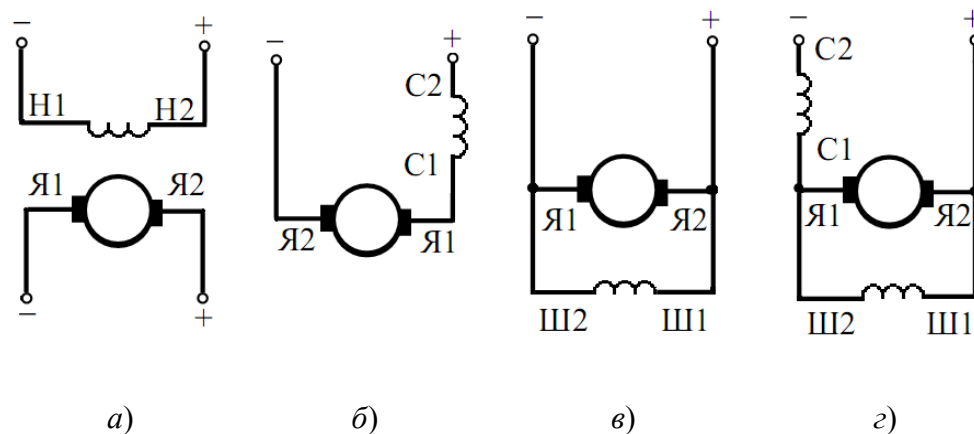
По способу соединения обмоток возбуждения и якоря выделяют электродвигатели постоянного тока:

- с независимым возбуждением (рис. 1.10, *а*);
- с последовательным возбуждением (рис. 1.10, *б*);
- с параллельным возбуждением (рис. 1.10, *в*);
- со смешанным возбуждением (рис. 1.10, *г*).

У электродвигателя с независимым возбуждением обмотка возбуждения (Н1 – Н2) и обмотка якоря (Я1 – Я2) питаются от разных источников. Это, как правило, двигатели большой мощности.

Все формулы, замечания и выводы, приведенные в пп. 1.1.3, 1.1.4, касаются непосредственно двигателя с независимым возбуждением, так как не приводилось никаких указаний относительно связи магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого обмоткой возбуждения, и напряжения  $U$  на обмотках якоря. Все остальные типы двигателей отличаются от двигателя с независимым возбуждением характером взаимосвязи величин  $\Phi$  и  $U$ .

У электродвигателей с последовательным возбуждением обмотка возбуждения (С1 – С2) называется серийной (рис. 1.10, *б*). Ток нагрузки двигателя является и током возбуждения (рис. 2.8, *а*). По этой причине магнитный поток  $\Phi$  в двигателях последовательного возбуждения зависит от нагрузки.



**Рис. 1.10.** Схемы соединения обмоток возбуждения с якорем

В момент пуска двигателя и при работе в условиях большой нагрузки ток  $I$  потребления двигателя возрастает, что приводит к увеличению магнитного потока  $\Phi$  и усилению момента  $M$  (см. п. 1.1.3). При уменьшении нагрузки ток потребления падает, магнитный поток уменьшается, что вызывает существенное увеличение частоты вращения. Электродвигатель с последовательным возбуждением имеет мягкую механическую характеристику (кривая 4 на рис. 1.2, б).

В случае минимальной нагрузки на валу электродвигателя с последовательным возбуждением частота вращения возрастает неограниченно (см. рис. 1.2, б) – двигатель идет «вразнос». По этой причине не допускается работа таких двигателей под нагрузкой, составляющей менее 25% от номинальной, а тем более в режиме холостого хода. Чтобы исключить возникновение режима холостого хода, в приводах с двигателями последовательного возбуждения недопустимо применение ременных передач и фрикционных муфт для передачи движения на рабочий механизм [9].

У двигателей последовательного возбуждения при изменениях момента нагрузки потребляемая мощность и ток якоря изменяются в меньших пределах, чем у двигателей независимого и параллельного возбуждения. Например, в двигателе последовательного возбуждения при увеличении момента нагрузки в четыре раза потребляемая мощность возрастает лишь в два раза, а в двигателях независимого и параллельного возбуждения – в четыре раза. Объясняется это тем, что при последовательном возбуждении увеличение нагрузки двигателя сопровождается одновременным ростом как тока якоря, так и магнитного потока возбуждения, и оба



этих параметра способствуют увеличению вращающего момента. Это свойство двигателей последовательного возбуждения определяет области их применения – привод механизмов с тяжелыми условиями пуска и работы: частые пуски, реверсы, перегрузки. Обычно двигатели постоянного тока последовательного возбуждения применяют для привода подъемных устройств и транспортных средств в качестве тяговых двигателей (трамваи, метро, электровозы) [9].

Обмотка возбуждения (Ш1 – Ш2) двигателей параллельного возбуждения называется шунтовой (рис. 1.10, в). Шунтовая обмотка подключается параллельно якорю электродвигателя, поэтому ток возбуждения не зависит от нагрузки двигателя. Механическая характеристика такого электродвигателя является жесткой (кривая 3 на рис. 1.2, б) и совпадает по характеру с характеристикой электродвигателя с независимым возбуждением.

Часто в учебной литературе электродвигатели независимого и параллельного возбуждения рассматривают совместно. Однако следует иметь в виду, что при регулировании частоты вращения электродвигателя параллельного возбуждения путем изменения напряжения на якоре будет изменяться и ток возбуждения, что будет приводить к изменению механической характеристики. При малой нагрузке изменение частоты вращения будет затруднено. В случае электродвигателя независимого возбуждения такой эффект отсутствует.

В электродвигателях со смешанным возбуждением устанавливаются сериясная (С1 – С2) и шунтовая (Ш1 – Ш2) обмотки (рис. 1.10, г). Шунтовая обмотка может включаться не только параллельно, но и независимо. Характеристики двигателей смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения. При слабой последовательной обмотке они будут приближаться к характеристикам двигателя параллельного возбуждения, а при сильной – к характеристикам двигателя последовательного возбуждения. Благодаря наличию независимой обмотки возбуждения двигатели смешанного возбуждения могут работать в режиме холостого хода. Механическая характеристика электродвигателя со смешанным возбуждением представлена на рис. 1.2, б кривой 5.

Обмотки возбуждения могут быть включены согласно или встречно. При согласном включении магнитные потоки обмоток направлены одинаково и складываются, при «встречном» – вычитаются. Встречное включение обмоток недопустимо, так как при нагрузке магнитное поле последовательной обмотки будет размагничивать магнитную систему двигателя, и его работа станет неустойчивой.

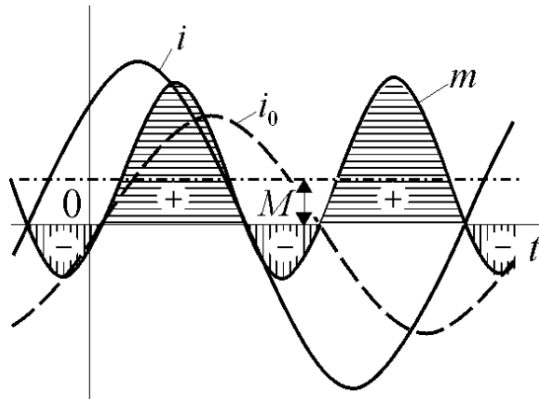
Применение двигателя смешанного возбуждения оправдано на транспорте. Параллельная обмотка позволяет эффективно применять рекуперативное торможение, при котором электрическая энергия возвращается в контактную сеть за счет обратимости электрических машин постоянного тока. В этом случае существенно снижается суммарное энергопотребление, например, нескольких электропоездов. Тормозящий состав частично обеспечивает энергией разгоняющийся.

#### 1.1.8. КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Вращающий момент двигателя создается в результате взаимодействия тока, протекающего в обмотке якоря, с магнитным полем главных полюсов. При изменении направления тока якоря или полярности магнитного поля направление действия вращающего момента меняется на противоположное. В случае одновременного изменения направлений тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения вращающий момент будут действовать в прежнем направлении (см. рис.1.5). Поэтому, если двигатель постоянного тока подключить к сети переменного тока, то он будет работать, создавая переменный вращающий момент  $m$ , изменяющийся во времени по синусоидальному закону с двойной частотой по отношению к частоте сети и с некоторым постоянным средним значением  $M$  (рис. 1.11).

Момент инерции ротора сглаживает пульсации скорости вращения, вызванные пульсациями момента, и двигатель вращается с практически постоянной скоростью, развивая момент, равный среднему значению.

Величина среднего значения момента зависит от сдвига фаз между токами обмоток якоря  $I$  и возбуждения  $I_0$ . При нулевом сдвиге фаз вращающий момент будет всегда положительным с максимально возможным средним значением. Величина фазового сдвига зависит от многих факторов, но, при прочих равных ус-



**Рис. 1.11. Графики изменения мгновенных значений токов  $i$  и  $i_0$  в обмотках якоря и возбуждения и момента  $m$  во время работы коллекторного электродвигателя на переменном токе**

ловиях, у двигателей с параллельным возбуждением она существенно больше, чем у двигателей с последовательным возбуждением.

Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока. Благодаря хорошим механическим и регулировочным характеристикам маломощные двигатели находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, где требуется получить высокие скорости вращения (до 30 000 об/мин) и возможность плавного регулирования скорости в большом диапазоне. Типичными примерами таких устройств являются двигатели бытового электроинструмента (дрели, лобзики, шлифовальные машины).

Коллекторные электродвигатели переменного тока конструктивно отличаются от машин постоянного тока. Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным.

Коллекторные электродвигатели переменного тока конструктивно отличаются от машин постоянного тока. Основное отличие заключается в выполнении магнитопровода статора из набора пластин и обусловлено тем, что магнитный поток индуктора является переменным. Условия коммутации при работе на переменном токе хуже, чем на постоянном, поэтому самым ненадежным элементом конструкции таких электродвигателей является щеточный узел. Обычно он допускает многократную замену щеток.

Кроме коллекторных электродвигателей, рассчитанных только на переменное напряжение питания, выпускаются также *универсальные коллекторные электродвигатели*. Это электродвигатели малой мощности последовательного возбуждения с секционированной обмоткой возбуждения, благодаря чему они могут работать как на постоянном, так и на переменном стандартных напряжениях примерно с одинаковыми свойствами и характеристиками.

Отличительной особенностью таких двигателей является секционирование обмотки возбуждения. Для получения одинаковых механических характеристик на токе разного рода секционированную обмотку возбуждения на постоянном токе включают полностью, а на переменном – частично. Двигатель присоединяют к сети постоянного тока при помощи зажимов с обозначениями «+» и «-», а к сети переменного тока – с обозначениями «~». В зависимости от конструкции двигателя обмотка возбуждения может быть соединена с якорем внутри машины или может иметь самостоятельные наружные зажимы, что удобнее для изменения направления вращения якоря путем перемены мест проводов, подходящих к его зажимам или к зажимам обмотки возбуждения.

Статор универсальных электродвигателей также собирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с выступающими полюсами. На них размещают по две секции обмотки возбуждения. Эти секции соединяют последовательно с якорем и располагают по обе стороны от его выводов, что снижает радиопомехи от искрообразования на коллекторе под щетками. Якорь универсальных двигателей устроен так же, как и якорь машин постоянного тока.

При работе электродвигателя от сети с номинальным напряжением и при номинальной нагрузке на валу скорость якоря при различном роде тока одинакова. Однако при перегрузке двигателя, присоединенного к сети переменного напряжения, скорость якоря уменьшается интенсивнее, чем при работе его от сети постоянного напряжения, т.е. механическая характеристика для переменного тока мягче.

Поскольку универсальные коллекторные электродвигатели имеют последовательное возбуждение, для них также, как и для обычных машин постоянного тока, характерно значительное увеличение частоты вращения при работе на холо-

стом ходу. Скорость якоря может превысить номинальную в 4 раза и выше, а это недопустимо из-за значительных центробежных сил, которые могут разрушить якорь. По этой причине режим холостого хода допустим только для двигателей малой номинальной мощности с относительно большими механическими потерями, ограничивающими скорость якоря. Двигатели с незначительными механическими потерями всегда должны нести нагрузку не менее 25% номинальной.

Номинальный КПД коллекторных электродвигателей зависит от их номинальной мощности, быстроходности и рода тока. Так, у двигателей номинальной мощностью до 100 Вт КПД доходит до 0,55, мощностью до 600 Вт – до 0,70 и выше. Работа на переменном токе всегда сопровождается снижением КПД, что вызвано большими магнитными и электрическими потерями. Номинальный коэффициент мощности этих двигателей составляет 0,70...0,90.

Более подробно ознакомиться с работой универсальных коллекторных электродвигателей, их характеристиками, способами снижения акустического шума и радиопомех можно в книге [12].

### 1.1.9. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В системах автоматики и телемеханики находят широкое применение исполнительные двигатели постоянного тока. Это связано с тем, что двигатели постоянного тока позволяют просто, плавно и экономично регулировать скорость вращения в очень широком диапазоне. При этом они устойчиво работают при любых скоростях вращения и любом характере нагрузки. По массе и габаритам они в два–три раза меньше асинхронных двигателей.

К исполнительным двигателям предъявляется ряд особых требований, обусловленных спецификой их работы. Эти двигатели практически никогда не работают в номинальном режиме. Для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых они почти постоянно находятся, исполнительные двигатели обычно выполняют малоинерционными. Очень важным требованием к исполнительным двигателям является отсутствие самохода – самоторможение двигателя при снятии сигнала управления. Механические характеристики исполнительных двигателей должны быть линейными, пусковой момент – максимальным [9].

Основным недостатком двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щеток. Из-за искрения коллекторные двигатели нормального исполнения не могут работать во взрывоопасных средах и требуют установки устройств подавления радиопомех, возникающих при их работе.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с независимым электромагнитным возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. По конструкции исполнительные двигатели делятся на двигатели обычного исполнения, двигатели с беспазовым якорем и малоинерционные двигатели.

Двигатели обычного исполнения отличаются от силовых двигателей постоянного тока только тем, что имеют шихтованный магнитопровод статора. Это связано с необходимостью минимизации потерь в стали, так как эти двигатели значительную часть времени работают в переходных режимах с изменяющимся основным магнитным потоком.

Двигатели с беспазовым якорем отличаются от обычных двигателей тем, что обмотка якоря располагается на цилиндрической поверхности якоря. Это увеличивает воздушный зазор двигателя и требует увеличения тока возбуждения, но позволяет существенно снизить индуктивность обмотки якоря и за счет этого улучшить условия коммутации. Кроме того, беспазовая конструкция позволяет уменьшить момент инерции якоря и увеличить быстродействие двигателя.

Одним из недостатков двигателей постоянного тока обычного исполнения является относительно большой момент инерции якоря, снижающий их быстродействие. Для уменьшения момента инерции якоря применяются различные конструктивные решения, одним из которых является использование обмотки якоря, изготовленной печатным способом на немагнитном диске или цилиндре. Обмотку якоря малоинерционных двигателей выполняют также на немагнитных дисках или цилиндрах обычным проводом с последующей заливкой полимерным составом. В результате образуется монолитный цилиндр или диск с проводниками обмотки, расположенными внутри. Такая технология более сложная и трудоемкая, чем печатная, но позволяет увеличить механическую прочность конструкции якоря.

### 1.1.10. ПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При пуске электродвигателя постоянного тока из состояния покоя ( $\omega = 0$ ) ЭДС, наводимая в обмотке якоря, равна нулю. Следовательно, в соответствии с уравнением (1.1) пусковой ток  $I$  ограничивается только сопротивлением  $R$  обмотки якоря. Поскольку сопротивление цепи якоря невелико, при пуске с номинальным напряжением ток якоря в 10...50 раз может превысить свое номинальное значение. Такой ток недопустим ни для щеток (из-за чрезмерных плотностей тока и сильного искрения под ними), ни для обмоток (из-за больших электродинамических усилий, пропорциональных квадрату тока якоря), ни для сети (из-за больших падений напряжения в ней). Кроме того, в соответствии с формулой (1.4), пропорционально росту тока увеличивается электромагнитный момент двигателя, что может привести к поломке узла, соединяющего вал двигателя и приводимого механизма. По условиям работы коллекторно-щеточного узла допустимый пусковой ток не более чем в 2,5 раза может превышать номинальный [11].

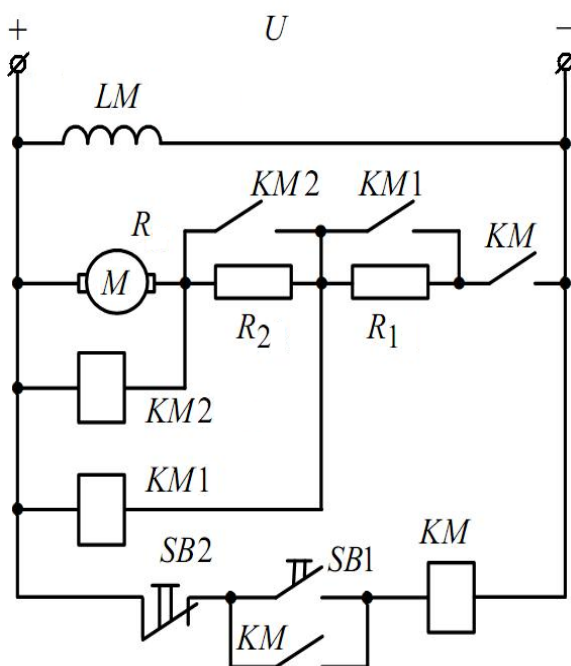
Таким образом, прямой пуск (прямое включение в сеть) допустим только для двигателей малой мощности с относительно большим сопротивлением цепи якоря. Пусковой ток мощных двигателей необходимо уменьшать до допустимых значений, что достигается снижением подводимого напряжения или включением последовательно с обмоткой якоря добавочного активного сопротивления или пускового реостата.

Поскольку пуск двигателя при помощи реостата подразумевает ручное воздействие и его автоматизация нецелесообразна, в настоящем пособии этот способ рассматриваться не будет. Узнать об этом способе и о характеристиках пусковых реостатов можно из книг [6, 9 – 11].

Пуск при пониженном напряжении можно осуществить, если двигатель подключен к отдельному регулируемому источнику постоянного тока. В этом случае при включении двигателя напряжение источника плавно увеличивают от начального до номинального значения, что позволяет избежать больших толчков тока. Начальное напряжение при пуске должно обеспечивать пусковой ток, не превышающий допустимое значение. По сути, такой способ является регулирова-

нием частоты вращения, например, при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и рассмотрен в соответствующем пункте настоящей главы.

Рассмотрим автоматизированный пуск электродвигателя постоянного тока при помощи добавочных сопротивлений. На рисунке 1.12 представлена электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока [8].



**Рис. 1.12. Электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока**

Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя по обмотке возбуждения  $LM$  начинает течь ток, формирующий номинальный магнитный поток  $\Phi$ .

При нажатии кнопки  $SB1$  «Пуск» обмотка контактора [9]  $KM$  получает питание, он срабатывает и самоблокируется, т.е. параллельно кнопке  $SB1$  замыкается вспомогательный контакт  $KM$ . При отпускании кнопки  $SB1$  напряжение на обмотке  $KM$  сохраняется. Кроме того, замыкается силовой контакт  $KM$  в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями  $R1$  и  $R2$ .

По мере разгона двигателя растет ЭДС обмотки якоря, в результате чего увеличивается напряжение на обмотках контакторов  $KM1$  и  $KM2$ . При достиже-



нии двигателем скорости  $\omega_1$  значение ЭДС на контакторе  $KM1$  становится достаточным для его срабатывания. Контакт  $KM1$  замыкается и шунтирует резистор  $R1$ . По мере дальнейшего разгона двигателя при скорости  $\omega_2$  срабатывает контактор  $KM2$  и шунтирует резистор  $R2$ . Двигатель переходит на естественную механическую характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости, определяемой нагрузкой.

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку  $SB2$  «Стоп». Контактор КМ потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения  $U$ . Торможение электродвигателя происходит «выбегом», т.е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Ознакомиться со схемами пуска электродвигателей других типов возбуждения и процессами, происходящими в них, можно, изучив соответствующие главы пособий [8, 9].

### 1.1.11. ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В связи с необходимостью точного позиционирования рабочего органа в мехатронных системах часто возникает особая необходимость своевременного торможения электродвигателей. Для того чтобы быстро остановить механизм или уменьшить его скорость, наряду с механическими применяются и электрические способы.

Для понимания механизма электрического торможения обратимся к уравнению (1.1), из которого следует, что пока напряжение  $U$  источника питания больше ЭДС  $E$  индукции, ток  $I$  положительный, а момент  $M$  действует в направлении вращения. Как только напряжение  $U < E$ , ток  $I$  становится отрицательным, в результате чего, как следует из формулы (1.4), меняет знак и момент  $M$ . Он становится тормозным. Процессы разгона и торможения происходят в электрической машине всегда при условии, что якорь включен в сеть. Если для остановки двигателя просто отключить якорь от сети, то цепь окажется разомкнутой, ток якоря станет равным нулю и не сможет создать тормозной момент. Уменьшение частоты вращения будет происходить только за счет механических потерь различного

рода в течение сравнительно большого интервала времени. Следовательно, для эффективного торможения необходимо тем или иным способом оставить якорь включенным в какую-либо электрическую цепь.

В машинах постоянного тока применяют три способа электрического торможения [9, 11]:

- динамическое;
- рекуперативное;
- противовключением.

При динамическом торможении электрическая машина работает в режиме автономного генератора, при рекуперативном – в режиме генератора, параллельного сети, при торможении противовключением – в режиме электрического тормоза.

В режиме динамического торможения при включенной обмотке возбуждения цепь якоря замыкают на внешнее активное сопротивление  $R_b$ . Тогда напряжение  $U$  источника становится равным нулю, а цепь якоря состоит из двух, последовательно соединенных сопротивлений  $R$  и  $R_b$ . Ток  $I$  меняет направление и определяется только величиной ЭДС и этими сопротивлениями. Из уравнения (1.5) механической характеристики получим

$$M = -\frac{(k\Phi)^2}{R + R_b} \omega. \quad (1.9)$$

Из уравнения (1.9) видно, что механическая характеристика электрической машины постоянного тока является прямой, проходящей через начало координат [9, 11]. Максимальная эффективность торможения (максимальное значение момента  $M$ ) достигается при замыкании якоря накоротко ( $R_b = 0$ ).

Во время торможения по мере уменьшения частоты вращения  $\omega$  уменьшается ЭДС  $E$ , ток  $I$  и тормозной момент  $M$  (см. уравнение 1.9). Поэтому основным недостатком динамического способа является низкая эффективность торможения при малых частотах вращения.

При рекуперативном торможении электродвигатель не отключается от сети, а ЭДС  $E$  индукции тем или иным способом повышают до значений, превышающих напряжение  $U$  сети.

Регулировка магнитного потока шунтовой обмотки позволяет эффективно регулировать тормозной момент. При большом магнитном потоке в обмотках якоря вырабатывается высокая ЭДС даже на малой частоте вращения. Если эта ЭДС превышает напряжение сети, то электродвигатель пополняет сеть электрической энергией за счет кинетической энергии движущихся частей машины. Рекуперативное торможение прекращается при падении ЭДС меньше напряжения сети в результате уменьшения частоты вращения. При малом магнитном потоке шунтовой обмотки торможение происходит лишь при высокой частоте вращения. Для увеличения эффективности рекуперативного торможения целесообразно использовать устройства, повышающие напряжение, вырабатываемое электрической машиной.

Как уже отмечалось в п. 1.1.7 рекуперативное торможение эффективно на электротранспорте, когда тормозящие и скатывающиеся со спуска составы частично обеспечивают энергией разгоняющиеся и поднимающиеся в гору, снижая тем самым общее энергопотребление транспортной сети. В электротранспорте часто применяют электродвигатели с последовательным возбуждением, для которых применить рекуперативное торможение невозможно [11]. По этой причине вместо электродвигателей с последовательным возбуждением используют электродвигатели со смешанным возбуждением. При этом серийную обмотку используют в основном двигательном режиме, а шунтовую (которая может быть и независимой) – в режиме рекуперативного торможения.

Для перехода в режим торможения противовключением изменяют полярность подводимого к якорю напряжения, в результате чего ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  становятся совпадающими по направлению. По сути, это режим пуска двигателя в противоположном направлении. Условия такого пуска существенно хуже обычных, так как при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ток  $I$  может более чем в два раза превышать ток пуска из состояния покоя. Такой ток крайне нежелателен как для самого электродвигателя, так и для сети. Поэтому торможение противовключением целесообразно применять только при малой частоте вращения, когда остальные способы торможения малоэффективны.

Важным моментом при торможении противовключением является необходимость отключения двигателя от сети при достижении состояния покоя, так как в противном случае его вал начнет вращаться в противоположную сторону.

Более подробно изучить изменение электрических параметров машин постоянного тока во время торможения и ознакомиться с их механическими характеристиками при различных способах торможения можно по рекомендуемой литературе [9, 11].

В мехатронных системах все операции торможения целесообразно осуществлять в автоматическом режиме с использованием информации от датчиков частоты вращения и импульсных реверсивных регуляторов напряжения, применяя различные способы торможения на его различных его этапах.

#### 1.1.12. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как уже было отмечено в п. 1.1.1, для изменения направления вращения электродвигателя постоянного тока достаточно изменить полярность подключения якоря или обмотки возбуждения. У двигателя постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом возможно только изменение полярности подключения якоря. Эта простая для теоретической электротехники процедура на практике часто требует существенных затрат. При ручном управлении требуется две контактные группы, а в случае электронного управления необходимы, по меньшей мере, четыре электронных ключа. Более удобны реверсивные электродвигатели, обмотка возбуждения которых состоит из двух секций, создающих встречные магнитные потоки. Для управления направлением вращения такого электродвигателя достаточно иметь один переключатель или два электронных ключа, но такие электродвигатели применяются чрезвычайно редко.

На рисунке 1.13 представлена схема управления направлением вращения электродвигателем постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом с использованием электромагнитных реле или контакторов.

Питание реле может быть реализовано, как от отдельного источника, так и от источников питания микроконтроллера или электродвигателей мехатронной системы. Для управления электродвигателем требуется две линии порта микроконтроллера или другого управляющего устройства.

В исходном состоянии на вход схемы с выходов микроконтроллера подаются логические сигналы нулевого уровня. Напряжение на базах транзисторов VT1 и VT2 близко к нулю, они закрыты. По обмоткам реле K1 и K2 не протекает ток, оба вывода электродвигателя M1 подключены к плюсу источника питания, т.е. замкнуты накоротко. Это обеспечивает автоматическое торможение двигателя в исходном состоянии и после окончания управляющих импульсов на входе схемы.

При подаче на линию «Вперед» сигнала логической единицы (напряжение около 5 В) через резистор R1 и эмиттерный переход транзистора VT1 начинает протекать ток, который вызывает появление тока коллектора через обмотку реле K1. В реле K1 переключается контакт K1.1, который обеспечивает подключение левого по схеме вывода электродвигателя M1 к минусу источника питания. После этого через электродвигатель протекает ток, его ротор вращается в одном из направлений. Остановка электродвигателя обеспечивается снятием сигнала логической единицы на линии «Вперед». Через эмиттерный переход транзистора VT1 перестает течь ток, он закрывается, реле K1 отключается, контакт K1.1 возвращается в исходное состояние, двигатель тормозится.

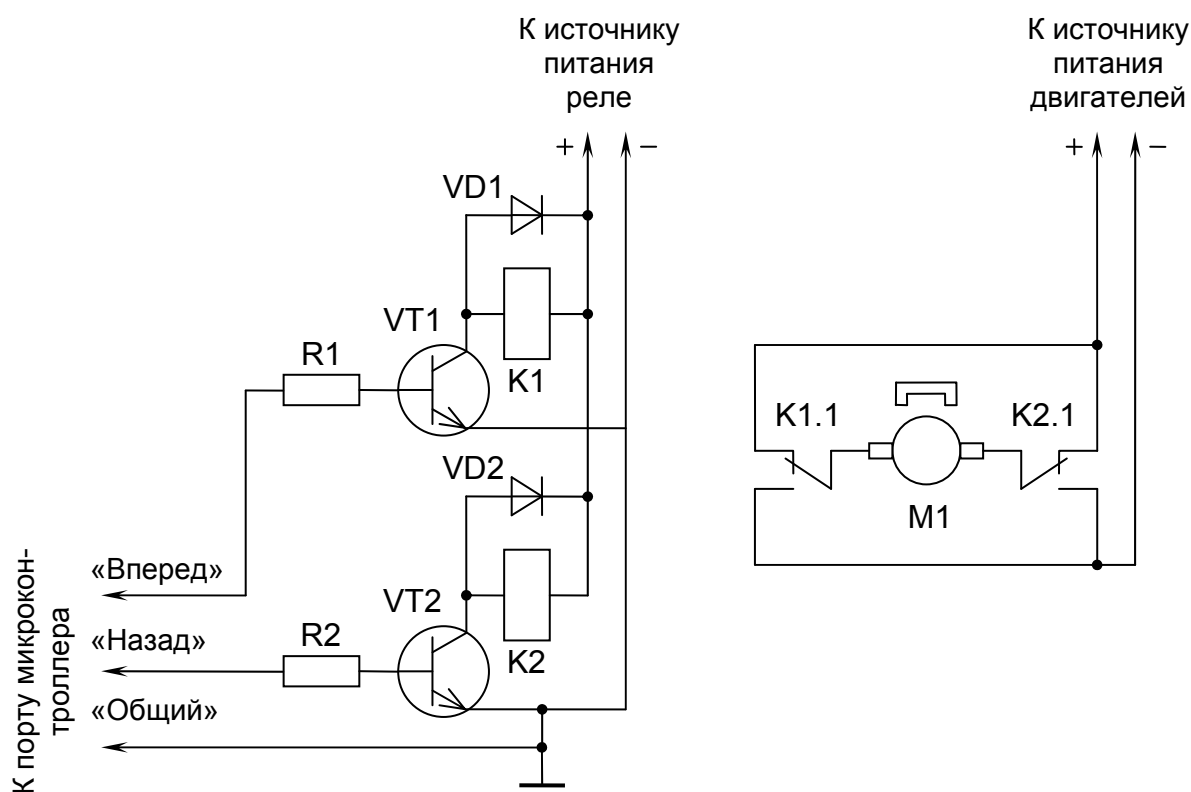


Рис. 1.13. Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием электромагнитных реле

Аналогично, при подаче сигнала логической единицы на линию «Назад» открывается транзистор VT2, срабатывает реле K2 и переключается контакт K2.1. К минусу источника питания подключается правый по схеме вывод электродвигателя M1, и его ротор вращается в противоположную сторону.

Подача двух единиц на оба входа схемы («Вперед» и «Назад») не является аварийной ситуацией, так как в этом случае также обеспечивается торможение в результате замыкания выводов электродвигателя на минусе источника питания.

Недостатки схемы на рис. 1.13 обусловлены применением контактных элементов – электромагнитных реле или контакторов K1 и K2. Это снижает надежность схемы и ограничивает возможности регулировки частоты вращения электродвигателя путем ШИМ, так как контактные элементы имеют ограниченное число переключений. К достоинствам схемы следует отнести ее простоту и обеспечение гальванической развязки силовой части (электродвигатели) от управляющей (микроконтроллер).

В схеме транзисторы VT1 и VT2 выполняют роль электрических ключей и предназначены для коммутации сравнительно большого тока в обмотках реле K1 и K2 при помощи слаботочных сигналов микроконтроллера.

Диоды VD1 и VD2 необходимы для защиты транзисторов от высокого напряжения. При отключении при помощи транзистора обмотки реле в результате ее высокой индуктивности на коллекторе формируется импульс высокого напряжения, значительно превышающего напряжение питания. В отсутствие диода такой импульс может пробить транзистор, и он выйдет из строя. Диод, включенный при протекании тока по обмоткам реле обратно, во время действия импульса включается прямо. Напряжение на коллекторе превышает напряжение питания на величину, не бóльшую, чем нужно для открытия диода в прямом направлении (не более 1 В). Энергия, запасенная в магнитном поле обмоток реле, возвращается источнику питания.

Резисторы R1 и R2 необходимы для ограничения тока баз транзисторов VT1 и VT2. При отсутствии резисторов эмиттерные переходы транзисторов полностью открываются, так как напряжение логической единицы существенно больше напряжения, необходимого для их открытия (около 0,6 В). Через порт микрокон-

троллера и базы транзисторов течет максимально возможный ток, который может повредить как порт, так и транзисторы.

Расчет и выбор элементов для схемы начинают с реле К1 и К2. Их контакты должны обеспечивать коммутацию в цепи постоянного тока с номинальными значениями силы тока и напряжения электродвигателя. Напряжение, на которое рассчитаны обмотки реле, выбирают исходя из имеющихся в мехатронной системе или возможных. Предельно допустимое обратное напряжение диодов VD1 и VD2 должно быть больше напряжения питания реле, например, в 1,5 раза. Их предельно допустимый прямой ток определяется индуктивностью обмоток реле.

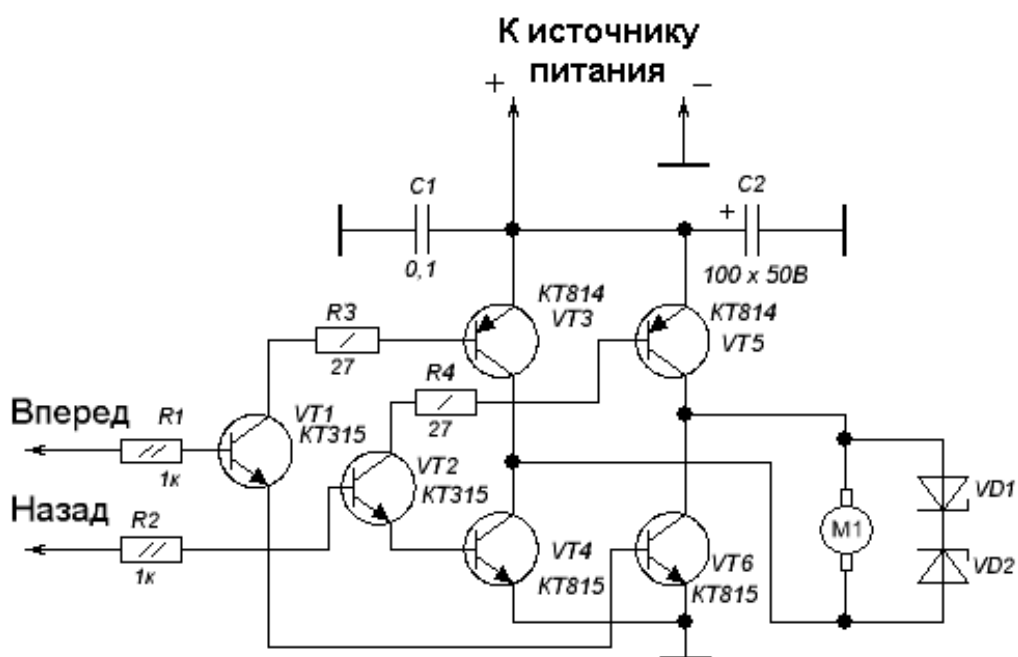
Предельно допустимое напряжение коллектор–эмиттер транзисторов VT1 и VT2 должно превышать напряжение питания реле К1 и К2. Для эффективного использования транзисторов предельно допустимый ток их коллекторов целесообразно выбрать как минимум в два раза большим, чем номинальный ток обмоток реле, так как при токе, близком к максимальному, существенно уменьшается коэффициент усиления. Номинальный ток обмотки реле можно определить по закону Ома через номинальное напряжение и сопротивление обмоток. Коэффициент усиления – коэффициент  $h_{21Э}$  передачи тока от коллектора к базе в схеме с общим эмиттером – выбирают исходя из отношения номинального тока в обмотках реле к допустимому току базы. Для обеспечения полного открытия транзистора целесообразно выбирать транзистор с коэффициентом  $h_{21Э}$ , значительно больше расчетного (до 10 раз). В этом случае на нем при любом токе будет минимальное падение напряжения и мощность. Ток базы выбирают исходя из допустимых значений тока для отдельной линии порта микроконтроллера, для всего порта и всего микроконтроллера, а также с учетом желаемого энергопотребления всей схемы.

Выбранный ток базы транзисторов определяет сопротивление резисторов R1 и R2. Эти значения определяются по закону Ома с использованием напряжения сигнала логической единицы, из которого нужно вычесть падение напряжения на эмиттерном переходе (0,6 В). Для надежной работы системы мощность рассеяния резистора должна быть не менее чем в два раза больше расчетной, т.е. произведения тока базы транзистора на падение напряжения на резисторе.

Для повышения надежности и увеличения быстродействия схемы управления электродвигателем целесообразно использовать электронные ключи: бипо-

лярные и полевые транзисторы. Схемы управления на транзисторах позволяют не только изменять направление вращения, но и регулировать скорость посредством широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов.

На рисунке 1.14 представлена мостовая схема управления электродвигателем постоянного тока малой мощности. Кроме позиционных обозначений, на схеме для пассивных компонентов указаны их номиналы, емкости в мкФ и сопротивления в Ом и кОм, а для транзисторов – типы. На резисторах обозначена их мощность рассеяния.



**Рис. 1.14. Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием биполярных транзисторов**

Конденсаторы C1 и C2 являются фильтром питания. Они снижают проникновение коммутационных помех от щеток электродвигателя и процессов управления во внешнюю цепь. Все резисторы предназначены для ограничения тока в базовых цепях транзисторов (см. описание схемы на рис. 1.13).

Схема на рис. 1.14 работает следующим образом. В исходном состоянии при сигналах уровня логического нуля на обоих входах схемы транзисторы VT1 и VT2 закрыты, а, следовательно, закрыты и транзисторы VT3...VT6, так как ток через их базы может течь только при наличии тока в коллекторной цепи транзисторов VT1 и VT2. Электродвигатель M1 отключен от источника питания, его вал не вращается.



При подаче логической единицы на вход «Вперед» возникает электрический ток через резистор R1 и эмиттерные переходы транзисторов VT1 и VT6. Эти транзисторы открываются, в результате чего ток протекает и через резистор R3 и эмиттерный переход транзистора VT3. Он также отрывается. Транзистор VT3 обеспечивает подключение нижнего по схеме вывода электродвигателя к плюсу источника питания, а транзистор VT6 – верхнего вывода к минусу. Вал двигателя M1 начинает вращаться в прямом направлении. Для остановки двигателя необходимо снять сигнал логической единицы с входа «Вперед».

При подаче логической единицы на вход «Назад» открываются транзисторы VT2, VT4 и VT5. При этом полярность подключения электродвигателя M1 к источнику питания противоположна рассмотренной выше. Его вал вращается в обратном направлении.

Подавать сигналы единичного уровня на оба входа схемы нельзя, так как в этом случае открываются все транзисторы VT3...VT6, что приводит к короткому замыканию источника питания и при отсутствии устройств защиты выводит из строя транзисторы или источник питания. Динамическое торможение в схеме на рис. 1.14 невозможно.

Сопротивление резисторов R3 и R4 значительно меньше сопротивлений R1 и R2, так как для управления мощными выходными транзисторами VT3...VT6 требуется больший ток.

В мостовой схеме на рис. 1.14 для ограничения импульса напряжения при отключении электродвигателя применены стабилитроны. Напряжение стабилизации необходимо выбирать бóльшим, чем напряжения питания, так как в противном случае при включении двигателя возникнет короткое замыкание. Вместо стабилитронов можно использовать четыре диода, включенные обратно между каждым выводом электродвигателя и каждым полюсом источника питания.

Для повышения надежности схемы и обеспечения возможности динамического торможения целесообразно включать выходные транзисторы с общим коллектором, а их базы подключать к выходу усилителя напряжения. В этом случае может потребоваться больше, чем шесть транзисторов, а схема их соединения зависит от соотношения напряжений управляющих сигналов и источника питания.

Максимальная мощность электродвигателя M1, который можно использовать в схеме, ограничивается максимально допустимыми значениями токов (до 1 А) и напряжений (до 40 В) выходных транзисторов. Для управления мощными электродвигателями необходимо выбрать более мощные радиодетали. Схема останется прежней. Однако силовые ключи, построенные на биполярных транзисторах, имеют ряд серьезных недостатков, главными из которых являются [4]:

- низкое быстродействие, по сравнению с силовыми ключами других типов;
- низкий коэффициент передачи по току в области больших нагрузок и, как следствие, сложность и большая стоимость систем управления;
- малая стойкость к перегрузкам.

В настоящее время биполярные транзисторы почти полностью вытеснены более эффективными силовыми ключами, кроме устройств массового применения, где определяющим фактором является низкая стоимость на единицу мощности.

Удобно использовать полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET или МОП) [4]. В отличие от биполярных транзисторов они управляются не током, а напряжением. По этой причине при разработке мостовой схемы необходимо учитывать соотношение напряжения источника питания и напряжения управления. Привести одну схему для различных случаев затруднительно.

Какие бы элементы не использовались в мостовой схеме управления электродвигателем постоянного тока, она является сложной. Поскольку вариант ее реализации в большинстве применений не имеет значения, целесообразно применять специализированные микросхемы и блоки для управления коллекторными электродвигателями, широкая номенклатура которых выпускается производителями электроники разных стран для различных отраслей промышленности. Это, например, микросхемы AN8377N, AN8389S для CD-проигрывателей, универсальная микросхема L293D, микросхемы BTS7700G, BTS7750GP для электрооборудования автомобилей. Ознакомиться с устройством этих микросхем можно с использованием официальной документации производителя (datasheet), которую не сложно найти в сети Интернет по наименованию микросхемы. Такие микросхемы, как правило, допускают подачу любой комбинации входных сигналов и обеспечивают возможность режима динамического торможения, а также имеют в своем составе специализированные блоки ШИМ.

Выбор микросхем для управления маломощными электродвигателями постоянного тока очень широк. Для поиска конкретной микросхемы целесообразно использовать соответствующие справочные издания, например, книгу [13] и сайты сети Интернет.

В цепях переменного тока могут эффективно работать схемы с электронным управлением на основе тиристоров [4]. В цепях постоянного тока применение тиристоров неэффективно, так как для отключения (закрывания) тиристора необходимо уменьшить напряжение на нем почти до нуля, т.е. отключить от цепи каким-то другим коммутирующим прибором. В цепях переменного тока такое снижение напряжения обеспечивается автоматически при изменении его полярности в другом полупериоде.

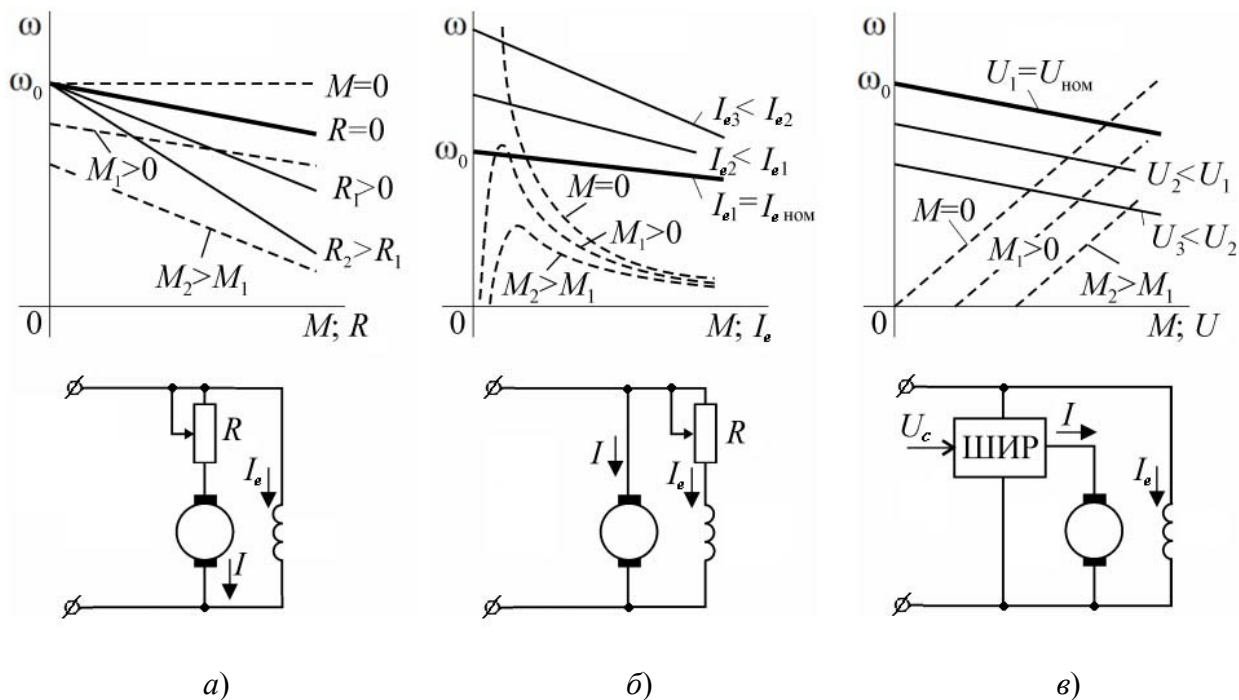
### 1.1.13. РЕГУЛИРОВКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как следует из уравнения (1.5), регулировать скорость двигателя постоянного тока независимого и параллельного возбуждения можно тремя основными способами:

- изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки якоря двигателя;
- изменением потока  $\Phi$  возбуждения двигателя;
- изменением подводимого к обмотке якоря напряжения  $U$ .

На рисунке 1.15 представлены графики механических и регулировочных характеристик двигателей постоянного тока при различных способах регулирования и схемы их реализации. Механические характеристики изображены сплошными линиями, регулировочные – штриховыми.

Включение реостата в цепь якоря двигателя для регулирования частоты вращения является наиболее простым и очевидным (рис. 1.15, *a*). Увеличение сопротивления  $R$  в цепи якоря приводит к уменьшению тока  $I$  и напряжения  $U$  на его обмотках, в результате чего падает и частота вращения. Регулировочные характеристики (зависимости  $\omega(R)$  частоты вращения от сопротивления добавочного резистора) при этом способе регулирования линейны. Регулирование возможно только в области скоростей вращения ниже номинальной.



**Рис. 1.15. Характеристики электродвигателей постоянного тока и схемы реализации различных способов регулирования**

Несмотря на линейность регулировочных характеристик, регулирование частоты вращения сопряжено с рядом трудностей. Это связано с тем, что при изменении сопротивления  $R$  жесткость механических характеристик существенно изменяется (см. рис. 1.15, *а*). Поэтому при малом моменте нагрузки большие изменения сопротивления не приведут к значительному изменению частоты вращения, а при большом – даже незначительное увеличение сопротивления может привести к остановке двигателя.

Уменьшение жесткости механических характеристик является существенным недостатком рассматриваемого способа регулирования, однако более важным фактором, препятствующим его применению, являются высокие потери. Через реостат протекает весь ток якоря двигателя, поэтому, например, при равенстве напряжений на добавочном сопротивлении и якоре они будут потреблять одинаковую мощность от источника. Потери составят половину используемой энергии. При этом необходимо применять мощный реостат и обеспечивать его охлаждение.

В современных приводах включение добавочного сопротивления в цепь якоря находит применение только в устройствах ограничения пусковых токов (см. рис. 1.12).

Значительно уменьшить потери при регулировании частоты вращения двигателей с электромагнитным возбуждением можно путем изменения тока возбуждения  $I_e$ . Изменение тока приводит к изменению магнитного потока  $\Phi$ , который в соответствии с (1.5) оказывает непосредственное влияние на частоту  $\omega$ . Уменьшение потерь при использовании этого способа по сравнению с регулированием в цепи якоря достигается в результате того, что мощность цепи возбуждения значительно меньше мощности цепи якоря. Регулирование скорости вращения изменением величины магнитного потока главных полюсов называется полюсным.

При уменьшении магнитного потока ниже номинального, например, путем установки добавочного резистора в цепь обмотки возбуждения, частота вращения возрастает (см. рис. 1.15, б) и может превысить номинальную. По этой причине этот способ регулирования возможен только для тех двигателей, которые допускают такое повышение частоты вращения.

Регулировочные характеристики  $\omega(I_e)$  двигателя при полюсном управлении нелинейны. При нулевом моменте нагрузки регулировочная характеристика представляет собой гиперболу, а при нагрузке отличной от нуля – кривую второго порядка, имеющую максимум в области малых токов возбуждения.

Нелинейность и неоднозначность регулировочных характеристик являются большими недостатками полюсного управления, которые нужно учитывать при разработке и эксплуатации. Другим недостатком, так же, как и в случае добавочного сопротивления в цепи якоря, является уменьшение жесткости механических характеристик. Сложность изменения механических и регулировочных характеристик затрудняет регулирование частоты вращения. Изменение магнитного потока влияет не только на скорость вращения, но и на вращающий момент двигателя. При увеличении скорости уменьшается момент и наоборот. Механические характеристики рабочих органов, как правило, имеют противоположную зависимость. Поэтому при регулировке частоты вращения необходимо обратное – одновременное увеличение и скорости и момента.

Достоинством полюсного способа регулирования являются возможность получения при номинальном напряжении питания скоростей вращения, превышающих номинальную скорость.

Несмотря на то, что при полюсном регулировании потери мощности значительно снижены, применение активного сопротивления в любых схемах неэффективно. Резистор преобразует энергию не в полезную работу, а в тепло. Необходимо обеспечивать его охлаждение. Возникают трудности при необходимости автоматического или дистанционного электронного управления. Особо отметим, что в мехатронных системах использование реостатов совершенно неприемлемо. Получить дополнительную информацию по якорному и полюсному управлению при помощи реостатов можно в пособиях [8 – 11].

Как в цепи якоря, так и в цепи обмотки возбуждения целесообразно использовать регуляторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Ввиду линейности механических и регулировочных характеристик такой регулятор предпочтительно включать в цепь якоря (рис. 1.15, в).

Широтно-импульсный регулятор (ШИР) позволяет изменять среднее напряжение на обмотке якоря. При этом схема регулятора отличается малым энергопотреблением. Регулировочные характеристики  $\omega(U)$  при ШИМ напряжения питания являются линейными, а жесткость механических характеристик не изменяется. Увеличение частоты вращения сопровождается увеличением вращающего момента. Применение ШИР является чрезвычайно удобным и выгодным во всех устройствах. По этой причине многие управляющие микроконтроллеры имеют в своем составе модули ШИМ, которые на аппаратном уровне вырабатывают требуемый ШИМ-сигнал. В цепях переменного тока для регулирования используют управляемые выпрямители [4].

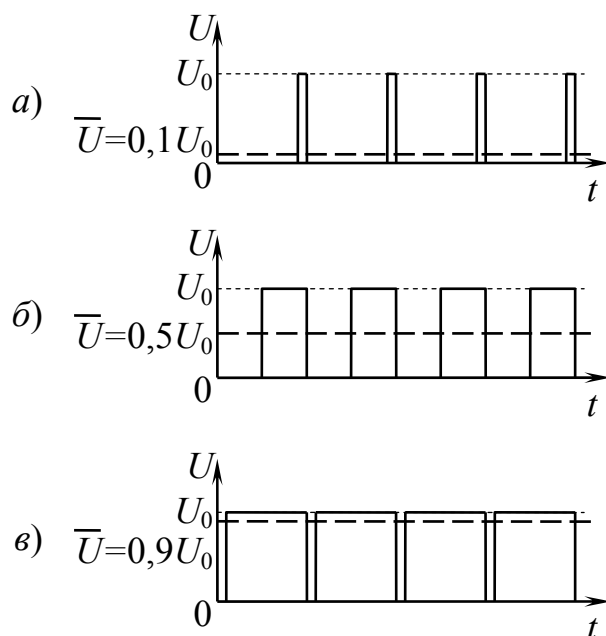
Принцип работы ШИР заключается в изменении скважности импульсов напряжения питания якоря, подаваемых с заданной частотой. Скважностью называется отношение периода следования импульсов к их длительности. Например, если период в два раза превышает длительность импульса, то скважность равна двум. В крайних случаях, когда напряжение питания постоянно или равно нулю, скважность соответственно равна единице или бесконечности.

На рисунке 1.16 представлены временные диаграммы работы ШИР при различных значениях выходного напряжения. На рисунке 1.16, а приведен график изменения выходного напряжения регулятора, когда длительность импульса со-

ставляет десятую часть периода. Среднее и действующее значение  $\bar{U}$  выходного напряжения соответственно составляет десятую часть напряжения  $U_0$  питания регулятора. На рисунке 1.16, б и в приведены графики изменения напряжения регулятора при  $\bar{U}$ , равном 50% и 90% от  $U_0$  соответственно.

При использовании ШИР для питания электродвигателей нет необходимости сглаживать импульсы его выходного напряжения, так как ротор будет вращаться равномерно благодаря своему моменту инерции. В случае использования ШИР для питания устройств, не допускающих пульсации питающего напряжения, на выходе ШИР ставится сглаживающий фильтр из конденсаторов и, при необходимости, катушек индуктивности (дросселей). Это не ухудшает работу регулятора, но делает выходное напряжение постоянным, близким к тому, как оно показано штриховыми линиями на рис. 1.16.

Для формирования импульсов выходного напряжения в ШИР могут быть использованы любые ключевые элементы, в том числе и электромагнитные, однако для повышения надежности электрической схемы целесообразно использовать



**Рис. 1.16. Временные диаграммы работы ШИР при различных значениях  $\bar{U}$  выходного напряжения:**

сплошные линии – диаграммы изменения выходного напряжения  $U$ ;  
штриховые – среднее (действующее) значение  $\bar{U}$  выходного напряжения

полупроводниковые приборы: биполярные и полевые транзисторы, тиристоры. Эти приборы работают в *ключевом режиме*. Для работы выходных полупроводниковых приборов в ключевом режиме схема должна обеспечить только два устойчивых состояния: «полностью открыт» и «полностью закрыт».

При последовательном соединении транзистора и нагрузки (рис. 1.17) имеет место уравнение

$$U_{кэ}(I) = U_0 - IR, \quad (1.10)$$

где  $U_{кэ}$  – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора, В;  $I$  и  $R$  – ток и сопротивление нагрузки, А и Ом;  $U_0$  – напряжение питания ШИР, В. График этой функции называется *нагрузочной линией* [14]. Мощность, выделяющаяся на транзисторе, определяется произведением тока в нагрузке на напряжение на транзисторе. Умножив (1.10) на ток  $I$ , получим

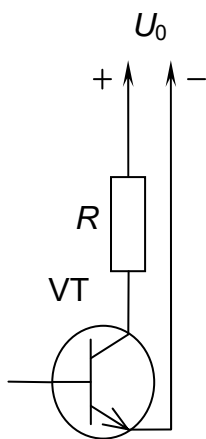
$$P(I) = U_0 I - I^2 R. \quad (1.11)$$

Продифференцировав это уравнение по току  $I$  и приравняв производную нулю, можно найти ток, соответствующий максимальной выделяющейся на транзисторе мощности и соответствующее сопротивление коллекторной цепи. Максимальная мощность выделяется на транзисторе, если это сопротивление равно сопротивлению  $R$  нагрузки, или при равенстве напряжения  $U_{кэ}$  напряжению на нагрузке. В ключевом режиме работы в закрытом состоянии ток через транзистор предельно мал ( $I \approx 0$ ), следовательно, мощность  $P$  также равна нулю (см. (1.11)), несмотря на то, что напряжение равно напряжению питания  $U_0$ . В открытом состоянии сопротивление коллекторной цепи транзистора близко к нулю, ток определяется исходя из закона Ома:

$$I = \frac{U_0}{R}. \quad (1.12)$$

Подставив (1.12) в (1.10) и (1.11), получим, что  $U_{кэ} \approx 0$  и  $P \approx 0$ , несмотря на высокое значение тока  $I$ . Таким образом, в ключевом режиме работы транзистор переходит из одного состояния с минимальным потреблением энергии в другое. По этой причине ШИР имеют два основных преимущества перед пассивными схемами на реостатах. Это, во-первых, высокий КПД, и, как следствие, отсутствие не-





**Рис. 1.17. К пояснению ключевого режима работы биполярного транзистора**

обходимости мощного отвода тепла от регулирующего ключевого элемента. Переход из закрытого состояния в открытое происходит через область с большим потреблением энергии, поэтому он должен быть произведен максимально быстро. Реальные полупроводниковые приборы не могут мгновенно изменить значение тока в цепи [4]. Поэтому на них все же выделяется часть мощности, и их необходимо устанавливать на сравнительно небольшой радиатор.

Для управления электродвигателем постоянного тока в режиме ШИМ может быть использована схема на рис 1.14 и другие подобные схемы. В зависимости от требуемого направления вращения на один из входов схемы необходимо подавать импульсы с различной скважностью, что позволит изменять частоту вращения в широком диапазоне. При отсутствии необходимости изменения направления вращения достаточно использовать один силовой ключевой элемент (см. рис. 1.17).

Кроме ШИМ также существуют:

- длительностно-импульсная модуляция (ДИМ), при которой длительность импульса меняется, а длительность паузы между импульсами остается постоянной;
- времяимпульсная модуляция (ВИМ), при которой длительность импульса постоянна, а время между фронтами импульсов изменяется;
- частотно-импульсная модуляция (ЧИМ), при которой длительность импульсов постоянна, но меняется количество импульсов за определенный промежуток времени.

Эти виды модуляции используются значительно реже, а смысл их одинаков и заключается в изменении скважности импульсов. ШИМ сохраняет период следования импульсов постоянным, что позволяет легко согласовывать несколько устройств с различной скважностью ШИМ-сигнала. Большинство микроконтроллеров имеют в своем составе аппаратные блоки ШИМ, а при отсутствии таких

блоков они легко реализуются программно при помощи таймера и системы прерываний. В цепях переменного тока используется аналог ШИМ, при котором нагрузка подключается к сети только в определенную часть полупериода. Для этой цели широко используют тиристоры. Подробно прочитать про регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока можно в пособиях [3 – 5].

Регулирование частоты вращения электродвигателей с последовательным возбуждением осуществляется способами, аналогичными рассмотренным. В пассивных схемах с реостатом полюсное регулирование, реализуемое параллельным включением обмотки возбуждения регулируемого резистора, является наиболее экономичным.

#### 1.1.14. ЭНКОДЕРЫ И СЕРВОПРИВОДЫ

Электродвигатели постоянного тока в отличие от, например, шаговых, не позволяют обеспечить точное перемещение вала на заданный угол. Стабилизировать частоту вращения и управлять положением вала можно различными путями, однако без применения датчиков положения точность позиционирования рабочего органа будет недостаточной для применения в мехатронной системе. Для получения информации о пройденном угловом перемещении валом электродвигателя постоянного тока применяют специальные устройства – *энкодеры*.

Энкодер или датчик углового перемещения предназначен для создания отрицательной обратной связи. На схеме рис. 1.1 это датчик Д. Энкодер обеспечивает блок управления БУ информацией о фактическом угловом перемещении вала электродвигателя. БУ сравнивает текущее фактическое перемещение с необходимым перемещением в данный момент времени и формирует соответствующий управляющий сигнал для увеличения или уменьшения скорости вращения.

Такая система с обратной связью называется *сервоприводом*. В общем смысле сервопривод – это привод с управлением через отрицательную обратную связь, позволяющую точно управлять параметрами движения. Сервоприводом является любой тип механического привода, имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т.п.) и блок управления приводом, автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике и устройстве согласно задан-

ному внешнему значению. Сервопривод является наиболее близким понятием к термину «исполнительный механизм», используемому в автоматике.

Энкодер – это устройство, преобразующее линейное или угловое перемещение в последовательность сигналов, позволяющих определить величину перемещения. Можно выделить угловые и линейные энкодеры. Угловой энкодер – устройство, преобразующее угол поворота вращающегося вала в электрические сигналы, позволяющие определить этот угол. Линейные энкодеры преобразуют в электрические сигналы линейное перемещение.

Энкодеры можно разделить на два типа:

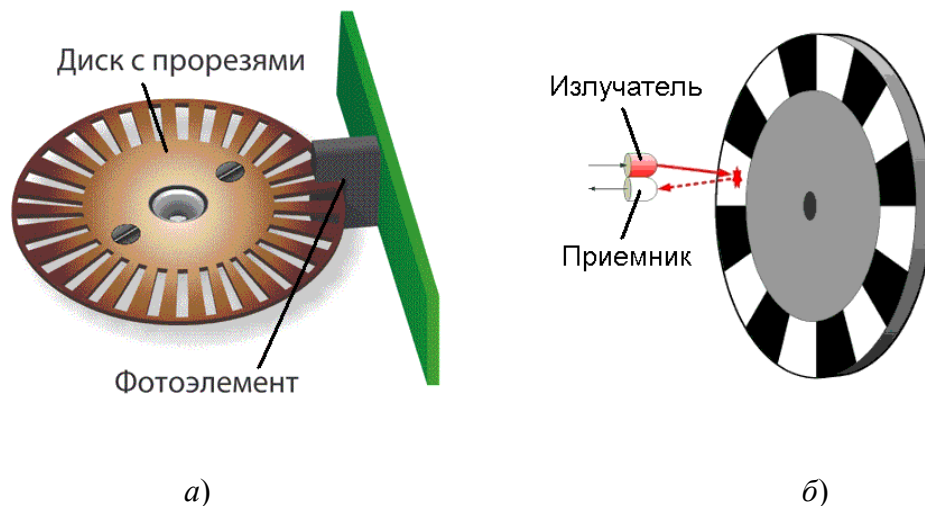
- абсолютные, позволяющие получить абсолютное значение угла поворота (например, переменный резистор);
- инкрементные, позволяющие определить угол поворота в ту или иную сторону относительно некоторого неизвестного начального положения.

Для определения абсолютного перемещения в мехатронных системах с инкрементными энкодерами применяют дополнительные датчики положения. Большинство используемых энкодеров являются инкрементными.

По принципу действия энкодеры подразделяются на:

- энкодеры с щеточными контактами;
- резисторные энкодеры (потенциометры);
- оптические энкодеры;
- магнитные энкодеры (на основе датчиков Холла);
- индуктивные энкодеры;
- емкостные энкодеры.

Широко распространены оптические инкрементные энкодеры на основе оптопар (фотоэлементов, см. рис. 1.18). Такие энкодеры работают по двум принципам: «на просвет» и «на отражение». В первом случае луч от источника света, направленный на фотоэлемент, периодически прерывается диском со специальными прорезями (или прозрачным диском с непрозрачными штрихами), вращающимся на валу, во втором – источник и приемник света находятся по одну сторону непрозрачного диска с областями с разной отражающей способностью. В обоих случаях фотоприемник фиксирует переход от одной области к другой и энкодер генерирует импульс, инкрементирующий «счетчик положения».



**Рис. 1.18. Схемы фотоэлектрических инкрементных энкодеров:**  
*a* – «на просвет»; *б* – «на отражение»

На рисунке 1.18 представлен самый простой вариант реализации энкодера – одиночный. Он имеет только один фотоэлемент (одну оптопару). К недостаткам такого энкодера относятся ошибки при подсчете импульсов на границах из-за возможных ложных срабатываний и невозможность определения направления вращения.

В сдвоенном (квадратурном) энкодере используются две оптопары, выходные сигналы которых сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ . Это позволяет определять направление вращения и распознать ложные срабатывания. Электрические сигналы таких преобразователей перемещения называют фазами А и В. К этим двум фазам добавляют третью фазу (R или Z), сигнализирующую о некотором фиксированном начальном положении вала. Примером квадратурных энкодеров могут служить датчики типа E30S, ЛИР-112.

Выходной сигнал квадратурных энкодеров может быть как синусоидальным, так и прямоугольным. В любом варианте реализации фазы сигналов сдвинуты на  $90^\circ$ . При вращении вала энкодера с прямоугольным выходным сигналом в одном направлении происходит последовательная смена сигналов  $U_A = 0, U_B = 0$ ;  $U_A = 1, U_B = 0$ ;  $U_A = 1, U_B = 1$ ;  $U_A = 0, U_B = 1$ ; а в другом –  $U_A = 0, U_B = 0$ ;  $U_A = 0, U_B = 1$ ;  $U_A = 1, U_B = 1$ ;  $U_A = 1, U_B = 0$ , где  $U_A$  и  $U_B$  – напряжения фаз А и В, соответственно. Эти сигналы можно непосредственно подавать на входы портов микроконтроллера и использовать в соответствующем алгоритме управления.

Кроме энкодеров применяются и другие преобразователи вращательного движения в электрические сигналы. Это, например, тахогенераторы, преобразующие частоту вращения вала в пропорциональное выходное напряжение. Их применение неоправданно ввиду присущей им мультипликативной погрешности, которая равна нулю при использовании энкодеров. Используются также сельсины и вращающиеся трансформаторы. *Сельсины* – это элементы синхронной связи, обеспечивающие одновременный поворот или одновременное вращение нескольких, механически не связанных между собой валов. *Вращающиеся трансформаторы* предназначены для получения переменного напряжения, находящегося в функциональной зависимости от угла поворота ротора и по сути являются одним из видов энкодеров. Получить более подробную информацию об этих типах датчиков углового перемещения можно из пособия [9].

#### 1.1.15. ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Недостатки коллекторных двигателей постоянного тока, обусловленные наличием щеточно-коллекторного узла (недостаточная надежность, высокая стоимость изготовления и эксплуатации, недопустимость работы в пожаро- и взрывоопасных средах), привели к необходимости создания двигателя постоянного тока без коллектора и щеток. Эти элементы в машине постоянного тока выполняют функцию механического переключателя (коммутатора). Благодаря широкому применению управляемых полупроводниковых приборов – тиристоров и транзисторов, появилась возможность создать на этих элементах полупроводниковый коммутатор, способный заменить щеточно-коллекторный узел в машинах постоянного тока. Эти полупроводниковые приборы работают в ключевом режиме [9].

Вентильный электродвигатель возможно было бы максимально приблизить по свойствам и принципу работы к электродвигателю постоянного тока, однако в ходе развития такого типа электроприводов более рациональным оказалось соединение синхронной машины с полупроводниковым коммутатором [9, 10].

При любой реализации вентильного электропривода обмотка якоря вместе с полупроводниковым коммутатором располагается на статоре машины, а индуктором является ротор. При этом на роторе размещаются полюсы, возбуждаемые по-

стоянными магнитами или обмоткой возбуждения через контактные кольца. В первом случае двигатель полностью лишен скользящих электрических контактов (бесконтактный двигатель) [10]. Кольца, так же, как и коллектор, соприкасаются со щетками, однако в них отсутствует коммутация, в результате чего они являются узлом, менее сложным в изготовлении и эксплуатации, чем коллектор.

Свойства вентильного двигателя зависят от способа управления полупроводниковыми элементами коммутатора. Если его работа не зависит от пространственного положения ротора двигателя, то вентильный двигатель по своим характеристикам в принципе не отличается от синхронного. Регулирование частоты вращения в таком двигателе выполняется изменением частоты питающего напряжения посредством статических преобразователей частоты. При этом переключение полупроводниковых элементов коммутатора не зависит от пространственного положения ротора двигателя и его частоты вращения. Такое управление называют частотным. Однако задача создания вентильных двигателей – получить бесконтактный двигатель постоянного тока со свойствами коллекторного двигателя. Это оказывается возможным лишь при позиционном управлении, когда последовательность и частота переключения полупроводниковых элементов коммутатора находятся в строгой зависимости от пространственного (углового) положения ротора относительно статора двигателя. В этом случае процесс переключения тока в катушках обмотки статора (якоря) вентильного двигателя происходит аналогично процессу коммутации в коллекторном двигателе постоянного тока. Механические характеристики вентильных двигателей с позиционным управлением мало отличаются от механических характеристик двигателей постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения [9]. Отличие заключается во взаимном расположении магнитных полей статора и ротора. В электродвигателях постоянного тока магнитные поля взаимно перпендикулярны (см. рис. 1.5), а в вентильных электроприводах на основе синхронного двигателя угол между ними изменяется в зависимости от нагрузки.

Кроме синхронных электродвигателей в вентильных электроприводах применяют индукторные шаговые электродвигатели. Синхронные и шаговые электродвигатели рассматриваются в следующем разделе текущей главы пособия, а подробнее ознакомиться с принципом работы вентильных электродвигателей можно в книгах [5, 9, 10].

## 1.2. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

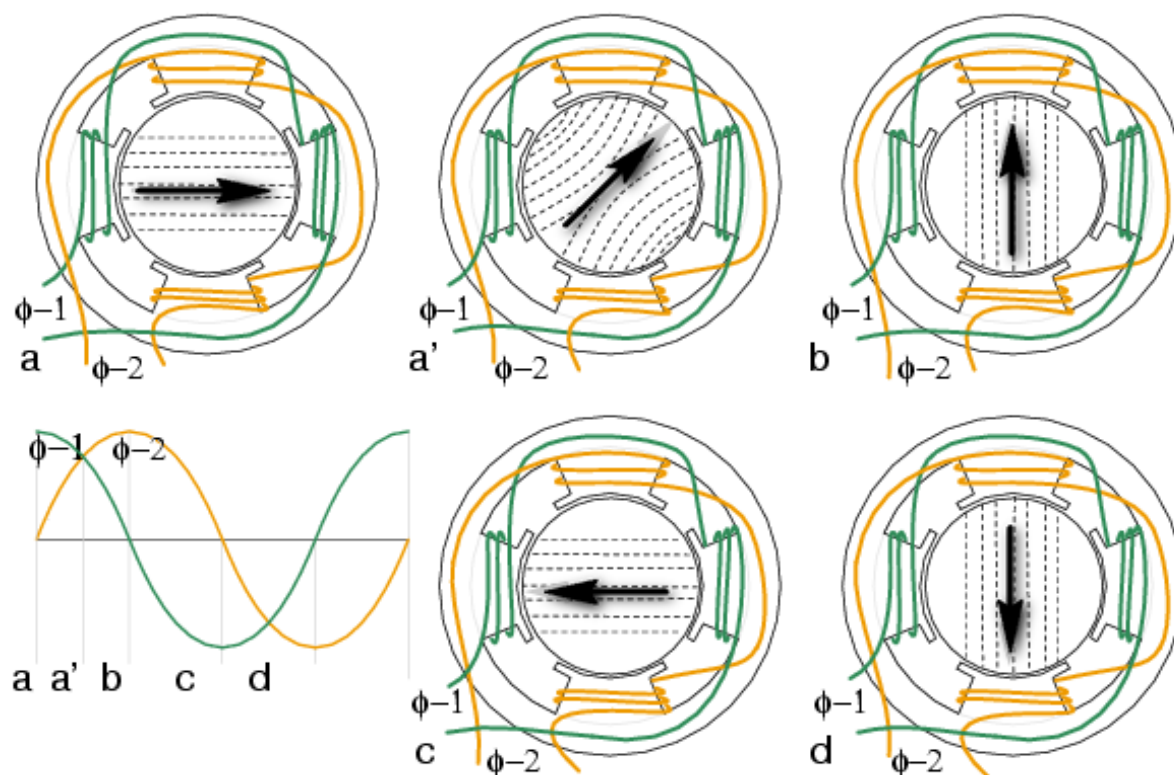
### 1.2.1 ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Свое название синхронные электрические машины (генераторы и электродвигатели) получили благодаря тому, что в них положение магнитопровода ротора всегда совпадает с силовыми линиями вращающегося магнитного поля, т.е. ротор вращается *синхронно* с полем.

Вращающееся магнитное поле можно получить в двух- и трехфазных системах, т.е. только при числе фаз, не меньшем двух. Разность фаз для двухфазных систем с двумя перпендикулярными электромагнитами должна составлять  $90^\circ$ , а для трехфазных с тремя электромагнитами, направленными под углом  $120^\circ$  друг к другу, –  $120^\circ$ . Применение большего числа фаз на практике нецелесообразно, так как при необходимости те же результаты достигаются меньшими средствами при увеличении числа пар полюсов. Так, в результате совпадения осей, четырехфазная система при формировании вращающегося магнитного поля ничем не отличается от двухфазной.

На рисунке 1.19 представлена схема получения вращающегося магнитного поля в двухфазной системе. Направления вектора индукции магнитного поля в роторе в различные моменты времени  $a \dots d$  показаны стрелкой. На графике приведены зависимости двух фаз  $\phi-1$  и  $\phi-2$  токов в обмотках статора электродвигателя от времени. Разность фаз составляет  $90^\circ$ . В момент времени  $a$  ток в обмотках фазы  $\phi-2$  отсутствует, поэтому магнитное поле формируется только обмотками фазы  $\phi-1$ . Допустим, его направление совпадает с указанным стрелкой. В момент времени  $c$ , когда ток в фазе  $\phi-1$  изменит свой знак, это направление изменится на противоположное. В момент времени  $a'$  токи в обеих фазах равны, вектор магнитной индукции в роторе занимает среднее положение между полями, создаваемыми обмотками отдельных фаз, т.е. повернется на  $45^\circ$ . Модуль векторной суммы индукции магнитных полей обмоток двух фаз равен модулю индукции обмоток отдельной фазы. С течением времени в момент  $b$  нулевым будет ток в обмотках фазы  $\phi-1$ , магнитное поле будет создаваться только обмотками фазы  $\phi-2$ , а его направление изменится еще на  $45^\circ$ . В дальнейшем вращение вектора магнитной

индукции в роторе будет продолжаться. Полный оборот совершается за один период тока в сети. Очевидно, что при питании синусоидальным напряжением с разностью фаз  $90^\circ$  и перпендикулярном расположении полюсов статора магнитное поле вращается равномерно, а модуль вектора магнитной индукции не меняется во времени.



**Рис. 1.19.** Схема получения вращающегося магнитного поля в двухфазной системе

Двухфазные электрические сети применялись в начале XX века, однако были вытеснены более эффективными трехфазными. Для трехфазной электрической сети требуются линии с меньшей массой проводов при том же самом напряжении и большей передаваемой мощности, в сравнении с двухфазной четырехпроводной системой. Трехфазная сеть создает меньше внешних магнитных полей. Эти преимущества трехфазной сети связаны с тем, что сумма токов всех фаз при симметричной нагрузке всегда равна нулю. Электрические машины переменного тока с расположением обмоток согласно рис. 1.19 широко применяются и в настоящее время. Это однофазные асинхронные электродвигатели, реверсивные электродвигатели систем автоматического регулирования.



Аналогично двухфазной системе трехфазная обмотка машины переменного тока создает круговое равномерно вращающееся магнитное поле только при одновременном выполнении трех условий:

- оси обмоток фаз сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ ;
- токи в обмотках фаз также сдвинуты на  $120^\circ$ ;
- ток (напряжение) сети изменяется по гармоническому закону.

Трехфазную обмотку статора в машинах переменного тока выполняют в виде трех групп катушек, смещенных в пространстве на  $120^\circ$ . На рисунке 1.20 показана обмотка статора, в которой все витки каждой фазы сосредоточены в одной катушке, лежащей в двух диаметрально расположенных пазах, где буквами  $A, B, C$  условно обозначены начала, а буквами  $X, Y, Z$  – соответствующие концы обмоток фаз. Обмотки могут быть соединены звездой или треугольником и подключаются к трехфазному источнику ЭДС. В случае недостатка знаний по трехфазным цепям переменного тока рекомендуем воспользоваться учебниками по электротехнике, например, [6].

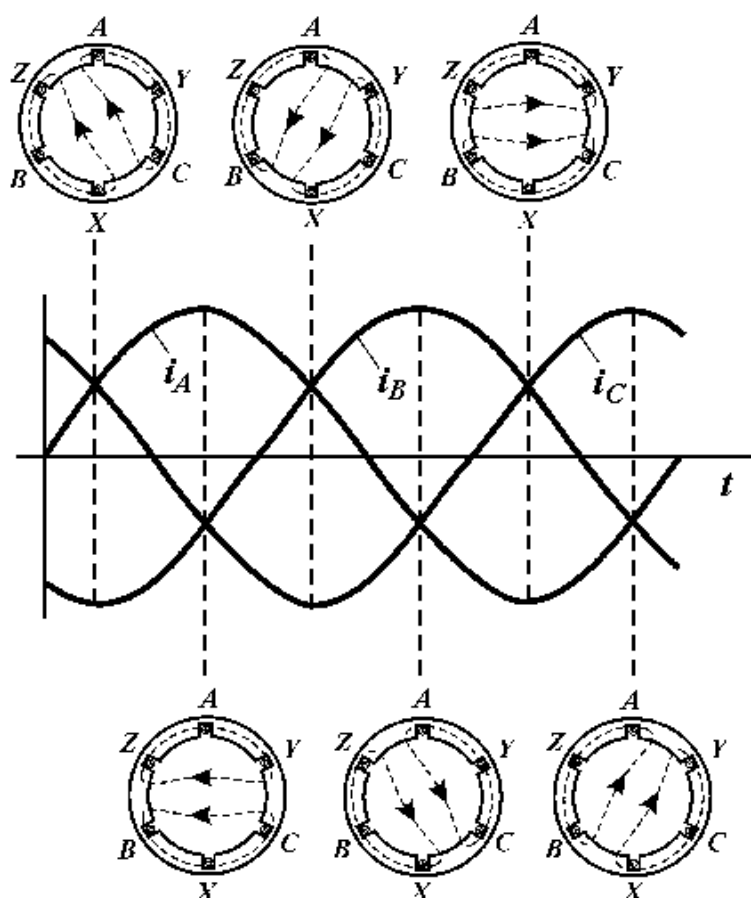


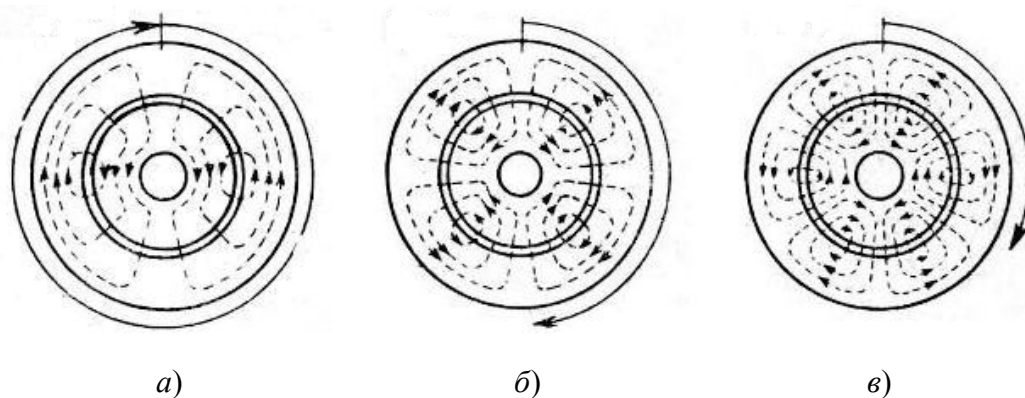
Рис. 1.20. Схема получения вращающегося магнитного поля в трехфазной системе

Вращение магнитного поля в трехфазной системе формируется аналогично тому, как это происходит в двухфазной. На рисунке 1.20 изображены схемы силовых линий магнитного поля статора в различные моменты времени, соответствующие временной диаграмме токов в фазах А, В и С.

### 1.2.2. ЧИСЛО ПАР ПОЛЮСОВ И ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ

Подобно магнитному полю машины постоянного тока, вращающееся поле может быть двухполюсным, четырехполюсным, шестиполюсным и т.д. Иначе говоря, машина переменного тока может иметь одну, две, три и более пар полюсов. Число пар полюсов вращающегося поля полностью определяется устройством создающей его обмотки статора. По прошествии одного периода изменения тока вращающееся поле оказывается переместившимся так, что картина его распределения в пространстве становится точно такой же, как и в начале этого периода.

На рисунке 1.21 изображены вращающиеся поля с одной, двумя и тремя парами полюсов. Рядом с ними дугообразными стрелками отмечены те углы, на которые надо повернуть картины этих полей для того, чтобы новое положение по распределению поля ничем не отличалось от исходного. В то время как двухполюсное поле надо повернуть для этой цели на полный оборот, четырехполюсное поле – только на половину оборота, а шестиполюсное – всего лишь на одну треть оборота. Поэтому частота вращения в синхронном электродвигателе с одной парой полюсов совпадает с частотой тока в сети, с двумя – в два раза, а с тремя – в три раза меньше последней.



**Рис. 1.21. Вращающиеся магнитные поля с различными числами пар полюсов:**

*a* – одной; *б* – двумя; *в* – тремя

Частота вращения магнитного поля носит еще название синхронной скорости. Этот термин применяют как для синхронных, так и для асинхронных машин переменного тока.

Синхронная скорость в оборотах в минуту для двигателя с одной парой полюсов, включенного в сеть частотой 50 Гц, составляет 3000 об/мин, с двумя – 1500 об/мин, с тремя – 1000 об/мин, с четырьмя – 750 об/мин. Следовательно, число пар полюсов можно определить непосредственно по документации на синхронный электродвигатель или шильдику (табличке с типом и основными параметрами), размещенным на его корпусе. Аналогично можно определить число пар полюсов и асинхронного электродвигателя с учетом того, что частоты вращения немного (не более чем на 5%) меньше указанных, так как асинхронные электродвигатели работают со *скольжением*.

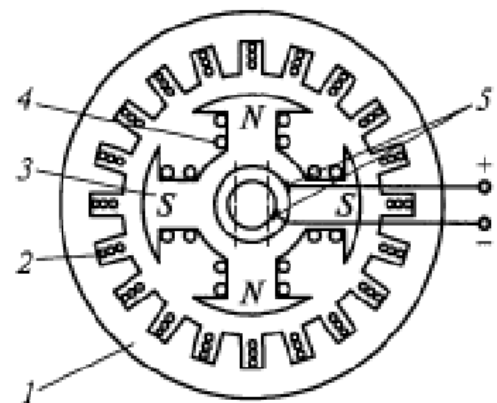
### 1.2.3 УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Устройство синхронных машин переменного тока противоположно устройству машин постоянного тока. По этой причине некоторые вентильные электродвигатели сложно однозначно отнести к тому или иному типу электрических машин. Синхронные машины также являются обратимыми, т.е. могут работать как в режиме генератора, так и в режиме электродвигателя. В них статор является якорем, а ротор – индуктором. Коммутация в синхронных машинах или не требуется, так как питание осуществляется от сети переменного тока, или реализуется в электронном блоке (в вентильных электродвигателях и сервоприводах).

Устройство магнитопровода статора синхронных и асинхронных машин одинаково (рис. 1.22). Статор представляет собой полый цилиндр 1, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. На внутренней поверхности этого цилиндра выштампованы пазы для укладки обмотки якоря 2. При внешнем диаметре менее 1 м его собирают из цельных кольцевых пластин, а при большем диаметре каждый кольцевой слой составляют из отдельных сегментов [11].

Ротор синхронной машины – это система постоянного тока, поэтому его магнитопровод может выполняться как массивным, выполненным из цельной поковки высокопрочной легированной стали, так и шихтованным, набранным из от-

дельных пластин подобно статору. Обмотка 4 ротора, питающаяся от источника постоянного тока, является однофазной и называется обмоткой возбуждения. При подключении этой обмотки к источнику двигатель возбуждается – в нем наводится магнитное поле. Для подвода электрической энергии к обмотке возбуждения используют кольца 5 со щетками. Такой вариант подвода энергии к движущимся частям машины значительно более надежен, чем коллекторно-щеточный узел, так как здесь отсутствует непрерывная коммутация обмоток и протекает постоянный ток, а не импульсный.



**Рис. 1.22. Конструктивная схема синхронной машины:**

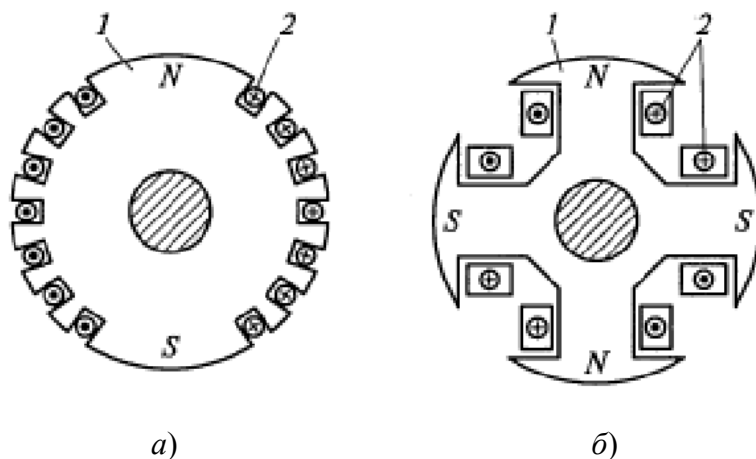
1 – якорь; 2 – обмотка якоря;  
3 – полюсы индуктора; 4 – обмотка возбуждения; 5 – контактные кольца со щетками

Для работы синхронного двигателя, помимо трехфазного переменного тока, требуется еще и постоянный ток. Исключение составляют синхронные двигатели, возбуждаемые постоянными магнитами. Но обычно это двигатели малой мощности. В качестве источника постоянного тока в современных синхронных двигателях с электромагнитным возбуждением обычно используется тиристорный возбудитель (тиристорный управляемый выпрямитель) [9].

В зависимости от конструкции магнитопровода ротора синхронные машины делятся на четыре класса:

- явнополюсные;
- неявнополюсные;
- возбуждаемые постоянными магнитами;
- реактивные.

Ротор явнополюсных синхронных машин имеет выступающие полюсы (рис. 1.22, рис. 1.23, б). Магнитопроводы полюсов для машин большой мощности шихтуются из пластин конструкционной стали толщиной 1...2 мм, а для машин небольшой мощности – из пластин электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм [9].



**Рис. 1.23. Поперечные разрезы роторов неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) синхронных машин:**

*1* – магнитопровод; *2* – обмотка возбуждения

На полюсах ротора часто устанавливают демпферную обмотку, размещая ее в пазах полюсных наконечников. Медные или латунные стержни этой обмотки по торцам замыкают сегментами таким образом, чтобы образовалась короткозамкнутая клетка. Демпферная обмотка выполняет ряд функций. В генераторах она ослабляет влияние токов обратной последовательности при несимметричной нагрузке и уменьшает пульсации магнитного потока, вызванные зубчатостью статора. В двигателях она выполняет функции пусковой (при асинхронном пуске) и успокоительной (уменьшает амплитуду качаний ротора при изменении нагрузки) обмотки [9].

Неявнополюсные роторы (рис. 1.23, а) применяют в высокоскоростных (1500 или 3000 об/мин) синхронных машинах большой мощности, так как при большой мощности применение машин явнополюсной конструкции невозможно по условиям механической прочности ротора. Неявнополюсные роторы имеют быстроходные синхронные двигатели большой мощности – турбодвигатели и синхронные неявнополюсные генераторы, предназначенные для непосредственного соединения с паровыми и газовыми турбинами – турбогенераторы [9].

Неявнополюсный ротор изготавливают из цельной поковки высокопрочной стали. По условиям сохранения механической прочности ротора его диаметр при частоте вращения 3000 об/мин не должен превышать 1200...1250 мм. На наружной поверхности ротора фрезеруют прямоугольные пазы, в которые укладывают об-

мотку возбуждения (см. рис. 1.23, *a*). Примерно на одной трети полюсного деления обмотку не укладывают, и эта часть образует так называемый большой зубец, через который проходит основная часть магнитного потока возбуждения [9].

Синхронные машины большой и средней мощности, а также большинство машин малой мощности имеют электромагнитное возбуждение. Однако по мере совершенствования магнитотвердых материалов для возбуждения синхронных машин все шире применяются постоянные магниты.

Явнополюсная синхронная машина развивает момент даже при отсутствии тока возбуждения – за счет реактивного момента (см. рис. 1.25). Это свойство синхронной машины легло в основу создания синхронных электроприводов без возбуждения на базе синхронных реактивных двигателей [8].

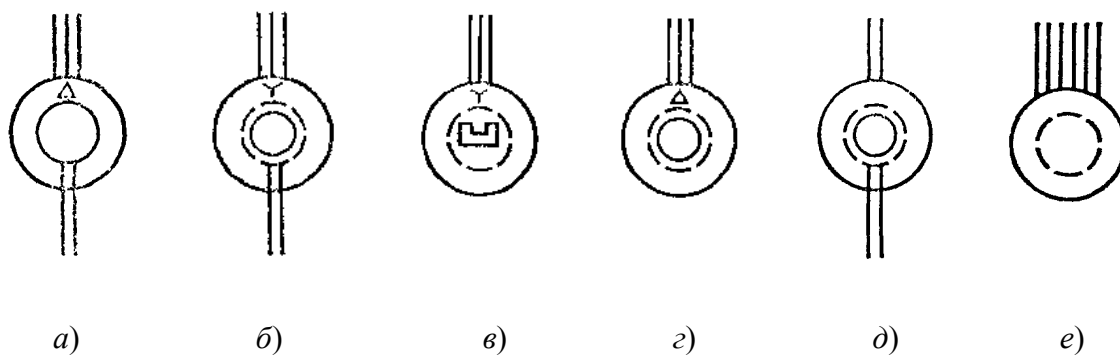
Система электромагнитного возбуждения должна обеспечивать достаточно быстрое, надежное и устойчивое регулирование тока возбуждения в любых режимах работы машины. Для увеличения быстродействия регулирования в аварийных режимах работы применяется форсировка возбуждения, т.е. быстрое увеличение напряжения возбуждения до предельного значения, равного 1,8...2,0 номинального напряжения возбуждения. Кроме того, система возбуждения должна обеспечивать быстрое гашение магнитного поля, т.е. уменьшение тока возбуждения до нуля без значительных перенапряжений на обмотках. Необходимость в гашении поля возникает при аварийном отключении машины или обнаружении повреждения в ней [9].

В синхронных машинах применяется несколько систем возбуждения. Простейшей из них является электромашинная система, в которой в качестве источника возбуждения используют специальный генератор постоянного тока, называемый возбудителем, вал которого приводится во вращение от вала синхронной машины [9].

В настоящее время все большее применение получают вентильные системы возбуждения, которые могут рассчитываться на большие мощности и являются при этом более надежными, чем электромашинные. Для синхронных генераторов различают три вида вентильных систем возбуждения: систему с самовозбуждением; независимую систему возбуждения; бесщеточную систему возбуждения [9].

В последнее время синхронные двигатели мощностью от 30 до 200 кВт стали исполняться бесконтактными с обмоткой возбуждения, специальным образом располагаемой на статоре вместе с трехфазной обмоткой. Ротор в этом случае представляет собой безобмоточное зубчатое колесо, через которое замыкается магнитный поток, создаваемый обмотками возбуждения и переменного тока. Вращается он синхронно с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой. Обмотка возбуждения усиливает магнитный поток и тем самым увеличивает вращающий момент двигателя [5].

На рисунке 1.24 представлены упрощенные условные графические обозначения синхронных электрических машин [15]. На рисунке 1.24, *a* – *г* показаны обозначения трехфазных синхронных электрических машин. Знаками « $\Delta$ » и « $Y$ » показано соединение трехфазных обмоток в треугольник или звезду, соответственно [6]. На рисунке 1.24, *д* показано обозначение однофазной явнополюсной машины с обмоткой возбуждения и успокоительной или пусковой обмоткой на роторе, на рис. 1.24, *e* – индукторной машины с двумя обмотками переменного тока и одной обмоткой постоянного тока на статоре. Короткозамкнутая обмотка обозначается кольцом, к которому не подключены провода, неявнополюсная обмотка возбуждения – кольцом, к которому подсоединены два провода, подводящие постоянное напряжение, явнополюсная – кольцом, выполненным штриховыми линиями. Так, на рис. 1.24, *б* приведен пример обозначения синхронной машины с явнополюсной обмоткой возбуждения и с пусковой короткозамкнутой обмоткой, на рис. 1.24, *в* – синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов.



**Рис. 1.24. Упрощенные условные графические обозначения синхронных электрических машин**

## 1.2.4. РАБОТА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Без учета подробностей принцип работы синхронного электродвигателя довольно прост. Статор, подключенный к цепи переменного тока, создает вращающееся магнитное поле (см. пп. 1.2.1, 1.2.2), а ротор непрерывно поворачивается так, чтобы его магнитное поле совпадало с полем статора.

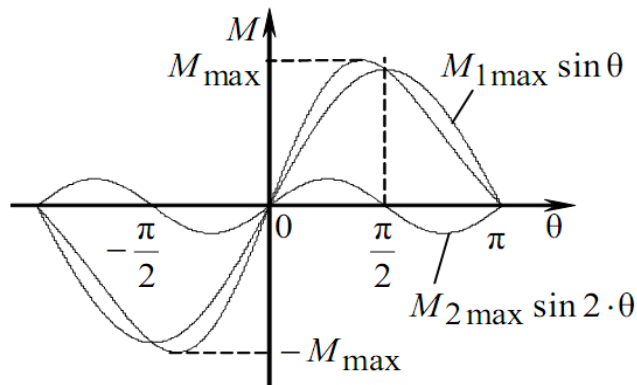
Для более глубокого понимания процессов, происходящих при работе синхронного электродвигателя, сравним его с двигателями постоянного тока.

В отличие от всех других двигателей, синхронные имеют абсолютно жесткую механическую характеристику (см. рис. 1.2, б, линия 1). Частота вращения ротора всегда совпадает с частотой вращения магнитного поля статора независимо от момента нагрузки на валу. Уменьшение частоты вращения до нуля (выпадение из синхронизма) возможно при превышении моментом критического значения. При этом возникают недопустимые колебания тока и вращающего момента, двигатель необходимо отключить от сети.

Несмотря на постоянство частоты вращения при изменении нагрузки на валу синхронного двигателя в его работе происходят изменения – меняется *внутренний угол поворота ротора*  $\theta$ , т.е. угол сдвига между осью магнитного поля, созданного обмотками статора синхронного двигателя, и осью его полюсов, т.е. магнитного поля ротора. Другая интерпретация внутреннего угла поворота ротора – это угол сдвига между вектором ЭДС, наводимой ротором в обмотках статора, и вектором фазного напряжения питающей сети. Для синхронных машин вместо механической характеристики для количественного определения изменений, происходящих в их работе при изменении момента, удобно использовать *угловую характеристику* – зависимость  $M(\theta)$  момента на валу от внутреннего угла поворота.

Электромагнитный момент синхронной явнополюсной машины состоит из двух составляющих, первая из которых представляет электромагнитный момент  $M_1$ , возникающий в результате взаимодействия полей статора и ротора, а вторая – реактивный момент  $M_2$ , возникающий из-за несимметрии магнитной цепи машины и связанного с ней стремления ротора ориентироваться по оси поля статора. Угловая характеристика  $M(\theta)$  синхронной машины с явнополюсным ротором приведена на рис. 1.25. Ее анализ показывает, что увеличение угла  $\theta$  на начальном участке вызывает рост электромагнитного момента, близкий к линейному. При номинальном электромагнитном моменте угол  $\theta$  обычно составляет 20...30° [8].





**Рис. 1.25.** Угловая характеристика явнополюсного синхронного двигателя

Неявнополюсный синхронный электродвигатель не имеет выраженных полюсов, следовательно, в нем не формируется реактивный момент  $M_2$ . Поэтому максимального значения момент неявнополюсного синхронного двигателя достигает при внутреннем угле поворота ротора  $\theta = \pi/2$ . При больших значениях угла синхронный двигатель выпадает из синхронизма.

При угле  $\theta = 0$  магнитные поля ротора и статора совпадают, нет движущей силы, которая стремится повернуть ротор, поэтому вращающий момент равен нулю. Достижение моментом  $M_2$  максимального значения при угле  $\theta = \pi/2$  становится понятным, если обратиться к рис. 1.5. Это угол максимального рассогласования направлений полей ротора и статора. В электродвигателях постоянного тока он за счет коллекторно-щеточного узла всегда поддерживается равным  $\pi/2$ .

Максимальный момент  $M_{\max}$  характеризует перегрузочную способность синхронного двигателя. Перегрузочная способность синхронной машины с явнополюсным ротором, т.е. отношение максимального момента к номинальному, составляет 2...3.

Синхронные электрические машины являются обратимыми, поэтому они так же, как и машины постоянного тока непрерывно работают и как генераторы, и как электродвигатели. Если сравнить электрические машины постоянного тока с синхронными, то можно прийти к следующим выводам:

- в машинах постоянного тока постоянен угол сдвига магнитных полей статора и ротора, изменяется скорость вращения, ЭДС, индуцируемая в якоре индуктором, постоянна по направлению, но по модулю зависит от скорости вращения;

– в синхронных машинах угол сдвига магнитных полей изменяется при неизменной скорости вращения, ЭДС, индуцируемая в якоре индуктором, постоянна по модулю, но ее направление зависит от внутреннего угла поворота ротора  $\theta$ .

Реакцией на появление нагрузки на валу в двигателе постоянного тока является снижение скорости, обеспечивающее уменьшение ЭДС индукции, появление тока якоря и формирование вращающего момента (см. п. 1.1.3), в синхронном двигателе – отклонение угла  $\theta$  от нулевого значения, обеспечивающее возникновение вращающего момента. Увеличение потребления тока при увеличении нагрузки на валу в двигателе постоянного тока происходит за счет снижения уменьшения ЭДС индукции относительно напряжения питания, в синхронных электродвигателях – за счет сдвига фазы ЭДС индукции относительно фазы напряжения питания. На холостом ходу в синхронном двигателе ЭДС индукции почти совпадает по фазе с напряжением питания и равна ей по модулю, поэтому двигатель почти не потребляет энергии.

В современных условиях, когда наиболее перспективным является использование вентильного электродвигателя, конструкция электродвигателя постоянного тока может быть подобна конструкции синхронного электродвигателя. При этом вентильный электродвигатель с позиционным управлением по характеристикам соответствует двигателю постоянного тока, а двигатель с частотным управлением – синхронному (см. п. 1.1.15). Все большее распространение находят сервоприводы на базе синхронных и шаговых электродвигателей с частотным управлением. Такие приводы широко применяются в микромехатронных системах бытовой техники и персональных компьютеров.

#### 1.2.5. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

По сравнению с асинхронными двигателями синхронные имеют более сложную конструкцию и, следовательно, их стоимость выше. Однако эти двигатели обладают способностью оказывать энергосберегающее влияние на участке электрической сети, в котором они работают. Дело в том, что если у работающего синхронного двигателя постепенно увеличивать ток в обмотке возбуждения, то

будет уменьшаться реактивная (индуктивная) составляющая тока статора. В результате будет уменьшаться угол фазового сдвига между током статора двигателя и напряжением сети. При некотором значении тока в обмотке возбуждения синхронного двигателя реактивная составляющая тока статора уменьшится до нуля, ток статора станет чисто активным и коэффициент мощности синхронного двигателя  $\cos\varphi = 1$ . Если продолжать увеличение тока возбуждения (перевозбуждать двигатель), то реактивная составляющая тока статора вновь появится, но теперь она будет опережать по фазе напряжение, т.е. станет емкостной [9].

Асинхронные двигатели, трансформаторы и другие виды электромагнитных нагрузок создают в цепях переменного тока значительные индуктивные токи. Это приводит к снижению коэффициента мощности участка сети, в который включены эти устройства. В результате сила тока на этом участке сети увеличивается (за счет индуктивной составляющей), а потери, величина которых пропорциональна квадрату тока, возрастает. Включение в цепь с индуктивной нагрузкой синхронного электродвигателя с емкостной нагрузкой позволяет частично или полностью скомпенсировать реактивную составляющую тока потребления и снизить потери.

В некоторых случаях для повышения коэффициента мощности в сети применяют синхронные компенсаторы СК, представляющие собой перевозбужденные синхронные двигатели специальной конструкции, работающие без нагрузки на валу. Синхронный компенсатор фактически используется как генератор реактивной мощности. Применяют синхронные компенсаторы для повышения коэффициента мощности (для уменьшения потерь мощности) на участках сетей со значительной электромагнитной нагрузкой (например, сети крупного промышленного предприятия с большим количеством трансформаторов и асинхронных двигателей), так как мощность изготавливаемых синхронных компенсаторов значительна и составляет от 16 до 160 МВ·А. Обычно коэффициент мощности повышают до значений, близких к единице, например до 0,95, что дает значительный эффект энергосбережения. Стремление увеличить коэффициент мощности до  $\cos\varphi = 1$  ведет к значительному росту требуемой мощности синхронного компенсатора, и следовательно, капитальных затрат. Например, для повышения  $\cos\varphi$  с 0,7 до 0,95 при мощности потребителя 100 МВ·А требуется синхронный компен-

сатор мощностью 31 МВ·А. Для доведения коэффициента мощности этой сети до  $\cos\varphi = 1$  требуется синхронный компенсатор мощностью 55 МВ·А, что в 1,8 раза больше [9].

Вращающий момент на валу синхронного электродвигателя пропорционален напряжению сети в первой степени, в то время как момент асинхронного электродвигателя пропорционален его квадрату. Это обуславливает более надежную работу синхронных двигателей при снижении напряжения питания. Кроме того, синхронный электродвигатель имеет возможность компенсации снижения напряжения питания статора путем увеличения тока возбуждения ротора.

К другим достоинствам синхронных электродвигателей относятся:

- современные синхронные двигатели имеют высокий КПД, составляющий 96 – 98%, что на 1–2% выше КПД асинхронных двигателей той же мощности;
- синхронный двигатель обладает абсолютно жесткой механической характеристикой, что позволяет стабилизировать частоту вращения и определять пройденное угловое перемещение без применения датчиков положения;
- большой воздушный зазор в синхронных двигателях обеспечивает простоту охлаждения внешним вентилятором;
- особенности конструкции синхронных двигателей позволяют изготавливать их на мощности в десятки мегаватт.

Синхронные машины наиболее перспективные электромеханические преобразователи энергии, и их применение в сервоприводах мехатронных систем непрерывно расширяется.

К недостаткам синхронных двигателей следует отнести сложность конструкции ротора по сравнению с асинхронными двигателями и сложность пуска.

Кроме того, к недостаткам синхронных двигателей следует отнести сложность переходных процессов при изменении нагрузки на валу. Угловая характеристика, представленная на рис. 1.25, на начальном участке по сути является графиком зависимости момента упругого элемента от угла закручивания, т.е. ротор двигателя, обладающей моментом инерции, ведет себя как маятник на спиральной пружине. Эта особенность обуславливает высокую степень колебательности переходных процессов и сложность управления двигателем. Для уменьшения колебаний ротора применяют короткозамкнутую успокоительную обмотку, укладываемую в его пазах.

### 1.2.6. ПУСК И ТОРМОЖЕНИЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В отличие от асинхронных синхронные двигатели при включении в сеть не создают пускового момента, так как ротор двигателя по причине своей инерционности не может мгновенно достичь синхронной скорости вращения. Поэтому при пуске синхронного двигателя между полюсами возбужденного неподвижного ротора и вращающимся полем статора не появляется устойчивой магнитной связи, необходимой для возникновения пускового момента.

Для пуска синхронного двигателя необходимо предварительно привести его ротор во вращение до скорости, близкой (95%) к синхронной. Существует два способа пуска синхронных двигателей.

Синхронный пуск осуществляется с помощью дополнительного разгонного двигателя, находящегося на одном валу с ротором СД, который заставляет ротор вращаться. Этот способ используется только при холостом ходе синхронного двигателя и в настоящее время почти не применяется.

Наиболее удобен асинхронный пуск синхронных электродвигателей. Для этого при явнополюсном роторе в полюсные наконечники закладывается короткозамкнутая пусковая обмотка из медных или латунных стержней. Она напоминает беличье колесо асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора.

Асинхронный пуск двигателя состоит из двух этапов: асинхронный набор частоты вращения при отсутствии возбуждения постоянным током и втягивание в синхронизм после включения постоянного тока возбуждения. Во время первого этапа обмотку возбуждения отключают от источника постоянного тока и замыкают на резистор сопротивлением в 6...10 раз выше сопротивления обмотки возбуждения. Это необходимо в связи с тем, что в разомкнутой обмотке может индуцироваться значительная ЭДС, опасная для целостности изоляции. Двигатель становится как бы асинхронным (см. раздел 1.3), и под действием асинхронного момента скорость ротора удается довести примерно до 95% синхронной. После того, как ротор разогнался, обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. Возникает синхронный электромагнитный момент, машина втягивается в синхронизм, т.е. ротор и поле статора вращаются синхронно [6, 8 – 11].

Торможение синхронного двигателя возможно переводом его в генераторный режим с применением динамического торможения. В этом случае обмотку статора двигателя отключают от сети и замыкают на резисторы. Ротор, вращаясь по инерции, своим магнитным потоком индуцирует в обмотке статора ЭДС. Так как эта обмотка замкнута, то в ней появляются токи, величина которых ограничивается сопротивлением резисторов. Возникающий при этом на роторе электромагнитный момент, как и в любом генераторе, является тормозящим и способствует быстрой остановке ротора [9].

### 1.2.7. ШАГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Одним из видов синхронных электродвигателей являются шаговые. Такое название они получили благодаря тому, что их вал обычно совершает дискретное перемещение на заданный угол (шаг) под действием управляющих импульсов, подаваемых на обмотки статора. Эти двигатели являются синхронными благодаря тому, что ротор отслеживает магнитное поле, создаваемое обмотками. В результате этого шаговые двигатели позволяют без применения датчиков положения обеспечить точное позиционирование вала и рабочего органа путем подачи заданного числа импульсов. Этим и обусловлено их широкое применение в механических устройствах различного размера и назначения: от микромехатронных устройств бытового назначения (CD-ROM, принтеры) до промышленных станков.

К достоинствам шаговых двигателей следует отнести:

- высокую точность до 3% от величины шага при 200 шагах на оборот;
- отсутствие мультипликативной погрешности позиционирования;
- возможность быстрого старта, остановки или реверсирования;
- возможность получения низких скоростей вращения без редуктора;
- высокая надежность и безопасность, связанная с отсутствием щеток.

Недостатками шаговых двигателей являются:

- шаговым двигателям, как и другим синхронным, присуще явление резонанса (см. п. 1.2.5);
- возможна потеря контроля положения при работе без обратной связи, связанная, например, с превышением максимально допустимого момента нагрузки на валу;

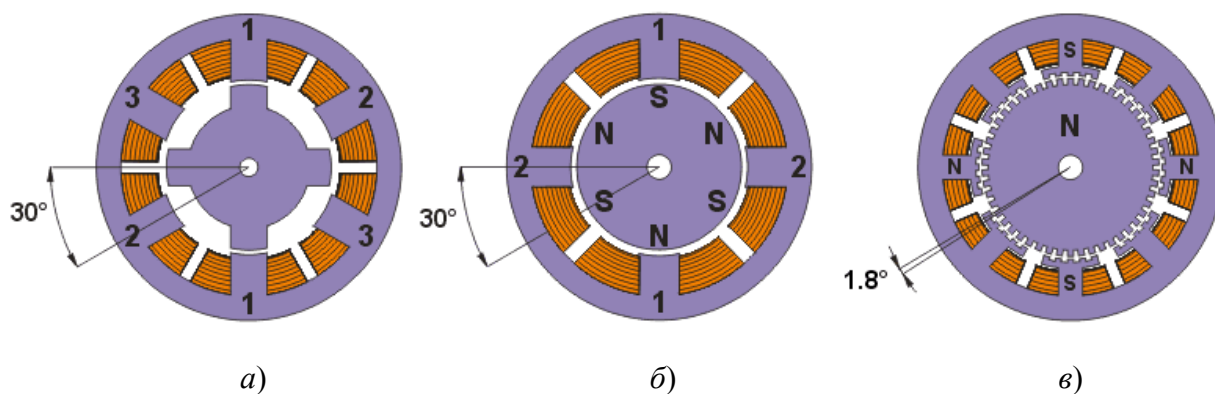
- без нагрузки в режиме торможения потребление энергии не меньше, чем при совершении работы;
- затруднена работа на высоких скоростях;
- невысокая удельная мощность;
- относительно сложная схема управления.

Существование подобных недостатков приводит к необходимости использования сервоприводов с энкодерами (см. пп. 1.1.14, 1.1.15) вместо шаговых двигателей. Системы с обратной связью способны работать с большими ускорениями и при переменном характере нагрузки. Если нагрузка шагового двигателя превысит его момент, то информация о положении ротора теряется и система требует базирования с помощью, например, концевого выключателя или другого датчика. Системы с обратной связью не имеют подобного недостатка.

При проектировании конкретных систем приходится делать выбор между сервомотором и шаговым двигателем. Когда требуется прецизионное позиционирование и точное управление скоростью, а требуемый момент и скорость не выходят за допустимые пределы, то шаговый двигатель является наиболее экономичным решением. Как и для обычных двигателей, для повышения момента может быть использован понижающий редуктор. Однако для шаговых двигателей редуктор не всегда подходит. В отличие от коллекторных двигателей, у которых момент растет с увеличением скорости, шаговый двигатель имеет больший момент на низких скоростях. К тому же, шаговые двигатели имеют гораздо меньшую максимальную скорость по сравнению с коллекторными двигателями, что ограничивает максимальное передаточное число и, соответственно, увеличение момента с помощью редуктора. Готовые шаговые двигатели с редукторами хотя и существуют, однако являются экзотикой. Еще одним фактом, ограничивающим применение редуктора, является присущий ему люфт. Коллекторный двигатель имеет более высокую удельную мощность, низкую стоимость, простую схему управления, и вместе с одноступенчатым червячным редуктором он способен обеспечить тот же диапазон скоростей, что и шаговый двигатель. К тому же, при этом обеспечивается значительно больший момент [16].

Явнополюсный ротор шагового двигателя может быть активным или реактивным. Активный ротор шагового двигателя имеет обмотку возбуждения посто-

янного тока, контактные кольца и щетки или же выполняется в виде постоянного магнита с полюсами чередующейся полярности. Реактивный ротор выполняется без обмотки возбуждения с явно выраженными немагнитными полюсами. Число полюсов ротора в два раза меньше числа полюсов статора [9]. Также отдельно можно выделить гибридные двигатели, являющиеся разновидностью двигателей с активным ротором (см. рис. 1.26) [16].



**Рис. 1.26. Схемы шаговых электродвигателей различных типов:**  
*а* – с реактивным ротором; *б* – с активным ротором; *в* – гибридный

Определить тип двигателя можно внешним осмотром. При вращении вала обесточенного двигателя с постоянными магнитами (или гибридного) чувствуется переменное сопротивление вращению, двигатель вращается как бы щелчками. Вал обесточенных двигателей с реактивным ротором и двигателей с обмотками возбуждения вращается свободно. У двигателя с реактивным ротором нет выводов обмотки возбуждения, но обычно он имеет три (реже четыре) обмотки с одним общим выводом. Двигатели с активным ротором могут иметь обмотку возбуждения и чаще всего имеют две независимые обмотки статора. Эти обмотки могут быть снабжены отводом от середины. Иногда двигатели с активным ротором имеют 4 отдельных обмотки [16].

Шаговые двигатели с реактивным ротором имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала (рис. 1.26, *а*). Немагнитность ротора отсутствует. На рисунке 1.26, *а* ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг  $30^\circ$  [16].



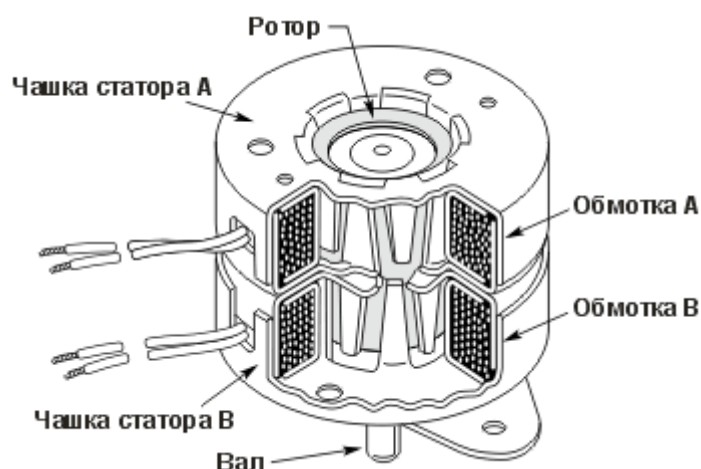
При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток. Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькие значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с реактивным ротором довольно редко используют в промышленных применениях [16].

Двигатели с активным ротором состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 1.26, б). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с реактивным ротором [16].

На рисунке 1.26, б двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет величину шага  $30^\circ$ . При протекании тока в одной из катушек ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 24 или 48 шагов на оборот ( $15^\circ$  или  $7,5^\circ$ ). Для примера на рис. 1.27 показан разрез реального шагового двигателя с постоянными магнитами [16].

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. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит.



**Рис. 1.27. Разрез шагового двигателя с постоянными магнитами**

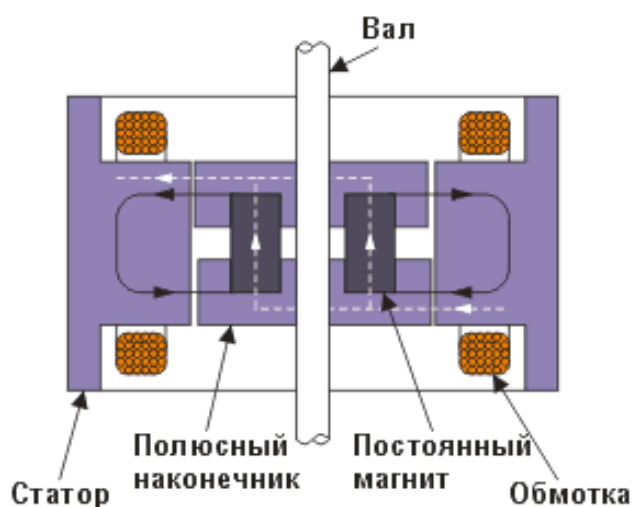
Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с реактивным ротором [16].

Гибридные двигатели являются дальнейшим усовершенствованием двигателей с постоянными магнитами и по способу управления ничем от них не отличаются. Они дороже, чем двигатели с постоянными магнитами, но обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага  $3,6 \dots 0,9^\circ$ ). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с реактивным ротором и двигателей с постоянными магнитами. Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными [16].

Ротор гибридного двигателя имеет зубцы и разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит (рис. 1.26, в). Таким образом, зубцы одной части ротора являются северными полюсами, а зубцы другой – южными. Верхняя и нижняя части ротора повернуты друг относительно друга по оси на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отли-

чие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для шага  $3,6^\circ$  и 8 основных полюсов для шага  $1,8 \dots 0,9^\circ$ . Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними. Ротор показанного на рис. 1.26, в двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг  $1,8^\circ$  [16].

Продольный разрез гибридного шагового двигателя показан на рис. 1.28. Стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока (на рисунке показана сплошной черной линией) проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента [16].



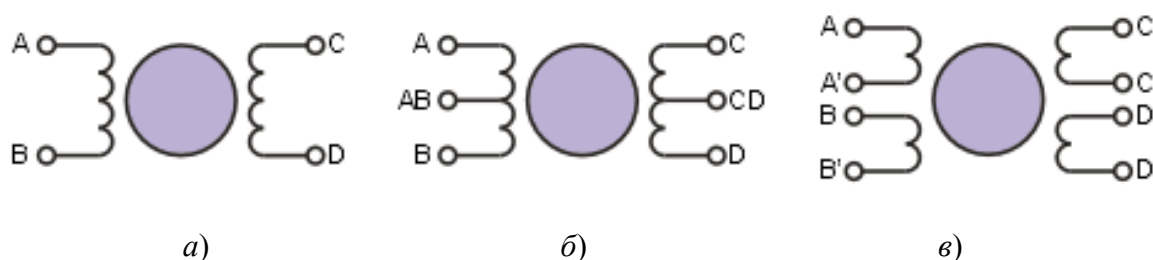
**Рис. 1.28. Продольный разрез гибридного шагового двигателя**

Воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубьев. Существует вторая магнитная цепь, которая обладает минимальными воздушными зазорами и минимальным магнитным сопротивлением. По этой цепи замыкается другая часть потока (на рисунке показана штриховой белой линией), которая и создает момент. Таким же образом создают магнитный поток катушки статора.

Величина зазора между зубцами ротора и статора очень небольшая – типично 0,1 мм, что требует высокой точности при сборке. Чтобы магнитный поток не замыкался через вал, который проходит внутри магнита, его иногда изготавливают из немагнитных марок стали [16].

Для получения больших моментов необходимо увеличивать как поле, создаваемое статором, так и поле постоянного магнита. При этом требуется больший диаметр ротора, что уменьшает отношение крутящего момента к моменту инерции. Поэтому мощные шаговые двигатели иногда конструктивно выполняют из нескольких секций в виде этажерки. Крутящий момент и момент инерции увеличиваются пропорционально количеству секций, а их отношение не уменьшается. Существуют и другие конструкции шаговых двигателей. Например, двигатели с дисковым намагниченным ротором. Такие двигатели имеют малый момент инерции ротора, что в ряде случаев важно [16].

В зависимости от конфигурации обмоток шаговые двигатели делятся на биполярные и униполярные (рис. 1.29). Биполярный двигатель имеет одну обмотку в каждой фазе, полярность включения которой необходимо изменять для изменения направления магнитного поля. Для обмоток такого типа двигателя требуется мостовая схема включения (см. рис. 1.14). Биполярный двигатель имеет две обмотки и четыре вывода (рис. 1.29, *a*) [16].



**Рис. 1.29. Обмотки шаговых двигателей:**

*a* – биполярного; *б* – униполярного; *в* – четырехобмоточного

Униполярный двигатель также имеет одну обмотку в каждой фазе, но от середины обмотки сделан отвод (рис. 1.29, *б*). Это позволяет изменять направление магнитного поля, создаваемого обмоткой, переключением половинок обмотки. При этом существенно упрощается схема включения двигателя. Концы *A*, *B*, *C* и *D*

обмоток подключаются к выходам транзисторных ключей (см. п. 1.1.12), соединяющих их, например, с минусом источника питания, а средние точки  $AB$  и  $CD$  соединяются вместе и подключаются к противоположному полюсу (плюсу). Средние точки обмоток могут быть объединены внутри двигателя, поэтому такой двигатель может иметь 5 или 6 выводов. Иногда униполярные двигатели имеют отдельные 4 обмотки, по этой причине их ошибочно называют четырехфазными двигателями. Каждая обмотка имеет отдельные выводы, поэтому всего выводов 8 (рис. 1.29, в). При соответствующем соединении обмоток такой двигатель можно использовать как униполярный или как биполярный. Униполярный двигатель с двумя обмотками и отводами также можно использовать в биполярном режиме, если отводы оставить неподключенными. В любом случае ток обмоток следует выбирать так, чтобы не превысить максимальной рассеиваемой мощности [16].

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 активных 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 сопротивление – соответственно вдвое меньше. Это позволяет увеличить ток в 1,41 раза при тех же потерях, что дает выигрыш в моменте примерно 40%. Если же повышенного момента не требуется, биполярный двигатель позволяет уменьшить габариты или просто работать с меньшими потерями. На практике все же часто применяют униполярные двигатели, так как они требуют значительно

более простых схем управления обмотками. Это важно, если они 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. Например, это микросхемы L293E, L298N или L6202 фирмы SGS-Thomson, PBL3770, PBL3774 фирмы Ericsson, NJM3717, NJM3770, NJM3774 фирмы JRC, A3957 фирмы Allegro, LMD18T245 фирмы National Semiconductor [16].

Существует несколько способов управления шаговыми двигателями:

- одношаговый или полношаговый с включением одной фазы («one phase on» full step или wave drive mode);
- полношаговый или полношаговый с включением двух фаз («two-phase-on» full step или просто full step mode);
- полушаговый («one and two-phase-on» half step или просто half step mode);
- микрошаговый (micro stepping mode).

На рисунке 1.30 представлены временные диаграммы работы шагового двигателя в различных режимах. Все способы управления могут быть реализованы как на биполярном, так и на униполярном двигателях. Графики показывают ди-

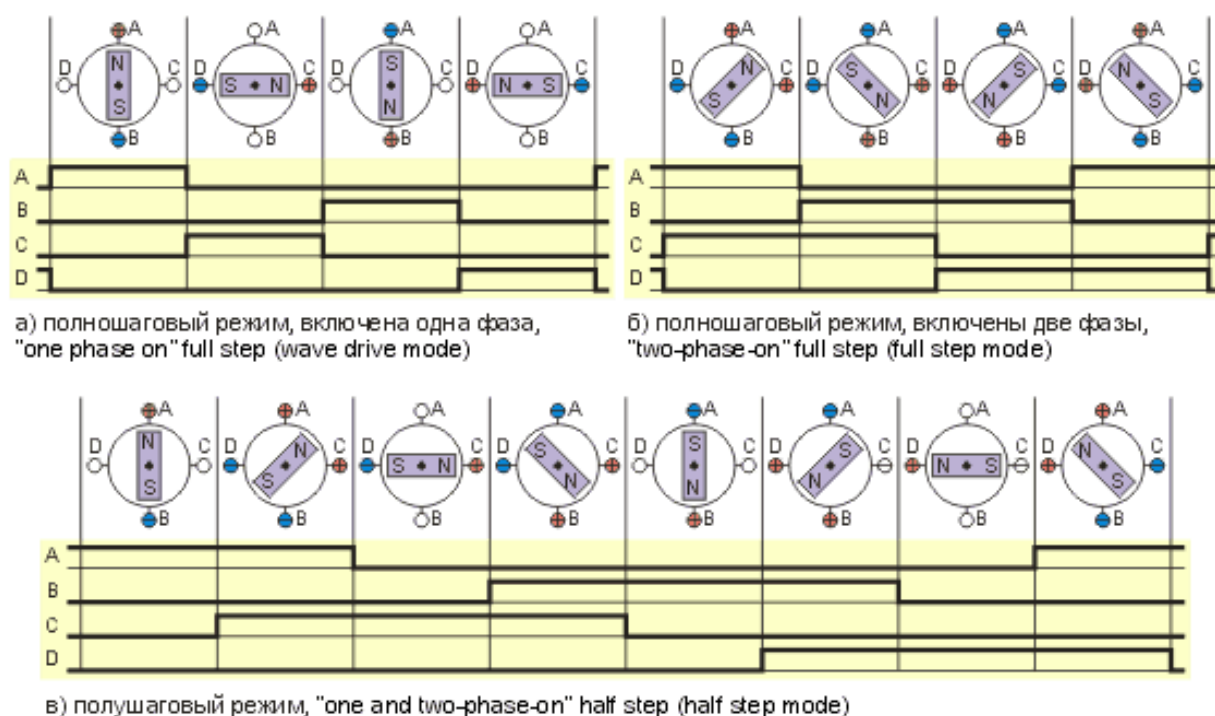


Рис. 1.30. Временные диаграммы управления шаговым двигателем различными способами

намику подачи управляющих импульсов на обмотки униполярного двигателя, рисунки – соответствующие полярности подключения обмоток биполярного двигателя и положения ротора.

Первый способ обеспечивается попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 1.30, *а*). Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естественными» точками равновесия ротора у неподключенного 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 [16].

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 1.30, *б*) 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 полшага относительно «естественных» точек [16].

Третий способ является комбинацией первых двух и называется полушаговым режимом, так как двигатель делает шаг в половину основного. 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 запитана лишь одна фаза, а в остальных случаях запитаны две (рис. 1.30, *в*). 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 [16].

В микрошаговом режиме ток в фазах меняют небольшими шагами, обеспечивая 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 точности позиционирования, микрошаговый режим имеет и другие преимущества: снижение шума и вибрации, обеспечение плавности хода. 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. Микрошаговый режим по сути является управлением шаговым двигателем в режиме синхронного. Именно этот режим используют в синхронных сервоприводах. Драйвер двигателя питается от постоянного тока, из которого широтно-импульсной модуляцией (см. п. 1.1.13) получают переменный ток заданной частоты.

В полношаговом режиме с двумя включенными фазами положения точек равновесия ротора смещены на полшага. Нужно отметить, что эти положения ротор принимает при работе двигателя, но положение ротора не может сохраняться неизменным после выключения тока обмоток. Поэтому при включении и выключении питания двигателя ротор будет смещаться на полшага. Для того чтобы он не смещался при остановке, необходимо подавать в обмотки ток удержания. То же справедливо и для полушагового и микрошагового режимов. Следует отметить, что если в выключенном состоянии ротор двигателя поворачивался, то при включении питания возможно смещение ротора и на большую, чем половина шага, величину.

Ток удержания может быть меньше номинального, так как от двигателя с неподвижным ротором обычно не требуется большого момента. Однако есть применения, когда в остановленном состоянии двигатель должен обеспечивать полный момент, что для шагового двигателя возможно. Это свойство шагового двигателя позволяет в таких ситуациях обходиться без механических тормозных систем. Поскольку современные драйверы позволяют регулировать ток питания обмоток двигателя, задание необходимого тока удержания обычно не представляет проблем. Задача обычно заключается просто в соответствующей программной поддержке для управляющего микроконтроллера [16].



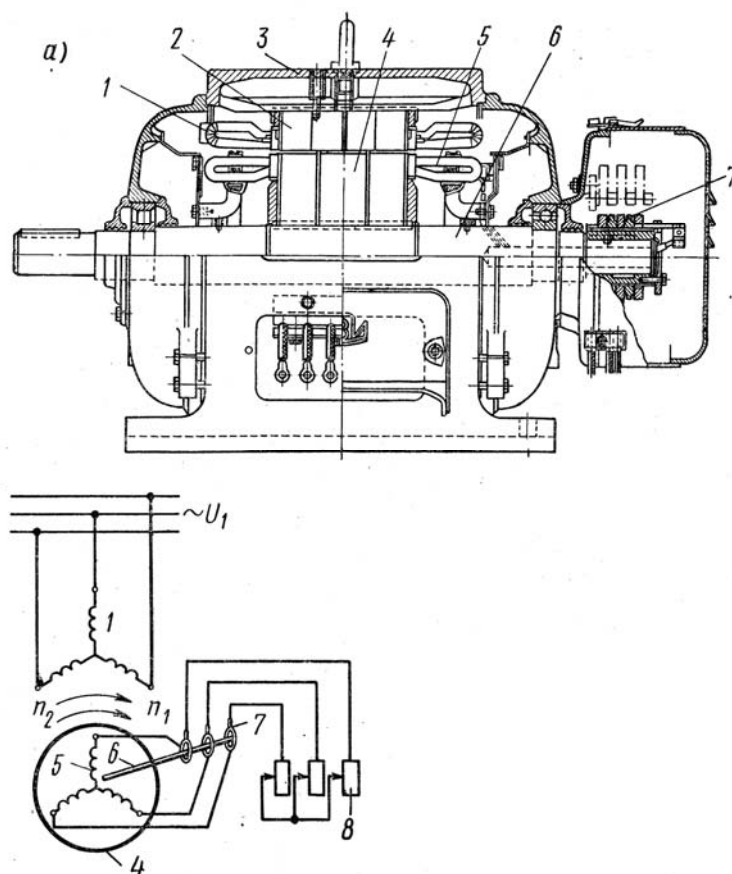
### 1.3. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Асинхронные электродвигатели (АД) широко применяют в различных сферах промышленности, в том числе и в мехатронных системах. Существуют разные модификации: однофазные, двухфазные и трехфазные, с короткозамкнутым и фазным роторами.

#### 1.3.1. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный электродвигатель состоит из неподвижной части (статора) и подвижной (ротора). Для увеличения сопротивления и снижения силы вихревых токов сердечники статора и ротора набираются из стальных пластин.

На внутренней поверхности цилиндрического статора и на внешней поверхности цилиндра ротора (для АД с фазным ротором) имеются пазы, в которые уложены проводники обмоток соответственно статора (рис.1.31) и ротора. Для



**Рис. 1.31. Устройство асинхронного электродвигателя с фазным ротором и схема его включения:**

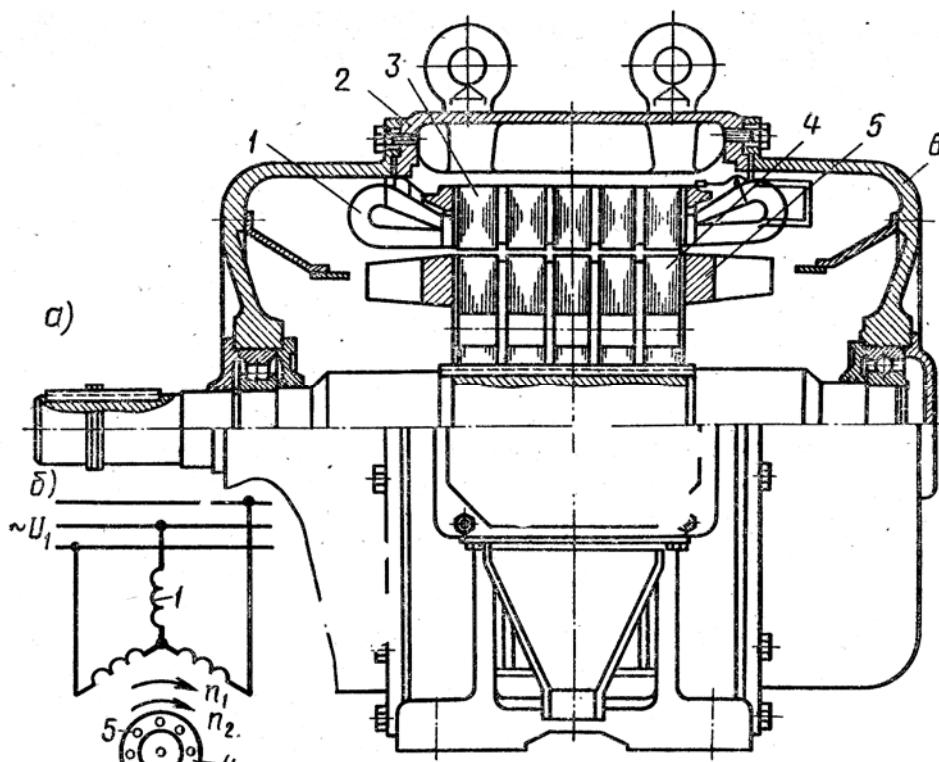
- 1 – обмотка статора; 2 – сердечник статора; 3 – корпус; 4 – сердечник ротора;  
5 – обмотка ротора; 6 – вал; 7 – кольца; 8 – пусковой реостат

всех видов АД обмотки статора непосредственно присоединяются к внешней электрической сети (двух- или трехфазной). Для двигателей с фазным ротором обмотки последнего подключаются к *контактным кольцам коллектора* и далее при помощи скользящих по ним щеток выводится наружу.

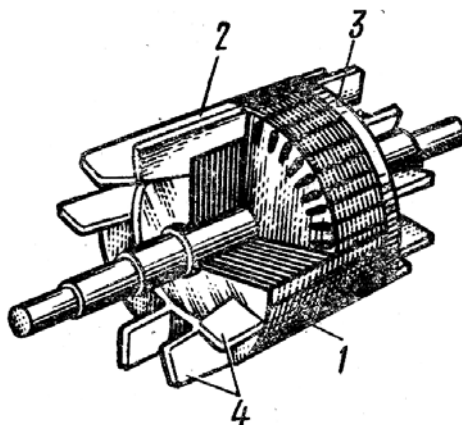
Для АД с короткозамкнутым ротором его обмотка не имеет связи с внешними электрическими цепями, т.е. не нуждается в контактных кольцах, и выполняется в виде так называемой «*белчьей клетки*» (см. рис. 1.32).

В каждом пазу ротора находится стержень, изготовленный из меди или алюминия. Стержни замыкаются между собой с торцевых сторон ротора кольцами из такого же материала. Такое устройство называется *асинхронной машиной (АМ) с короткозамкнутым ротором*.

В асинхронных двигателях малой и средней мощности стержни и торцевые кольца вместе с *лопастями вентилятора воздушного охлаждения* выполняются путем заливки углублений на поверхности ротора расплавленным алюминием. (см. рис. 1.33).



**Рис. 1.32. Схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:**  
1 – обмотка статора; 2 – корпус; 3 – сердечник статора; 4 – сердечник ротора;  
5 – обмотка ротора («белчьё колесо»); 6 – подшипниковый щит



**Рис. 1.33. Конструкция короткозамкнутого ротора:**

1 – сердечник; 2 – стержни; 3 – короткозамкнутое кольцо; 4 – лопасти вентилятора

Для снижения высокочастотных наводок, возникающих при работе двигателя, пазы ротора и(или) статора выполняют со скосом.

### 1.3.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Магнитный поток  $\Phi_1$ , возникающий за счет тока  $i_1$  с частотой  $f_1$  в обмотке статора, при вращении со скоростью  $n_1$  пересекает проводники витков обмотки ротора (или стержни короткозамкнутого ротора) и индуцирует в них электродвижущую силу. В обмотках (стержнях) возникают токи  $i_2$ , частота которых при неподвижном роторе совпадает с частотой  $f_1$ .

В трехфазной обмотке ротора ток  $i_2$  также трехфазный, с той же частотой. Этот ток создает свое *вращающееся магнитное поле с потоком*  $\Phi_2$ , направление и скорость вращения  $n_2$  которого при неподвижном роторе такие же, как и в статоре:

$$n_2 = f_2 = f_1 = n_1 \text{ (об/с).}$$

В результате взаимодействия магнитных потоков  $\Phi_2$  ротора с потоком статора  $\Phi_1$  возникают механические силы, создающие вращающий момент  $M$ . При пуске, когда скорость вращения ротора  $n = 0$ , возникает пусковой момент  $M_{\text{п}} > 0$ . Если этот момент больше статического момента *на валу*, создаваемого полезной нагрузкой двигателя  $M_{\text{п}} > M_{\text{в}}$ , ротор придет во вращение в направлении вращающегося поля с некоторой скоростью  $n < n_1$ , т.е. будет вращаться с отставанием относительно магнитного поля статора.

Отношение разности скорости вращения поля и ротора к скорости вращения поля статора называется *скольжением*:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (S_{\%} = 100 \cdot S = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100, \%),$$

или  $n = (1 - S)n_1$ .

При пуске асинхронного двигателя скольжение будет максимальным и равным единице (при  $n_2 = 0$ ). При *синхронном* вращении (скорости вращения поля статора и ротора одинаковы, т.е.  $n_1 = n$ ) скольжение будет минимальным ( $S = 0$ ).

При  $n = n_1$  магнитное поле статора относительно ротора становится неподвижным, ЭДС в обмотках не индуцируются и токи в них не возникают. Вращающий момент становится равным нулю. Поэтому нулевого скольжения асинхронный двигатель достичь не может, и в нормальном режиме работы справедливы соотношения:  $0 < n < n_1$ , а  $1 > S > 0$ .

При совпадении направления вращения ротора и поля статора *частота пересечения полей  $\Phi$  проводников ротора* пропорциональна скольжению, т.е. разности скоростей поля  $n_1$  и ротора  $n$ . Поэтому частота тока  $i_2$  в обмотках ротора

$$f_2 = n_1 - n.$$

Подставляя в это соотношение  $n = (1 - S)n_1$ , получим

$$f_2 = n_1 - (1 - S)n_1 = Sn_1 = Sf_1.$$

При  $f_2 < f_1$  скорость вращения *поля ротора относительно самого ротора*

$$n_{2p} = Sn_1,$$

а скорость вращения *поля ротора относительно статора*

$$n_{2c} = n + n_{2p} = n + Sn_1 = (1 - S)n_1 + Sn_1 = n_1.$$

Если скорость вращения ротора асинхронного двигателя превышает скорость вращения поля статора, а направления совпадают, то момент  $M$ , действующий на ротор асинхронного двигателя, будет тормозящим, и режим работы двигателя переходит в *режим генератора*. При этом он отдает энергию в сеть (при  $n > n_1$  скольжение  $S < 0$ ).

### 1.3.3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И РЕЖИМЫ ИХ РАБОТЫ

#### 1.3.3.1. Характеристики АД

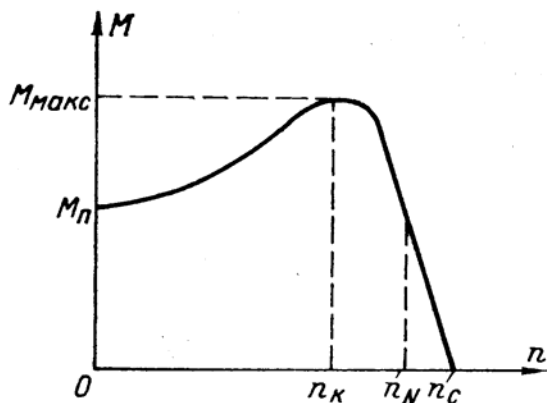


Рис. 1.34. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя

Основная характеристика асинхронного двигателя – это его механическая характеристика (МХ) – зависимость механического момента на его валу от угловой скорости вращения ротора (частоты вращения  $n$ ) (см. рис. 1.34). При этом напряжение и частота питающей обмотки статора постоянны. На МХ имеются характерные точки: пусковой момент  $M_{п}$ , скорость холостого хода (синхронная скорость  $n_{с}$ ), номинальная скорость вращения  $n_{н}$ , максимальный момент, развиваемый асинхронным двигателем.

Для двигателя с фазным ротором можно построить механические характеристики, которые зависят от сопротивлений в цепи обмоток ротора (см. рис. 1.35).

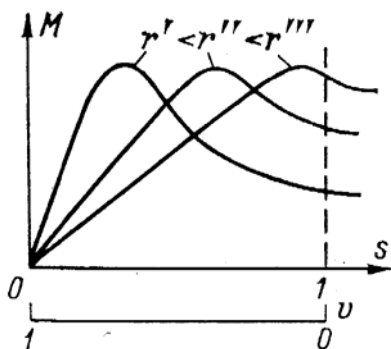


Рис. 1.35. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором при различном активном сопротивлении в цепи обмоток ротора

Основные характеристики двигателя, изготовленного в соответствии с международными стандартами IEC 34-1/9, IEC 85, DIN 57530/VDE 0530-1291, находятся на шильдике (металлической пластинке, прикрепленной к корпусу двигателя).

В качестве примера рассмотрим следующие обозначения, которые могут быть приведены на шильдике:

Таблица 1

Обозначение на шильдике	Расшифровка
Mot.X	Трехфазный двигатель с высотой $X$ мм (от середины вала до поверхности крепления)
$X1/X2$ A	Номинальный ток при соединении звездой $X1$ A Номинальный ток при соединении треугольником $X2$ A
$N$ rpm	Номинальная скорость вращения ротора двигателя $N$ об/мин
$Y/\Delta 380/220$ V	Линейное напряжение при соединении звездой для 380 В и для соединения треугольником для 220 В
$\cos\varphi 0,75$	Значение коэффициента мощности двигателя 0,75
$P$ kW	Номинальная мощность на валу двигателя $P$ кВт
Is.Kl. B:	Допускаемая температура обмоток двигателя при продолжительном режиме работы. Существуют следующие изоляционные классы: $E = 120$ °C $B = 130$ °C (Стандарт) $F = 155$ °C $H = 180$ °C
IP 54:	Степень защищенности двигателя IP 54 = пыле- и брызгостойкая обшивка
50 Hz	Частота сети 50 Гц
VDE 0530/84	Сертификат соответствия VDE

Номинальный момент двигателя может быть легко вычислен с использованием информации на шильдике:

$$M = \frac{P(kW)}{n_H(rpm)} \cdot 9550 = \frac{0,37 \cdot 9550}{1410} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полная мощность определяется следующей формулой:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ В} \cdot 1,1 \text{ А} = 724 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность рассчитывается так:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 724 \text{ Вт} \cdot 0,75 = 543 \text{ Вт}.$$

### 1.3.3.2. Режимы работы АД

Существует три основных режима работы двигателя: продолжительный режим, повторно-кратковременный режим и кратковременный.

В течение продолжительного режима  $S1$  время работы двигателя с номинальной мощностью настолько велико, что устанавливается температурный баланс между корпусом двигателя и окружающей средой (при постоянной температуре окружающей среды). Этот режим является обычным для стандартных двигателей, постоянно нагруженных своим номинальным моментом.

Во время кратковременного режима  $S2$  время работы с номинальной мощностью так мало, что температурный баланс не может быть достигнут. В течение длительных пауз двигатель полностью охлаждается.

Во время повторно-кратковременного режима  $S3$  паузы так малы, что двигатель не успевает охладиться до комнатной температуры (но среднее значение температуры остается постоянным).

Существует также перемежающийся режим с периодической нагрузкой  $S6$ , когда двигатель не может охладиться в течение интервалов холостого хода до окружающей температуры.

### 1.3.4. ПУСК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для нормального пуска АД должны быть выполнены следующие основные требования :

а) пусковой момент *должен превышать тормозящий момент  $M_{в}$ , создаваемый механической нагрузкой:  $M_{п} > M_{в}$ ;*

б) величина *пускового тока не* должна быть чрезмерно большой;

в) схема пуска должна быть максимально простой.

*Основные способы пуска АД:*

- *прямой пуск* (подключение обмоток статора к сетевому напряжению);
- *пуск при пониженном напряжении на статорных обмотках* (для снижения пускового тока);
- *пуск при помощи пускового реостата в цепи АД с фазным ротором.*

Первый способ применяется обычно при пуске асинхронного двигателя малой мощности с короткозамкнутым ротором. Статорные обмотки выдерживают пусковой ток при номинальном напряжении.

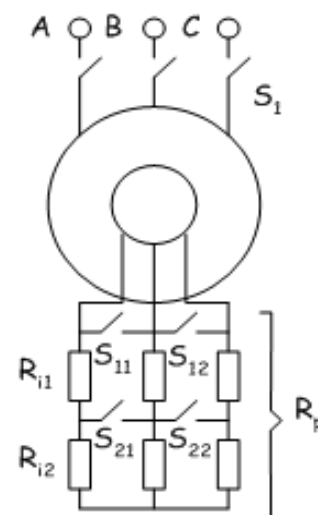
Недостатком этого способа является малая величина пускового момента  $M_{п}$ , а также что при пуске – ток  $I_{п}$  в 5 – 7 раз больше номинального тока  $I_{н}$ .

Второй способ желательно применять при пуске *на холостом ходу* или при малом моменте нагрузки  $M_{в}$ . При этом способе применяются различные схемы:

- *реакторный пуск* (включение при пуске в цепь обмоток статора *реактивных сопротивлений* для уменьшения питающего напряжения на обмотках статора);
- включение на период пуска *активных сопротивлений* в цепь статора (с той же целью);
- *автотрансформаторный пуск* (питание обмоток статора от регулируемого трехфазного автотрансформатора);
- *переключением после разгона ротора обмоток статора со «звезды» на «треугольник».*

Третий способ используется при пуске АД с *фазным ротором*. При некотором значении добавочного сопротивления  $r_{д}'''$  в цепи ротора можно производить пуск при максимально возможном вращающем моменте, а по мере разгона, постепенно уменьшать это сопротивление до нуля.

Несмотря на все преимущества этого способа, он требует более сложной конструкции ротора. Именно поэтому двигатель с фазным ротором обладает более высокой стоимостью. Такой способ используется при тяжелых условиях пуска.



**Рис. 1.36. Пуск АД с фазным ротором**

### 1.3.5. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ С ПОВЫШЕННЫМ ПУСКОВЫМ МОМЕНТОМ

Для повышения пускового момента АД применяются две конструктивные разновидности КЗ-роторов:

- а) *двойная «беличья клетка»;*
- б) АД с ротором, имеющим *глубокие пазы.*



Первая разновидность имеет 2 «беличьи клетки» на роторе: *наружную и внутреннюю*. Наружная выполнена из более тонких стержней и обладает *повышенным активным сопротивлением*. Она выполняет роль *пусковой* обмотки. Внутренняя – является *рабочей*, ее стержни имеют большее сечение и обладают *меньшим* сопротивлением.

*Индуктивное* сопротивление  $X_{LП}$  пусковой обмотки мало, так как она лежит практически на поверхности якоря, и потокосцепление ее с полем рассеяния мало. Напротив, *индуктивная составляющая*  $X_{LP}$  полного сопротивления *рабочей* обмотки велика, поскольку она расположена в толще ферромагнетика и пронизывается полным магнитным потоком.

При пуске частота тока в роторе  $f_2$ , велика ( $f_2 = f_1$ ), и  $X_{LП} \ll X_{LP}$ , полное сопротивление  $Z_{П}$  много меньше  $Z_P$ , а его активная составляющая много больше индуктивной. При этом бóльшая часть тока якоря АД будет протекать по наружной (пусковой) обмотке, и в этом токе активная составляющая много больше реактивной. А поскольку вращающий момент в АД создается именно *активной составляющей* тока ротора, пусковой момент достигает значительной величины.

По мере разгона ротора частота тока  $f_2$  уменьшается, поэтому изменяется и распределение токов между клетками: реактивные сопротивления уменьшаются и становятся незначительными по сравнению с активными, ток переходит в рабочую клетку, поскольку  $R_p \ll R_n$ .

*Глубокопазный двигатель* – его принцип действия основан также на *вытеснении тока при пуске*. Стержни «беличьей клетки» занимают объем пазов большой глубины, и наружные слои стержней играют роль наружной клетки (пусковой обмотки) в предыдущей конструкции, а внутренние, глубинные – роль внутренней (рабочей) обмотки. Так же, как и в варианте с двойной «беличьей клеткой», при разных скоростях ротора  $n$  изменяется *соотношение между активной и реактивной составляющими* полного комплексного сопротивления обмотки, за счет чего ее сопротивление при пуске различно.

### 1.3.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АД

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей имеет следующие преимущества:

- возможность управления при максимальной скорости;
- постоянное улучшение технологий регулирования скорости вращения с одновременным понижением цены;

- асинхронные машины нетребовательны к техобслуживанию;
- возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне;
- высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя;
- низкая стоимость асинхронных двигателей.

Основные сферы применения преобразователей частоты следующие:

- роботы и транспортные системы;
- упаковочные машины;
- текстильные машины;
- насосы, вентиляторы, компрессоры;
- конвейер и транспортное оборудование;
- механические и деревообрабатывающие станки и механизмы;
- оборудование для белильной и бумажной промышленности.

Частота вращения ротора АД определяется формулой

$$n = n_1(1 - S) = f_1(1 - S)/p,$$

где  $p$  – число пар полюсов обмотки статора. Анализ приведенной выше формулы позволяет выявить три основных метода регулирования скорости АД:

- изменение частоты  $f_1$ ;
- изменение скольжения  $S$ ;
- изменение числа пар полюсов  $p$ .

### 1.3.6.1. Частотное регулирование

Данный способ известен давно и в настоящее время является основным. Как правило, он используется для управления асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для его осуществления требуется источник электрического тока *переменной частоты*, в качестве которого могут быть использованы, например, *преобразователи частоты или синхронный генератор* переменного тока с



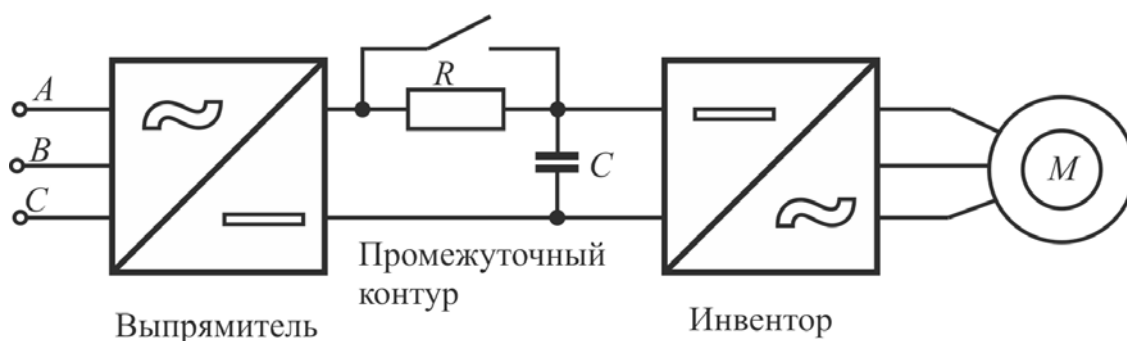
**Рис. 1.37. Общий вид частотного преобразователя Hyundai N700E 004HF 0,4 кВт, 380 В**

переменной скоростью вращения. В настоящее время существует множество видов частотных преобразователей для регулирования скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя. На рисунке 1.37 внешний вид современного частотного преобразователя.

Как правило, современные частотные преобразователи имеют множество функций, основные из которых следующие: автоматическая настройка, установка вольточастотных характеристик, выбор кривой характеристик разгона/замедления, ограничение верхнего/нижнего пределов частоты, шестиуровневый многоскоростной режим, настройка стартовой частоты, настройка несущей частоты (0,5 – 16 кГц), П-, ПИ- и ПИД-регулирование скорости вращения ротора двигателя, настройка электронной тепловой защиты, попытка повторного пуска, автоматический подъем момента, отображение архива аварийных отключений, блокировка программы, отображение преобразования частоты, защита от непреднамеренного пуска.

На рисунке 1.38 показана блок-схема силовой части преобразователя (инвертора) с промежуточным звеном постоянного тока.

Выпрямитель состоит из неуправляемой одно- или трехфазной мостовой схемы. Однофазный выпрямитель используется только для двигателей низких мощностей.



**Рис. 1.38. Блок-схема силовой части частотного преобразователя**

Выпрямитель преобразует переменное напряжение сети в постоянное напряжение. Далее оно сглаживается в промежуточном контуре конденсаторным фильтром. При заряде конденсатора может протекать очень большой кратковременный ток, что создает опасность вывода из строя входного предохранителя или диодов выпрямителя. Для предотвращения негативных последствий чрезмерно большой силы зарядного тока включается балластный резистор  $R$ . После заряда конденсатора резистор шунтируется контактным реле (или другим способом). Конденсатор имеет большую емкость, необходимую для сглаживания напряжения на выходе выпрямителя. После выключения инвертора из сети, конденсатор сохраняет рабочее напряжение в течение определенного периода времени. Это отображается зарядным светодиодом. Для преобразования постоянного тока в переменный на выходе устанавливается инвертор. Для этого используются транзисторы, которые работают в переключающем режиме. В конце прошлого века наиболее часто применялись биполярные транзисторы с малыми частотами переключения (до 2 кГц). Сегодня используются полевые транзисторы с низкими потерями, а также IGBT-транзисторы (от англ. *Insulated-gate bipolar transistor*) – трехэлектродные силовые электронные приборы, используемые, в основном, как мощные электронные ключи в импульсных источниках питания, инверторах, в системах управления электрическими приводами). Эти транзисторы обеспечивают частоты переключения до 16 кГц и очень низкий уровень шума.

Как видно из рис. 1.39, ток через обмотку двигателя может протекать только тогда, когда, по меньшей мере, один из верхних ( $T_1, T_3$  и  $T_5$ ) и один из нижних

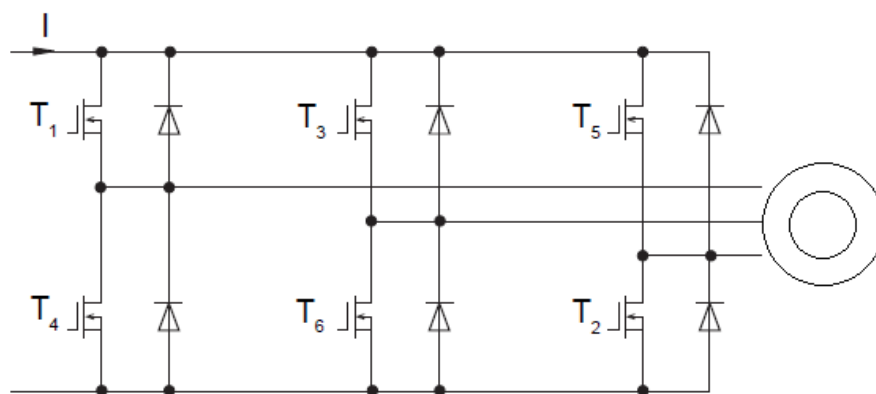
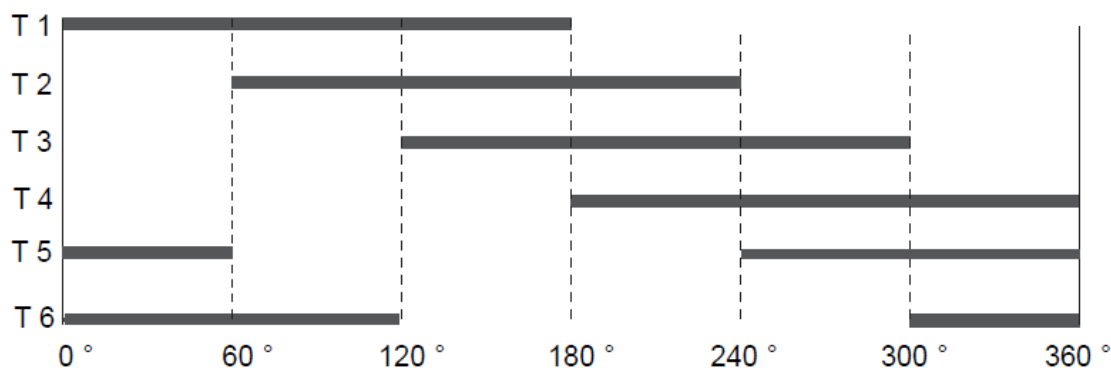


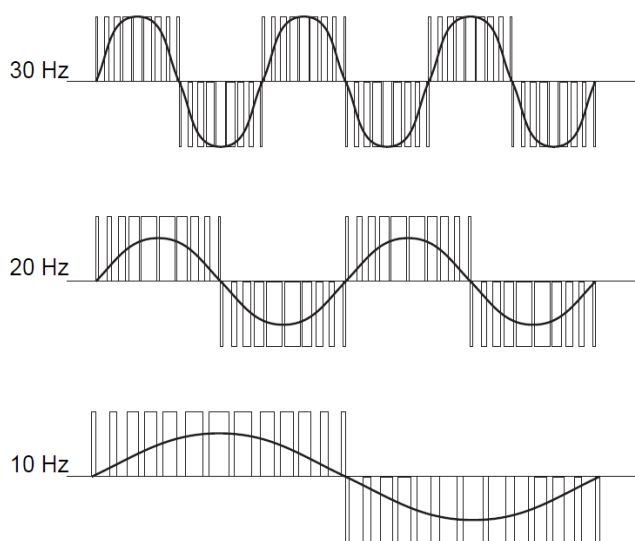
Рис. 1.39. Принципиальная схема инвертора

транзисторов (Т4, Т6 and Т2) включены. Одновременно включены три транзистора. Диаграмма их включения показана на рис. 1.40. Как видно из диаграммы инвертор восстанавливает в обмотках статора двигателя сдвиг по фазе между токами, равный  $120^\circ$ , соответствующий симметричной трехфазной сети.



**Рис. 1.40.** Диаграмма открывания транзисторов инвертора

Из-за индуктивности двигателя ток не может резко упасть до нуля, когда транзистор выключается. По этой причине в схему включаются антипараллельные диоды, которые коммутируют (пропускают) токи в момент выключения транзистора, таким образом, защищая его (см. рис. 39). Частота тока в обмотках статора



**Рис. 1.41.** Преобразование импульсного управляющего сигнала в синусоидальный выходной ток инвертора

зависит от длительности цикла срабатывания выходных ключей инвертора (рис. 1.40). Амплитуда определяется величиной отношения времени включения ко времени выключения транзисторов. Это отношение при широтно-импульсной модуляции синусоидального сигнала делает возможным получить синусоидальную форму с минимальным числом гармоник (см. рис. 1.41).

Развиваемый АД  $M_{\max}$  пропорционален  $(U_1/f_1)^2$ , поэтому для под-

держания неизменной так называемой *перегрузочной способности* двигателя, т.е. отношения  $M_{\max} / M_{\text{в}}$ , необходимо *при изменении частоты  $f_1$*  одновременно изменять и *напряжение питания статора  $U_1$*  так, чтобы отношение  $U_1/f_1 = \text{const}$ , если момент нагрузки на валу  $M_{\text{в}}$  не зависит от скорости вращения  $n$ , или по другим законам, определяемым зависимостью  $M_{\text{в}} = f(n)$ .

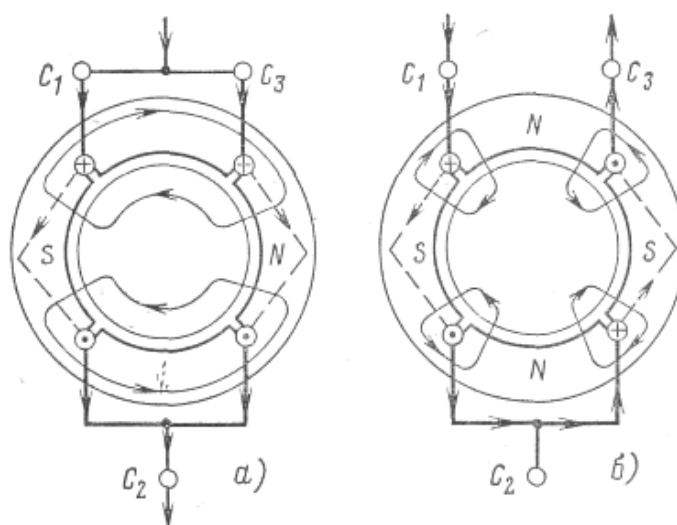
### 1.3.6.2. Изменение числа пар полюсов

Такой метод регулирования дает возможность получить *ступенчатое* изменение частоты вращения. Асинхронные двигатели, реализующие такую возможность управления, называются *многоскоростными*. Существуют два способа регулирования скорости:

- в пазах статора двигателя укладываются несколько обмоток, имеющих разное число пар полюсов. При каждом значении скорости работает только одна из них;

- используется специальная обмотка, позволяющая получить разное число пар полюсов путем переключения схемы соединения. При любой скорости используются *все* обмотки статора (на рис. 1.42 приведена схема переключения обмоток асинхронного двигателя, позволяющая реализовать число пар полюсов  $p1$  или  $p2$ ).

Недостаток такого способа регулирования скорости – большие габариты двигателя, стоимость, сложность коммутационных устройств, увеличенная масса.



**Рис. 1.42. Статор асинхронного двигателя:**

*а* – с одной парой полюсов; *б* – с двумя парами полюсов

### 1.3.6.3. Регулирование изменением скольжения

Для АД с КЗ-ротором возможны два способа:

а) изменение величины питающего напряжения  $U_1$ . Для получения более широкого диапазона регулирования активное сопротивление обмотки («клетки») ротора должно быть достаточно велико, т.е. механические характеристики должны быть «мягче».

Очевидно, что данный способ может использоваться и для АД с фазным ротором. Для регулирования питающего напряжения  $U_1$  используются автотрансформатор в первичной цепи или реостат. При таком способе регулирования снижается КПД, поэтому он применяется для регулирования маломощных АД;

б) импульсное регулирование скорости. Данный способ осуществляется путем периодического включения статорных обмоток в сеть и отключения их, либо периодического шунтирования резисторов, включенных последовательно в цепи питания статора. При этом двигатель время работает в *переходном режиме* разгон-торможение. Используется этот способ обычно для управления маломощными ИД.

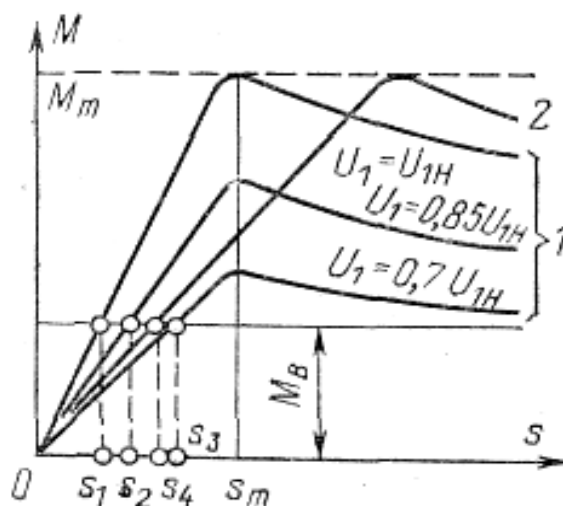


Рис. 1.43. Механические характеристики при регулировании частоты вращения ротора:

1 — при различных напряжениях  $U_1$ ;

2 — при введении в цепь обмотки ротора дополнительного активного сопротивления

Для АД с фазным ротором имеется возможность включения регулирующих устройств во вторичную цепь машины — цепь ротора. Возможны два варианта:

а) включение *реостата* в цепь ротора. Схема – та же, что и при реостатном пуске АД с фазным ротором. При *увеличении* сопротивления регулировочного реостата  $R_p$  механическая характеристика становится более *мягкой*, и скольжение  $S$  при неизменном моменте нагрузки на валу  $M_v$  увеличивается (скорость  $n$  *уменьшается*).

К недостаткам такого способа регулирования скорости можно отнести наличие потерь в  $R$ , «мягкость» механической характеристики, зависимость диапазона регулирования скорости  $n$  от величины нагрузки  $M_v$ ;

б) *введение добавочной ЭДС* во вторичную цепь АД (цепь ротора). Этот способ используется достаточно редко в так называемых *каскадных соединениях* при больших мощностях электрических машин.

### 1.3.7. РЕЖИМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И СПОСОБЫ ОСТАНОВА

Самый простой способ останова – отключение его от питающей сети (выбег электродвигателя). При этом время до полного останова определяется характеристиками двигателя и его нагрузки. Однако очень часто выбег недопустим. Особенно это касается мехатронных и робототехнических систем.

Торможение в течение заданного интервала времени обеспечивает генераторный способ, заключающийся в том, что инвертор с необходимой скоростью уменьшает выходную частоту тока в статорных обмотках двигателя. Скорость вращения ротора превышает скорость вращения магнитного поля статора. Возникает генераторный режим работы двигателя и торможение ротора. В случае нагрузки с большим моментом инерции может потребоваться применение внешнего тормоза, подключение которого осуществляет специальная контролирующая схема.

Преимуществом генераторного торможения является возможность управления временем останова, высокий тормозной момент и обеспечение плавности торможения. Недостаток заключается в том, что энергия выделяется в преобразователе, и в случае быстрого останова или большого момента инерции нагрузки для избежания перегрева встроенного резистора контура постоянного тока преобразователя, необходимо использование внешнего сопротивления.



Существует торможение постоянным током (динамическое торможение). Для этого с обмотки статора двигателя снимают переменное напряжение, выпрямляют его и на одну или две фазы подают постоянное напряжение. При этом магнитное поле будет вызывать замедление, а затем и удержание ротора в неподвижном состоянии.

Преимуществом динамического торможения является выделение электрической энергии в роторе двигателя, что делает ненужным использование тормозного сопротивления, и плавным останов. Но при этом время торможения становится величиной неопределенной. Эффективность торможения в этом случае по сравнению с генераторным методом составляет 30 – 40%.

При комбинированном способе торможения используется комбинация двух описанных способов, т.е. на переменную составляющую выходного напряжения преобразователя накладывается постоянная составляющая. Этот способ торможения сочетает в себе преимущества обоих электрических способов торможения и позволяет эффективно тормозить электродвигатель за короткое время выделения тепла в преобразователе.

Асинхронные приводы в мехатронных системах становятся все более популярными с каждым днем. Это напрямую связано с развитием электронной и в первую очередь, полупроводниковой техники, применяемой для создания инверторов. Использование инверторов обеспечивает следующие возможности:

- возможность управления при максимальной скорости;
- асинхронные машины нетребовательны к техобслуживанию;
- постоянное улучшение технологии частотного преобразователя с одновременным уменьшением их стоимости;
- возможно эксплуатирование во взрывоопасной зоне;
- высокий коэффициент мощность/масса для асинхронного двигателя;
- низкая стоимость асинхронных двигателей.

## 2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ СИСТЕМ МЕХАТРОНИКИ

---

### 2.1. ОСОБЕННОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

*Пневматический привод* (пневмопривод) – совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение машин и механизмов посредством энергии сжатого воздуха. Обязательными элементами пневмопривода являются компрессор (генератор пневматической энергии) и пневмодвигатель.

Пневмопривод, подобно гидроприводу, представляет собой своего рода «пневматическую вставку» между приводным двигателем и нагрузкой (машиной или механизмом) и выполняет те же функции, что и механическая передача (редуктор, ременная передача, кривошипно-шатунный механизм и т.д.).

Основное назначение пневмопривода, как и механической передачи, – преобразование механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки (преобразование вида движения выходного звена двигателя, его параметров, а также регулирование, защита от перегрузок и др.).

*Классификация пневмоприводов.*

По характеру воздействия на рабочий орган пневмоприводы с поступательным движением бывают:

- двухпозиционные, перемещающие рабочий орган между двумя крайними положениями;
- многопозиционные, перемещающие рабочий орган в различные положения.

По принципу действия пневматические приводы с поступательным движением бывают:

- одностороннего действия, возврат привода в исходное положение осуществляется механической пружиной;
- двухстороннего действия, перемещение рабочего органа привода осуществляется сжатым воздухом.

По конструктивному исполнению пневмоприводы с поступательным движением делятся на:

– поршневые, представляющие собой цилиндр, в котором под воздействием сжатого воздуха либо пружины перемещается поршень (возможны два варианта исполнения: в односторонних поршневых пневмоприводах рабочий ход осуществляется за счет сжатого воздуха, а холостой – за счет пружины; в двухсторонних – и рабочий, и холостой ходы осуществляются за счет сжатого воздуха);

– мембранные, представляющие собой герметичную камеру, разделенную мембраной на две полости; в данном случае цилиндр соединен с жестким центром мембраны, на всю площадь которой и производит действие сжатый воздух (также, как и поршневые, выполняются в двух видах – одно- либо двухстороннем).

Сильфонные применяются реже. Практически всегда одностороннего действия: усилие возврата может создаваться как упругостью самого сильфона, так и с использованием дополнительной пружины. В особых случаях (когда требуется повышенное быстродействие) применяют специальный тип пневмоприводов – вибрационный пневмопривод релейного типа.

Пневмопривод применяется в основном в системах с цикловым управлением. Функционально такой пневмопривод можно разделить на следующие узлы:

- блок подготовки рабочего тела (воздуха);
- блок распределения сжатого воздуха;
- блок исполнительных двигателей;
- система передачи сжатого воздуха между устройствами привода.

*Блок подготовки воздуха* является обязательным для пневмоприводов. Воздух осушают и очищают от пыли.

*Блок распределения сжатого воздуха* содержит устройства, с помощью которых по заданной программе можно открыть или закрыть доступ сжатого воздуха в рабочие полости исполнительных двигателей. В качестве распределителей служат устройства, где запорными устройствами служат золотники и клапаны. Обычно используют пневмораспределители с управлением от электромагнитов и командоаппаратов. Однако при определенных условиях (взрывоопасная среда, радиация) используются распределители с пневматическим управлением.

*В качестве блока исполнительных двигателей* используются цилиндры с прямолинейным или вращательным движением поршня одно- или двустороннего

действия. На каждую степень подвижности предусматривается свой исполнительный двигатель (пневмоцилиндр), конструкция которого обеспечивает заданные перемещения, скорости и усилия.

*Захватное устройство* также может иметь двигатель, который обеспечивает захват объекта манипулирования, его удержание при перемещении и освобождение после установки в заданной точке.

Рабочий цикл выполняется каждым двигателем в определенной последовательности в соответствии с требованиями технологического процесса и осуществляется по программе, выполняемой управляющим устройством робота, которое входит в состав СПУ.

В системах передачи сжатого воздуха между устройствами привода используются пневмопроводы различного сечения, рассчитываемого исходя из заданных условий работы.

В общих чертах, передача энергии в пневмоприводе происходит следующим образом:

1. Приводной двигатель передает вращающий момент на вал компрессора, который сообщает энергию рабочему газу.
2. Рабочий газ после специальной подготовки по пневмолиниям через регулирующую аппаратуру поступает в пневмодвигатель, где пневматическая энергия преобразуется в механическую.
3. После этого рабочий газ выбрасывается в окружающую среду, в отличие от гидропривода, в котором рабочая жидкость по гидролиниям возвращается либо в гидробак, либо непосредственно к насосу.

В зависимости от характера движения выходного звена пневмодвигателя (вала пневмомотора или штока пневмоцилиндра), и соответственно, характера движения рабочего органа пневмопривод может быть вращательным или поступательным. Пневмоприводы с поступательным движением получили наибольшее распространение в технике.

Область и масштабы применения пневматического привода обусловлены его достоинствами и недостатками, вытекающими из особенностей свойств воздуха. В отличие от жидкостей, применяемых в гидроприводах, воздух, как и все

газы, обладает высокой сжимаемостью и малой плотностью в исходном атмосферном состоянии, значительно меньшей вязкостью и большей текучестью, причем его вязкость существенно возрастает при повышении температуры и давления. Отсутствие смазочных свойств воздуха и наличие некоторого количества водяного пара, который при интенсивных термодинамических процессах в изменяющихся объемах рабочих камер пневмомашин может конденсироваться на их рабочих поверхностях, препятствует использованию воздуха без придания ему дополнительных смазочных свойств и влагопонижения. В связи с этим в пневмоприводах имеется потребность кондиционирования воздуха, т.е. придания ему свойств, обеспечивающих работоспособность и продляющих срок службы элементов привода.

С учетом вышеописанных отличительных особенностей воздуха рассмотрим достоинства пневмопривода в сравнении с его конкурентами – гидро- и электроприводом.

1. *Простота конструкции и технического обслуживания.* Изготовление деталей пневмомашин и пневмоаппаратов не требует такой высокой точности изготовления и герметизации соединений, как в гидроприводе, так как возможные утечки воздуха не столь существенно снижают эффективность работы и КПД системы. Внешние утечки воздуха экологически безвредны и относительно легко устраняются. Затраты на монтаж и обслуживание пневмопривода несколько меньше из-за отсутствия возвратных пневмолиний и применения в ряде случаев более гибких и дешевых пластмассовых или резиновых (резинотканевых) труб. В этом отношении пневмопривод не уступает электроприводу. Кроме того, пневмопривод не требует специальных материалов для изготовления деталей, таких как медь, алюминий и тому подобное, хотя в ряде случаев они используются исключительно для снижения веса или трения в подвижных элементах.

2. *Пожаро- и взрывобезопасность.* Благодаря этому достоинству пневмопривод не имеет конкурентов для механизации работ в условиях, опасных по воспламенению и взрыву газа и пыли, например в шахтах с обильным выделением метана, в некоторых химических производствах, на мукомольных предприятиях, т.е. там, где недопустимо искрообразование. Применение гидропривода в этих условиях возможно только при наличии централизованного источника питания с

передачей гидроэнергии на относительно большое расстояние, что в большинстве случаев экономически нецелесообразно.

3. *Надежность работы в широком диапазоне температур, в условиях пыльной и влажной окружающей среды.* В таких условиях гидро- и электропривод требуют значительно больших затрат на эксплуатацию, так как при температурных перепадах нарушается герметичность гидросистем из-за изменения зазоров и изолирующих свойств электротехнических материалов, что в совокупности с пыльной, влажной и нередко агрессивной окружающей средой приводит к частым отказам. По этой причине пневмопривод является единственным надежным источником энергии для механизации работ в литейном и сварочном производстве, в кузнечно-прессовых цехах, в некоторых производствах по добыче и переработке сырья и др. Благодаря высокой надежности пневмопривод часто используется в тормозных системах мобильных и стационарных машин.

4. *Значительно больший срок службы, чем гидро- и электропривода.* Срок службы оценивают двумя показателями надежности: гамма-процентной наработкой на отказ и гамма-процентным ресурсом. Для пневматических устройств циклического действия ресурс составляет от 5 до 20 млн циклов в зависимости от назначения и конструкции, а для устройств нециклического действия около 10 – 20 тыс. ч. Это в 2 – 4 раза больше, чем у гидропривода, и в 10 – 20 раз больше, чем у электропривода.

5. *Высокое быстроедействие.* Здесь имеется в виду не скорость передачи сигнала (управляющего воздействия), а реализуемые скорости рабочих движений, обеспечиваемых высокими скоростями движения воздуха. Поступательное движение штока пневмоцилиндра возможно до 15 м/с и более, а частота вращения выходного вала некоторых пневмомоторов (пневмотурбин) до 100 000 об/мин. Это достоинство в полной мере реализуется в приводах циклического действия, особенно для высокопроизводительного оборудования, например в манипуляторах, прессах, машинах точечной сварки, в тормозных и фиксирующих устройствах, причем увеличение количества одновременно срабатывающих пневмоцилиндров (например в многоместных приспособлениях для зажима деталей) практически не снижает время срабатывания. Большая скорость вращательного движения используется в приводах сепараторов, центрифуг, шлифовальных машин, борма-

шин и др. Реализация больших скоростей в гидроприводе и электроприводе ограничивается их большей инерционностью (масса жидкости и инерция роторов) и отсутствием демпфирующего эффекта, которым обладает воздух.

6. *Возможность передачи пневмоэнергии на относительно большие расстояния по магистральным трубопроводам и снабжение сжатым воздухом многих потребителей.* В этом отношении пневмопривод уступает электроприводе, но значительно превосходит гидропривод, благодаря меньшим потерям напора в протяженных магистральных линиях. Электрическая энергия может передаваться по линиям электропередач на многие сотни и тысячи километров без ощутимых потерь, а расстояние передачи пневмоэнергии экономически целесообразно до нескольких десятков километров, что реализуется в пневмосистемах крупных горных и промышленных предприятий с централизованным питанием от компрессорной станции.

Известен опыт создания городской компрессорной станции в 1888 г. одним из промышленников в Париже. Она снабжала заводы и фабрики по магистралям протяженностью 48 км при давлении 0,6 МПа и имела мощность до 18 500 кВт. С появлением надежных электропередач ее эксплуатация стала невыгодной.

Максимальная протяженность гидросистем составляет около 250 – 300 м в механизированных комплексах шахт для добычи угля, причем в них используется обычно менее вязкая водно-масляная эмульсия.

7. *Отсутствие необходимости в защитных устройствах от перегрузки давлением у потребителей.* Требуемый предел давления воздуха устанавливается общим предохранительным клапаном, находящимся на источниках пневмоэнергии. Пневмодвигатели могут быть полностью заторможены без опасности повреждения и находиться в этом состоянии длительное время.

8. *Безопасность для обслуживающего персонала при соблюдении общих правил, исключая механический травматизм.* В гидро- и электроприводах возможно поражение электрическим током или жидкостью при нарушении изоляции или разгерметизации трубопроводов.

9. *Улучшение проветривания рабочего пространства за счет отработанного воздуха.* Это свойство особенно полезно в горных выработках и помещениях химических и металлообрабатывающих производств.

10. *Нечувствительность к радиационному и электромагнитному излучению.* В таких условиях электрогидравлические системы практически непригодны. Это достоинство широко используется в системах управления космической, военной техникой, в атомных реакторах и т.п.

Несмотря на вышеописанные достоинства, применяемость пневмопривода ограничивается в основном экономическими соображениями из-за больших потерь энергии в компрессорах и пневмодвигателях, а также других недостатков, описанных ниже.

1. *Высокая стоимость пневмоэнергии.* Если гидро- и электропривод имеют КПД, соответственно, около 70% и 90%, то КПД пневмопривода обычно 5 – 15% и очень редко до 30%. Во многих случаях КПД может быть 1% и менее. По этой причине пневмопривод не применяется в машинах с длительным режимом работы и большой мощности, кроме условий, исключающих применение электроэнергии (например, горнодобывающие машины в шахтах, опасных по газу).

2. *Относительно большой вес и габариты пневмомашин из-за низкого рабочего давления.* Если удельный вес гидромашин, приходящийся на единицу мощности, в 5 – 10 раз меньше веса электромашин, то пневмомашин имеют примерно такой же вес и габариты, как последние.

3. *Трудность обеспечения стабильной скорости движения выходного звена при переменной внешней нагрузке и его фиксации в промежуточном положении.* Вместе с тем мягкие механические характеристики пневмопривода в некоторых случаях являются и его достоинством.

4. *Высокий уровень шума, достигающий 95 – 130 дБ при отсутствии средств для его снижения.* Наиболее шумными являются поршневые компрессоры и пневмодвигатели, особенно пневмомолоты и другие механизмы ударно-циклического действия. Наиболее шумные гидроприводы (к ним относятся приводы с шестеренными машинами) создают шум на уровне 85 – 104 дБ, а обычно уровень шума значительно ниже, примерно как у электромашин, что позволяет работать без специальных средств шумопонижения.

5. *Малая скорость передачи сигнала (управляющего импульса), что приводит к запаздыванию выполнения операций.* Скорость прохождения сигнала равна



скорости звука и, в зависимости от давления воздуха, составляет примерно от 150 до 360 м/с. В гидроприводе и электроприводе, соответственно, около 1000 и 300 000 м/с.

Перечисленные недостатки могут быть устранены применением комбинированных пневмоэлектрических или пневмогидравлических приводов.

## 2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПНЕВМОСИСТЕМ

Во всех элементах, приборах и системах пневмоавтоматики рабочей средой чаще всего является предварительно сжатый в компрессоре воздух (в некоторых особых случаях применяют другие газы), который окружает нас в повседневной жизни. Воздух представляет собой газовую смесь, в основном состоящую из двух газов: азота  $N_2$  (78,08%) и кислорода  $O_2$  (20,95%). В небольших количествах в нем присутствуют инертные газы – аргон  $Ar$ , неон  $Ne$ , гелий  $He$ , криптон  $Kr$  и ксенон  $Xe$  – и водород  $H_2$  (0,94%), а также диоксид углерода (углекислый газ)  $CO_2$  (0,03%). Помимо этих газов воздух содержит некоторое непостоянное по величине количество водяного пара (влаги).

Работа пневматических элементов основывается на использовании энергии сжатого воздуха, а также физических эффектов, возникающих при его движении. Законы, описывающие эти процессы, подробно изучаются в курсе механики жидкости и газа.

### 2.2.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗА

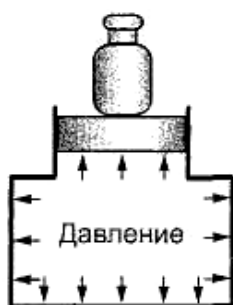


Рис. 2.1. Иллюстрация действия закона Паскаля

*Давление.* Если некоторое внешнее усилие воздействует на какой-либо замкнутый объем воздуха через подвижной элемент, например поршень, то в воздухе создается внутреннее давление, равномерно действующее на все поверхности, ограничивающие этот объем (рис. 2.1). Данное положение следует из закона Паскаля: давление, оказываемое на внешнюю поверх-

ность жидкости (газа), передается всем точкам этой жидкости (газа) и по всем направлениям одинаково.

Значение внутреннего давления не зависит от формы объема, занимаемого воздухом, и определяется как результат деления модуля внешней силы на площадь поперечного сечения поршня:

$$P = F/S.$$

В международной системе единиц СИ единицей измерения давления будет  $\text{Н/м}^2$ . Эта единица носит название паскаль и обозначается Па.

Давление может измеряться в различных существующих единицах. Однако на практике следует применять единицу измерения паскаль [Па], а также производные от нее, такие как килопаскаль [кПа], мегапаскаль [МПа] и т.п.; в виде исключения используют бар [бар]:

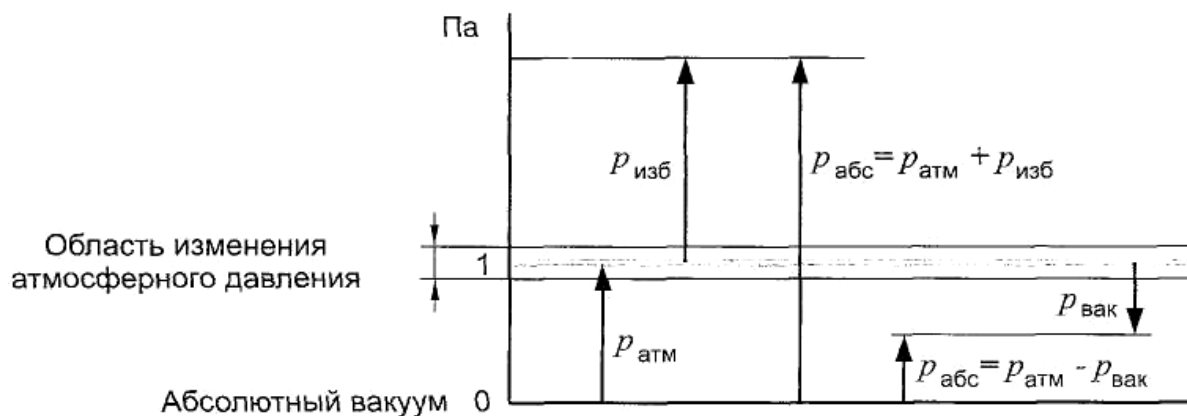
$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 10^2 \text{ кПа} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Давление атмосферного воздуха на находящиеся в нем предметы и на земную поверхность называют атмосферным давлением и обозначают  $P_{\text{атм}}$ . В каждой точке атмосферы атмосферное давление определяется весом вышележащего столба воздуха; с высотой его значение уменьшается. Атмосферное давление может меняться в зависимости от погодных условий и географического положения местности.

В пневматических системах используют, как правило сжатый воздух, абсолютное значение давления  $P_{\text{абс}}$  которого в несколько раз превышает атмосферное давление. Для удобства отсчета уровня давления в технике пользуются понятием избыточного давления.

Избыточным давлением  $P_{\text{изб}}$  называют превышение значением абсолютного давления воздуха значения атмосферного давления. Недостаток абсолютного давления относительно атмосферного называют вакууметрическим давлением или просто вакуумом  $P_{\text{вак}}$  (рис. 2.2).

Приборы для измерения избыточного давления называют манометрами. За нулевую точку шкалы манометров принимают атмосферное давление.



**Рис. 2.2. Системы отсчета величины давления**

Для измерения вакуума используют вакуумметры, шкала которых проградуирована от 0 до  $-1$  бар; вакуумная техника позволяет получить разрежение  $P_{абс} \sim 10$  Па ( $10^{-5}$  бар). Приборы, позволяющие измерять и вакуум, и избыточное давление, называют мановакуумметрами. Существуют также манометры для измерения абсолютного давления, но их применяют только в специальных случаях. В теоретических расчетах всегда используют значение абсолютного давления.

*Температура.* Для измерения температуры существуют различные шкалы, но в настоящее время применяют только две из них – термодинамическую и Международную практическую, градуированные соответственно в Кельвинах (К) и в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ).

В Международной практической шкале 0 и  $100$   $^{\circ}\text{C}$  являются соответственно температурами замерзания и кипения воды (так называемые реперные точки) при давлении  $1,013 \cdot 10^5$  Па (1,013 бар).

Во все термо- и газодинамические зависимости входит термодинамическая температура  $T$ , которую отсчитывают от абсолютного нуля температуры, представляющего собой такое ее теоретическое значение, при котором газы не обладают упругостью, а объем их становится равным нулю.

Термодинамическая, или абсолютная температура  $T$  [К] и температура по Международной практической шкале  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] связаны соотношением  $T = t + 273,15$ .

*Плотность.* Еще одним важнейшим параметром, характеризующим состояние газа, является плотность  $\rho$  [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ] – отношение массы вещества  $m$  [кг] к объему  $V$  [ $\text{м}^3$ ], который эта масса занимает:

$$\rho = m/V.$$

*Удельный объем.* Удельный объем  $v$  [ $\text{м}^3/\text{кг}$ ] – это величина, обратная плотности:  $v = 1/\rho$ .

### 2.2.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

*Сжимаемость.* Свойство газа изменять объем под действием давления называют сжимаемостью. Сжимаемость характеризуется коэффициентом объемного сжатия  $\beta_p$  [ $\text{Па}^{-1}$ ], который представляет собой относительное изменение объема, приходящееся на единицу давления:

$$\beta_p = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p},$$

где  $V_0$  – начальный объем,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta V$  – изменение объема,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta P$  – изменение давления, Па.

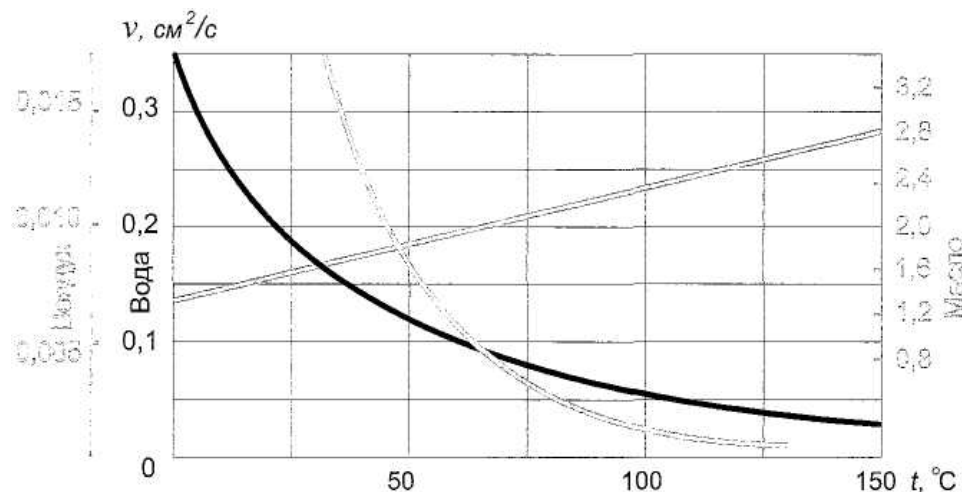
Знак «минус» в формуле обусловлен тем, что положительному приращению (увеличению) давления соответствует отрицательное приращение (уменьшение) объема  $V$ .

*Температурное расширение.* Температурное расширение характеризуется коэффициентом объемного расширения, который представляет собой относительное изменение объема при изменении температуры на 1 К:

$$\beta_T = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta T}.$$

*Вязкость.* Свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление сдвигу (скольжению) слоев жидкости или газа называют вязкостью. Вязкость – свойство, противоположное текучести (степени подвижности частиц жидкости или газа): более вязкие жидкости менее текучие и наоборот. Вязкость может быть охарактеризована коэффициентами динамической вязкости  $\eta$  и кинематической вязкости  $\nu$ .

Единицей измерения коэффициента динамической вязкости  $\eta$ , или коэффициента внутреннего трения, является паскаль-секунда [ $\text{Па}\cdot\text{с}$ ]. Используется также единица измерения пуаз [П] системы единиц СГС:  $1 \text{ П} = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Единицей



**Рис. 2.3. Зависимость кинематической вязкости  $\nu$  от температуры**

коэффициента кинематической вязкости  $\nu$  служит  $\text{м}^2/\text{с}$ ; применяют также единицу СГС стоке [Ст]:  $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 1 \text{ СИ м}^2/\text{с}$ .

Вязкость зависит от температуры (рис. 2.3), причем характер этой зависимости для жидкостей и газов различен: вязкость жидкостей с увеличением температуры уменьшается, тогда как вязкость газов, наоборот, увеличивается (для воздуха данная зависимость незначительна).

### 2.2.3. ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Состояние газа характеризуется тремя основными параметрами – абсолютным давлением, абсолютной температурой и плотностью (удельным объемом). Взаимосвязь этих параметров газа именуют уравнением состояния. Состояние газа, называемого идеальным, описывается уравнением Клапейрона–Менделеева:

$$P = \rho RT,$$

где  $P$  – абсолютное давление,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $R$  – удельная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; обычно для воздуха  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$ .

Идеальным газом называют такой газ, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, считающимися материальными точками, не имеющими объема. Несмотря на то, что воздух не является идеальным газом, для большинства газовых процессов, протекающих при давлениях, не превышающих 20 МПа (200 бар), это уравнение остается в достаточной мере справедливым.

Введя в данное уравнение формулу, определяющую плотность через массу и объем, получим соотношение, которое описывает состояние  $m$  килограммов идеального газа объемом  $V$ :

$$mR = PV/T.$$

Нетрудно заметить, что для какой-либо постоянной массы газа левая часть уравнения есть величина неизменная (константа):

$$PV/T = \text{const.}$$

Данное уравнение обобщает основные газовые законы: Бойля–Мариотта, Шарля и Гей-Люссака.

**Закон Бойля–Мариотта.** Если абсолютная температура газа остается постоянной, то произведение абсолютного давления газа на его объем есть также величина постоянная для данной массы газа; иными словами, давление газа обратно пропорционально его объему (рис. 2.4).

Газовые процессы, протекающие при постоянной температуре, называют изотермическими. Если при сжатии газа отсутствует теплообмен с окружающей средой, то такой процесс называют адиабатическим (адиабатным). Для него справедливо уравнение Пуассона

$$pV^k = \text{const},$$

где  $k$  – коэффициент Пуассона, или коэффициент (показатель) адиабаты (для воздуха  $k = 1,4$ ).

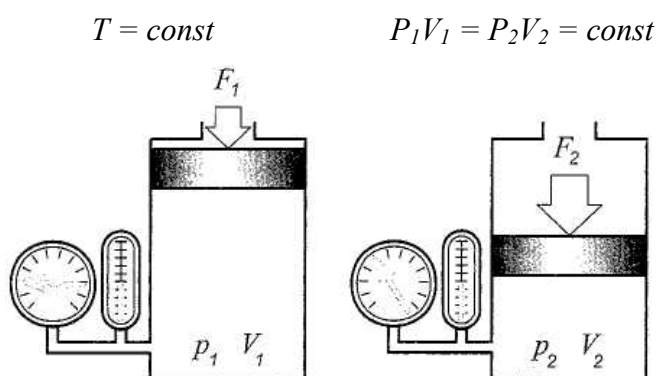
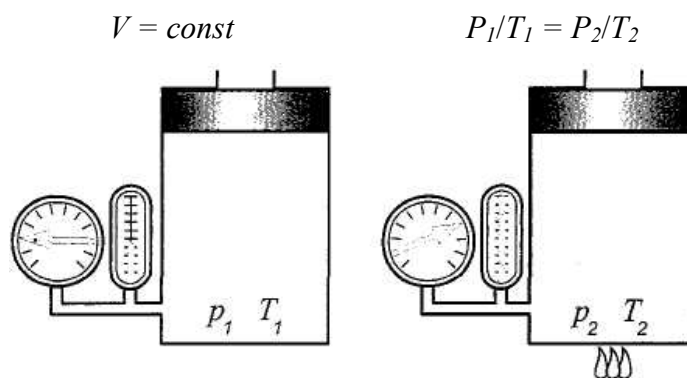


Рис. 2.4. Иллюстрация закона Бойля–Мариотта

**Закон Шарля.** Если замкнутый объем данной массы газа остается постоянным, то отношение абсолютного давления газа к его абсолютной температуре есть также величина постоянная; иными словами, давление газа прямо пропорционально его температуре.

Например, при нагревании газа в замкнутом объеме его давление возрастает, а при охлаждении, наоборот, падает (рис. 2.5).

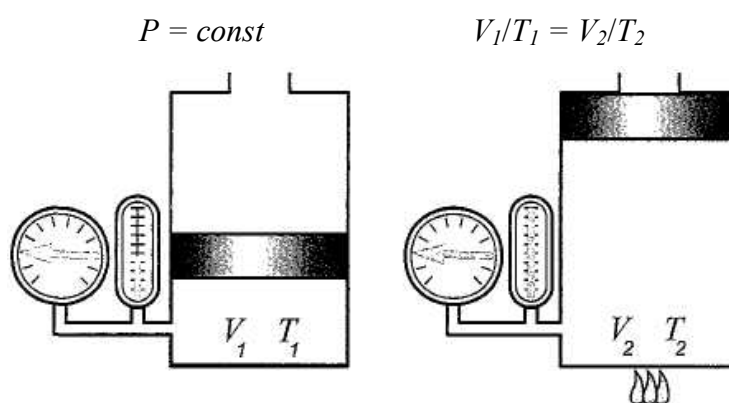


**Рис. 2.5.** Иллюстрация закона Шарля

Газовые процессы, протекающие при постоянном объеме, называют изохорическими (изохорными).

**Закон Гей-Люссака.** Если абсолютное давление газа остается постоянным, то отношение объема данной массы газа к его абсолютной температуре есть также величина постоянная; иными словами, объем прямо пропорционален температуре.

Например, при нагревании газа, находящегося под постоянным давлением, его объем увеличивается, а при охлаждении – уменьшается (рис. 2.6).



**Рис. 2.6.** Иллюстрация закона Гей-Люссака

Газовые процессы, протекающие при постоянном давлении, называют изобарическими (изобарными).

Поскольку параметры газа взаимосвязаны и могут изменяться в широком диапазоне значений, то количества газа, находящиеся в различных условиях, с целью их сравнения приводят к так называемым нормальным условиям.

Общепринятыми являются следующие параметры нормальных условий:

физические нормальные условия: давление  $1,013 \cdot 10^5$  Па (1,013 бар), температура 273,15 К (0 °С);

технические нормальные условия: давление  $1,013 \cdot 10^5$  Па (1,013 бар), температура 293,15 К (20 °С).

#### 2.2.4. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА

Выше мы рассмотрели такие параметры газа, как давление, температура, плотность, удельный объем. Течение же газа характеризуется еще одним параметром – расходом.

*Расход* – величина, определяемая отношением массы (массовый расход) или объема (объемный расход) вещества, равномерно перемещаемого через сечение, перпендикулярное направлению скорости потока, к промежутку времени, за который это перемещение происходит.

В технической литературе объемный расход обозначают латинской буквой  $Q$  (или  $Q_v$ ). Определяется объемный расход соотношением

$$Q = V/t,$$

где  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $V$  – объем, м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с.

Если речь идет о течении газа, к примеру, по трубопроводу, то объемный расход можно также представить как произведение площади поперечного сечения трубы на среднюю по сечению скорость движения газа в ней (рис. 2.7):

$$Q = vS,$$

где  $v$  – средняя по сечению скорость потока, м/с;  $S$  – площадь поперечного сечения трубопровода, м<sup>2</sup>.



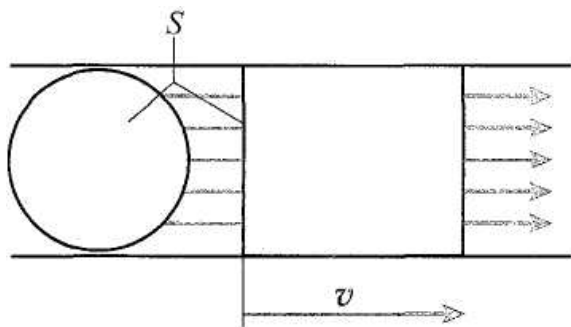


Рис. 2.7. Объемный расход

В общем случае газ принято рассматривать как сжимаемую вязкую жидкость. Одновременный учет того, что газ представляет собой сжимаемую среду и что при его движении проявляется действие сил трения, значительно затрудняет расчеты. Поэтому на практике во многих случаях прибегают к идеализации процессов движения газа, что упрощает расчеты, не приводя при этом к большим погрешностям.

Чтобы понять суть процессов, происходящих при течении газа, будем рассматривать его как несжимаемую невязкую (идеальную) жидкость.

Исходя из закона сохранения вещества, а также из предположения о сплошности (неразрывности) потока для установившегося течения несжимаемой жидкости, можно утверждать, что объемный расход через любое сечение одинаков (рис. 2.8).

Это явление описывается уравнением неразрывности

$$Q_1 = S_1 v_1 = S_2 v_2 = Q_2 = \text{const.}$$

Из данного уравнения следует, что в узком сечении трубы поток ускоряется:

$$v_2 = v_1 S_1 / S_2.$$

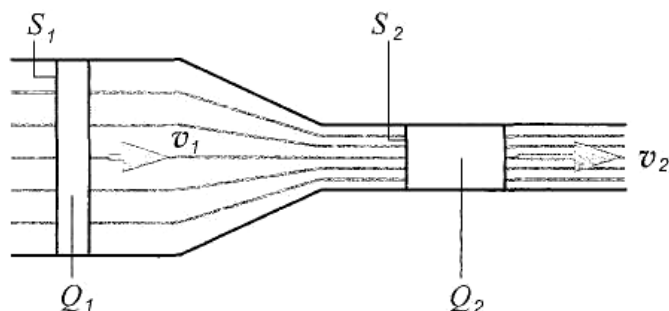


Рис. 2.8. Расход жидкости при течении по трубе переменного сечения

Результаты измерений давления в различных точках потока, движущегося по трубе с переменной площадью поперечного сечения (рис. 2.9), могут показаться, на первый взгляд, парадоксальными: в узком сечении давление меньше, чем в широком. По каким же причинам имеет место данное явление?

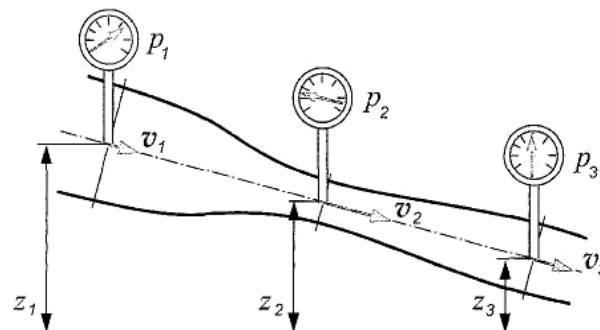


Рис. 2.9. Течение жидкости по трубе переменного сечения

Механическая энергия движущейся жидкости может иметь три формы: энергия положения, энергия давления и кинетическая энергия. В процессе движения идеальной жидкости одна форма энергии может превращаться в другую, однако полная удельная энергия жидкости остается неизменной. Математически данное положение описывается уравнением Бернулли:

$$gz_1 + p_1/\rho + v_1^2/2 = gz_2 + p_2/\rho + v_2^2/2 = gz_3 + p_3/\rho + v_3^2/2,$$

где  $gz$  – удельная энергия положения ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения);  $P$  – удельная энергия давления;  $v^2/2$  – удельная кинетическая энергия.

Таким образом, снижение уровня давления жидкости в узком сечении трубы обусловлено тем, что ускорение потока сопровождается возрастанием его кинетической энергии и, следовательно, уменьшением энергии давления.

В ряде случаев удобно применять форму записи уравнения Бернулли, при которой члены уравнения имеют размерность давления:

$$gz_1 + p_1 + \rho v_1^2/2 = gz_2 + p_2 + \rho v_2^2/2,$$

где  $pgz$  – весовое давление;  $p$  – гидромеханическое давление (или просто давление);  $\rho v^2/2$  – динамическое давление.

В практических расчетах недопустимо пренебрегать потерями энергии по длине трубопровода, а также на местных сопротивлениях. Все реальные жидкости

и газы имеют вязкость, и поэтому энергия потока жидкости или газа будет убывать от сечения к сечению по направлению его движения. Потери энергии определяются многими факторами: площадью поперечного сечения и длиной трубопровода, шероховатостью его внутренней поверхности, наличием местных сопротивлений, скоростью и режимом течения, вязкостью (внутренним трением) жидкости или газа.

Уравнение Бернулли для потока реальной (вязкой) жидкости в энергетической форме будет иметь следующий вид:

$$gz_1 + p_1/\rho + \alpha_1 v_1^2/2 = gz_2 + p_2/\rho + \alpha_2 v_2^2/2 + g\Sigma h_n,$$

где  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока ( $\alpha/1$ );  $g\Sigma h_n$  – суммарные потери энергии (гидравлические потери).

Уравнение Бернулли применимо к потоку сжатого воздуха при условии, что скорость его движения меньше скорости звука.

Существует два режима течения жидкостей и газов по трубе: ламинарный и турбулентный.

Ламинарный режим характеризуется упорядоченным движением (слоями) жидкости или газа, причем скорости внешних слоев меньше, чем внутренних. Когда скорость движения превысит некоторую критическую величину, слои начинают перемешиваться, образуются вихри; течение становится турбулентным, возрастают потери энергии.

При течении жидкости по трубопроводу переход от ламинарного режима к турбулентному наблюдается в тот момент, когда осредненная по сечению трубы скорость движения потока становится равной критической  $v_{кр}$ .

Как показывает эксперимент, критическая скорость прямо пропорциональна кинематической вязкости  $\nu$  жидкости и обратно пропорциональна внутреннему диаметру  $d$  трубы:

$$v_{кр} = kv/d,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $m^2/c$ ;  $d$  – внутренний диаметр трубы, м.

Экспериментально был также подтвержден тот факт, что смена режима течения любой жидкости или газа по трубе любого диаметра имеет место лишь при определенном значении безразмерного коэффициента  $k$ . Данный коэффициент называют критическим числом Рейнольдса:

$$Re_{кр} = v_{кр}d/\nu.$$

Для труб круглого сечения  $Re_{кр} \sim 2300$ .

Число Рейнольдса используют для описания режима течения:

$$Re = Vd/\nu = v\rho d/\mu.$$

Значение числа Рейнольдса позволяет судить о характере течения жидкости по трубе: при  $Re < Re_{кр}$  наблюдается ламинарный режим, при  $Re > Re_{кр}$  – турбулентный.

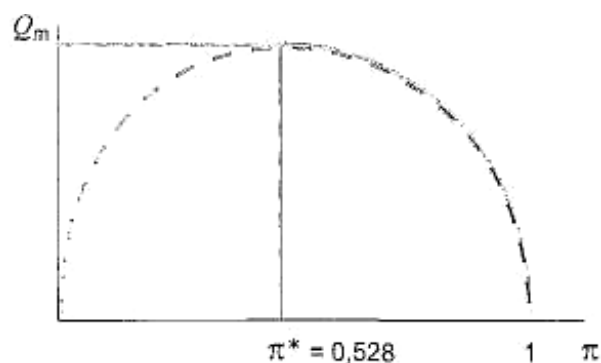
Таким образом, зная скорость движения потока, вязкость жидкости и внутренний диаметр трубы, можно расчетным путем найти число Рейнольдса и, сравнив его с величиной  $Re_{кр}$ , определить режим течения жидкости.

При расчетах пневматических систем необходимо знать зависимости объемного и массового расходов воздуха через отверстие от отношения давлений на входе в отверстие и на выходе из него. Если пренебречь теплообменом газа с окружающей средой и внутренним трением газа, то его течение можно считать изоэнтропическим (адиабатическим).

Массовый расход при изоэнтропическом течении рассчитывается по формуле Сен-Венана–Венцеля.

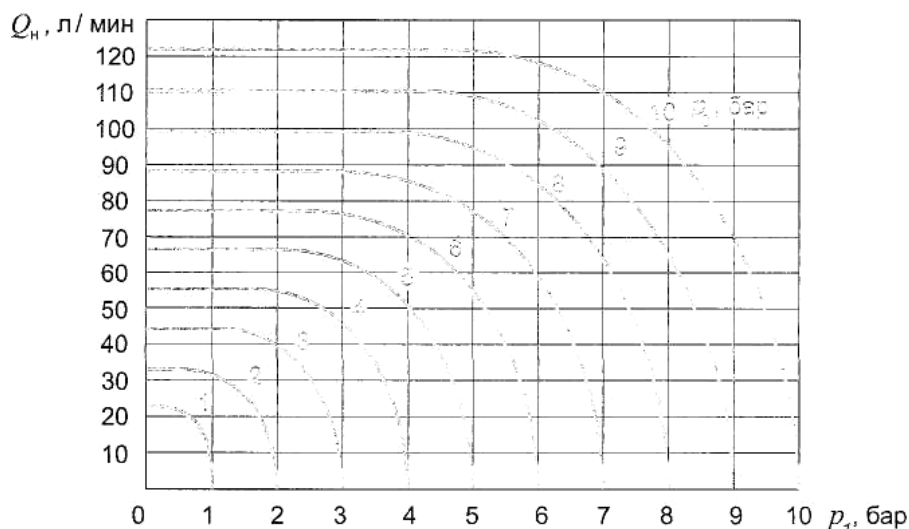
Если на основании данной формулы построить график функции  $Q_m = f(\pi)$ , то он будет иметь вид, аналогичный характеру пунктирной кривой на рис. 2.10.

Функция  $Q_m = f(\pi)$  достигает максимума при критическом значении  $\pi = 0,528$ . Однако экспериментально установлено, что уменьшение давления на выходе (приводящее к уменьшению зна-



**Рис. 2.10.** Зависимость массового расхода  $Q_m$  от отношения давлений  $\pi = P_1/P_0$

чения  $\kappa$ ) сопровождается увеличением массового расхода  $Q_m$  воздуха только до тех пор, пока скорость потока воздуха не превышает скорость звука – максимально возможной скорости истечения в отсутствие специальных приспособлений. Дальнейшее уменьшение давления на выходе не влияет на массовый расход (сплошная кривая на рис. 2.10).



**Рис. 2.11. Расходно-перепадные характеристики для диафрагмы с площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$**

При значениях  $\pi < 0,528$  массовый расход подсчитывают по формуле

$$Q_m = \varepsilon f p_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Для вычисления объемного расхода следует привести массовый расход к плотности. Поскольку при истечении через отверстие значения плотности воздуха на его входе и выходе различны, т.е.  $\rho = f(P)$ , то будут различаться и значения объемного расхода на входе и на выходе.

Необходимо обратить внимание на следующую особенность течения газов (в частности, сжатого воздуха): объемный расход газов (например, при течении через диафрагму) зависит (в отличие от расхода жидкостей) не только от перепада давления  $\Delta P = P_0 - P_g$ , но и от давления на входе  $P_0$  (рис. 2.11).

Приведенные характеристики показывают, что при перепаде давления  $\Delta p = 0,1 \text{ МПа}$  (1 бар) и начальном давлении сжатого воздуха  $P_0 = 1 \text{ МПа}$  (10 бар)

расход  $Q_n$  при технических нормальных условиях через диафрагму составляет 70 л/мин, а при таком же значении  $\Delta P - P_0 = 0,5$  МПа (5 бар) – всего 50 л/мин.

### 2.3. ПРОИЗВОДСТВО СЖАТОГО ВОЗДУХА

В промышленности используются различные конструкции машин для подачи воздуха под общим названием воздуходувки. При создании избыточного давления до 0,015 МПа они называются вентиляторами, а при давлении свыше 0,115 МПа – компрессорами.

Вентиляторы относятся к лопастным машинам динамического действия и кроме своего основного назначения – проветривания – применяются в пневмотранспортных системах и низконапорных системах пневмоавтоматики.

В пневмоприводах источником энергии служат компрессоры с рабочим давлением в диапазоне 0,4 – 1,0 МПа. Они могут быть объемного (чаще поршневые) или динамического (лопастные) действия. Теория работы компрессоров изучается в специальных дисциплинах.

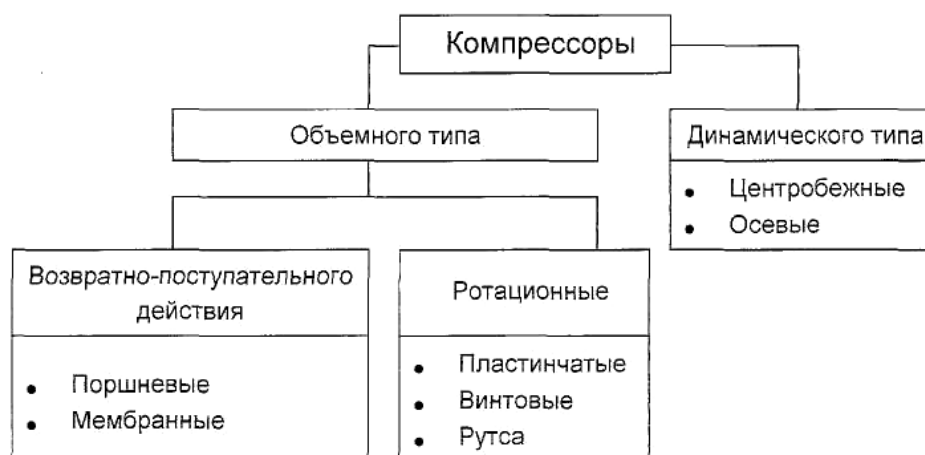
По виду источника и способу доставки пневмоэнергии различают магистральный, компрессорный и аккумуляторный пневмопривод.

Магистральный пневмопривод характеризуется разветвленной сетью стационарных пневмолиний, соединяющих компрессорную станцию с цеховыми, участковыми потребителями в пределах одного или нескольких предприятий. Компрессорная станция оборудуется несколькими компрессорными линиями, обеспечивающими гарантированное снабжение потребителей сжатого воздуха с учетом возможной неравномерной работы последних. Это достигается установкой промежуточных накопителей пневмоэнергии (ресиверов) как на самой станции, так и на участках. Пневмолинии обычно резервируются, чем обеспечивается удобство их обслуживания и ремонта.

На производство сжатого воздуха расходуется около 20% всей электроэнергии, потребляемой промышленностью. Поэтому он является одним из самых дорогих энергоносителей, используемых в современном производстве. На предприятиях, где широко применяются пневматические приводы и системы, обычно существует центральная сеть питания сжатым воздухом. Диапазон давлений в ней, принятый как у нас в стране, так и за рубежом, составляет 0,4 – 1,0 МПа (4 – 10 бар).

### 2.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОМПРЕССОРОВ

По физическому принципу работы различают компрессоры объемного и динамического типов. Классификация компрессоров по конструктивному исполнению гораздо шире (рис. 2.12).



**Рис. 2.12. Классификация компрессоров**

В объемных компрессорах, работающих по принципу вытеснения, воздух замыкают в рабочей камере и затем уменьшают ее объем, после чего рабочая камера соединяется с отводящим (нагнетательным) трубопроводом.

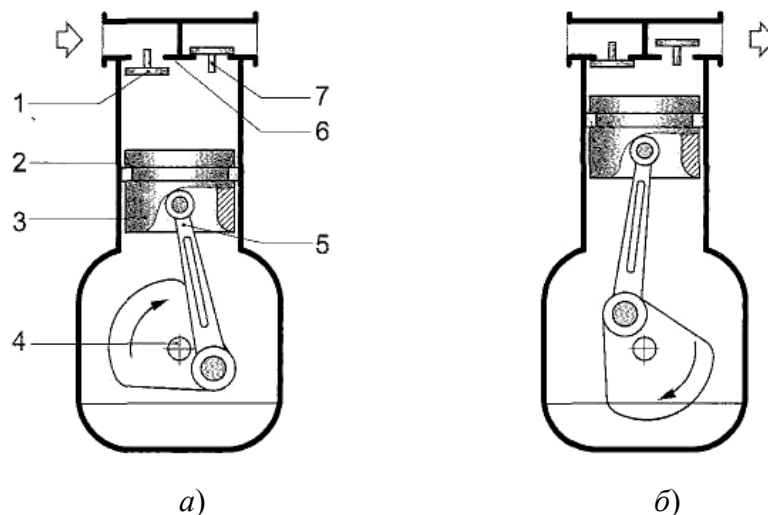
В динамических компрессорах воздух поступает на рабочий орган, сообщаящий ему кинетическую энергию, которая на выходе компрессора преобразуется в потенциальную.

Для получения высоких давлений при небольшой производительности используют компрессоры объемного типа (исключая компрессоры Рутса), а для получения больших расходов при относительно малом давлении – компрессоры динамического типа.

### 2.3.2. ОБЪЕМНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

*Поршневые компрессоры.* Наиболее широкое применение находят поршневые компрессоры.

Существует множество типов поршневых компрессоров. Они бывают простого и двойного действия, одноступенчатые и многоступенчатые, одноцилиндровые и многоцилиндровые, с воздушным и водяным охлаждением.



**Рис. 2.13. Поршневой компрессор**

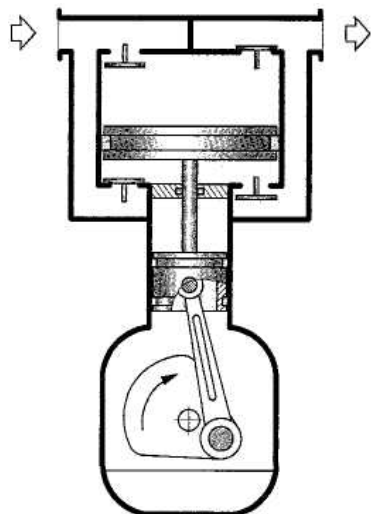
Основными деталями поршневого компрессора простого действия (рис. 2.14) являются: цилиндр 2 с нагнетательным 7 и всасывающим 1 клапанами в крышке б; поршень 3; кривошипно-шатунный механизм 5, преобразующий вращательное движение приводного вала 4 в возвратно-поступательное движение поршня.

При движении поршня к нижней «мертвой точке» (обратный ход – рис. 2.13, а) рабочая камера компрессора, образованная замкнутым объемом между поршнем 3 и крышкой б цилиндра, увеличивается и в ней создается вакуум. Под действием атмосферного давления открывается всасывающий клапан 1, через который в цилиндр поступает воздух. В это время нагнетательный клапан 7 удерживается в закрытом положении под действием вакуума в рабочей камере и высокого давления в нагнетательном трубопроводе. После достижения поршнем 3 крайнего положения начинается процесс его движения к верхней «мертвой точке» (прямой ход – рис. 2.13, б). Объем рабочей камеры начинает уменьшаться, давление в ней возрастает, и всасывающий клапан закрывается. Нагнетательный клапан открывается тогда, когда давление в цилиндре превысит давление в линии нагнетания. Полный цикл такого компрессора совершается за два хода поршня – обратный и прямой, т.е. за один оборот приводного вала.

Для увеличения производительности иногда применяют поршневые компрессоры двойного действия (рис. 2.14).

Компрессор, выполненный по такой конструктивной схеме, имеет две рабочие камеры при одном поршне, а всасывающие и нагнетательные клапаны уста-



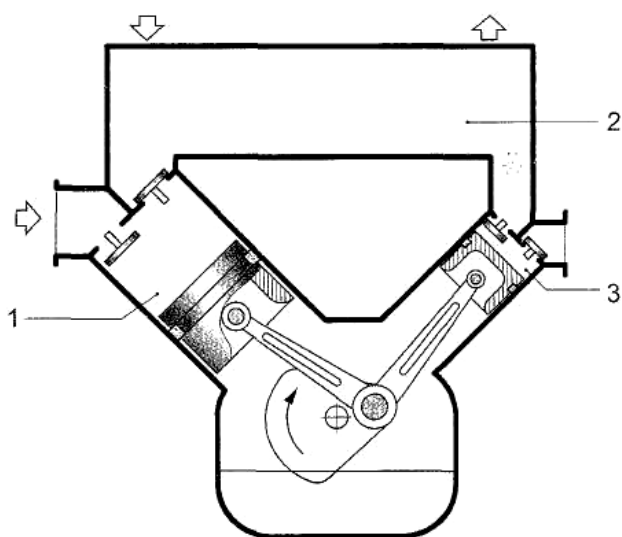


**Рис. 2.14. Поршневой компрессор двойного действия**

новлены в обеих крышках. При ходе поршня вниз в верхней рабочей камере происходит процесс всасывания, а в нижней – процесс нагнетания. При движении поршня вверх сжатый воздух подается в напорную линию из верхней рабочей камеры, в то время как процесс всасывания осуществляется в нижней. Производительность компрессора двойного действия практически в два раза выше производительности компрессора традиционной конструкции при одинаковых объемах рабочих камер.

Одноступенчатые компрессоры позволяют получить сжатый воздух с избыточным давлением до 1,3 МПа (13 бар), а развиваемая ими производительность достигает 20 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

Для достижения более высоких значений давления сжатого воздуха (до 100 МПа) используют поршневые компрессоры многоступенчатого исполнения (рис. 2.15).



**Рис. 2.15. Двухступенчатый поршневой компрессор**

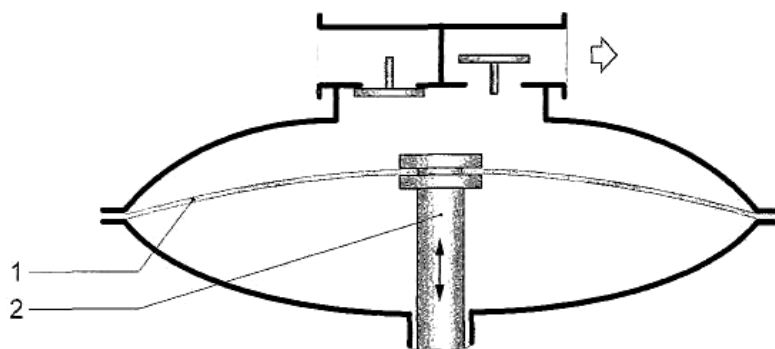
Всасываемый воздух предварительно сжимается в первой ступени 1, проходит промежуточное охлаждение, а затем подвергается сжатию во второй ступени 3. Увеличение степени сжатия воздуха обеспечивается тем, что объем рабочей камеры второй ступени меньше, чем первой. Необходимость охлаждения сжатого

воздуха возникает в связи с интенсивным нагревом воздуха в процессе сжатия (в соответствии с законом Гей-Люссака), особенно если степень сжатия значительна. Чтобы избежать этого, в конструкцию компрессора вводят охладитель 2.

Поршневые компрессоры подают воздух в нагнетательный трубопровод неравномерно, отдельными порциями. Степень неравномерности увеличивается еще и вследствие того, что скорость движения поршня не постоянна, а изменяется по синусоидальному закону. Для сглаживания неравномерности подачи воздуха, а следовательно, и пульсаций давления в линии нагнетания применяют многопоршневые компрессоры, ходы поршней которых сдвинуты по фазе.

Все рассмотренные конструкции имеют один существенный недостаток: в картер поршневых компрессоров заливают масло, предназначенное для смазки трущихся поверхностей. Высокие температуры в поршневом пространстве компрессоров и на начальном участке линии питания приводят к парообразованию и к частичному термическому разложению масла. В результате часть масла окисляется и в виде нагара и лакообразной пленки осаждается на внутренних полостях компрессоров и трубопроводов, а легкие фракции, в виде паров и мелкодисперсной фазы, уносятся воздухом в систему.

*Мембранный компрессор.* Сжатый воздух, не содержащий паров масла, можно получить без применения маслоудерживающих фильтров при помощи мембранного компрессора (рис. 2.16).



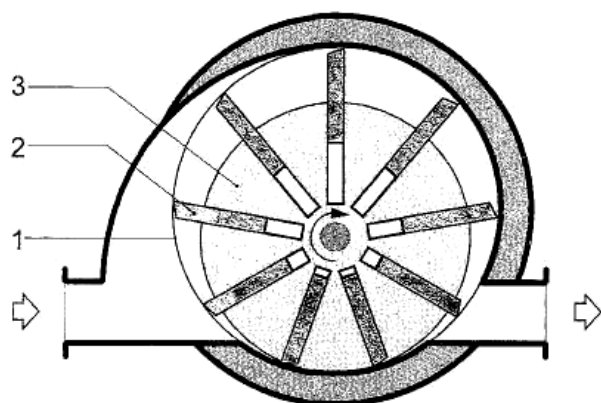
**Рис. 2.16. Мембранный компрессор**

В мембранном компрессоре процесс получения сжатого воздуха происходит в принципе так же, как и в поршневом, с той лишь разницей, что в нем подвижной поршень заменен жестко закрепленной гибкой мембраной 1. Замкнутый объем

изменяется за счет деформации мембраны при возвратно-поступательном движении штока 2.

Давление воздуха в мембранных компрессорах ограничено прочностными характеристиками мембраны и не превышает 0,3 МПа.

Основной недостаток мембранных компрессоров – необходимость периодической смены мембраны по причине выхода ее из строя.



**Рис. 2.17. Пластинчатый (шиберный) компрессор**

*Ротационные компрессоры.* Ротационные компрессоры, как и поршневые, работают с принудительным выталкиванием сжатого воздуха, однако в их конструкции отсутствуют клапаны и кривошипно-шатунный механизм. На рисунке 2.17 изображен ротационный пластинчатый компрессор.

В машинах такого типа вследствие эксцентричного расположения ротора 3 в цилиндрическом статоре 1 между ними образуется серповидная полость. В радиальных пазах ротора 3 размещены подвижные пластины 2, которые под действием центробежной силы при вращении ротора выдвигаются из пазов и плотно прижимаются к внутренней цилиндрической поверхности статора 1 (часто применяют еще и дополнительный принудительный поджим пластин при помощи пружин либо путем подведения к торцам пластин сжатого воздуха от линии нагнетания). Вращающиеся пластины делят пространство между ротором и статором на рабочие камеры, объем которых меняется по мере вращения ротора. За один оборот ротора объем рабочих камер вначале увеличивается (при этом пластины выдвигаются из пазов), а затем уменьшается (при этом пластины задвигаются в пазы). В том месте, где при вращении ротора объем рабочих камер увеличивается, расположен входной патрубок, а на участке, где их объем уменьшается, – выходной. Степень сжатия, а следовательно, и значение давления на выходе пластинчатого компрессора (до 0,8 МПа) значительно меньше, чем у поршневого, но его конструктивное исполнение гораздо проще.

Основные элементы конструкции винтового компрессора – два находящихся в зацеплении винта (рис. 2.18) ведущий 1 и ведомый 2. При вращении винтов их винтовые линии, взаимно замыкаясь, отсекают некоторый объем воздуха в камере всасывания, перемещают его вдоль оси винтов и в конечном итоге вытесняют в камеру нагнетания.

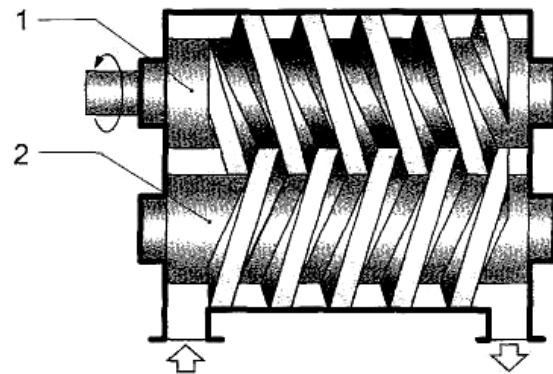


Рис. 2.18. Винтовой компрессор

Воздух через компрессор двигается поступательно и плавно, без завихрения, как гайка по резьбе при вращении винта.

Процесс перемещения воздуха происходит по всей длине винтов непрерывно, и при постоянной частоте вращения вала компрессора обеспечивается равномерная, без пульсаций, подача. Недостаток винтовых компрессоров – довольно сложная технология изготовления винтов; преимущество – равномерность подачи воздуха, а следовательно, отсутствие колебаний уровня давления в линии нагнетания. Винтовые компрессоры обеспечивают давление сжатого воздуха до 2,5 МПа, а расход воздуха в них достигает 30 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

На рисунке 2.19 изображен компрессор Рутса, также относящийся к ротационным компрессорам.

Рабочими органами такого компрессора служат два синхронно вращающихся специально спрофилированных вытеснителя 1. Воздух, попадая в рабочие камеры, образованные между вытеснителями и корпусом 3, переносится из зоны всасывания в зону нагнетания. Рабочие органы не находятся в зацеплении друг с другом, а синхронизация их вращения осуществляется шестернями 2, расположенными в специальном отделении корпуса и находящимися в зацеплении между собой. Между самими вытеснителями, а также между вытеснителями и корпусом имеются гарантированные зазоры, и эта особенность конструкции обуславливает относительно небольшие значения вы-

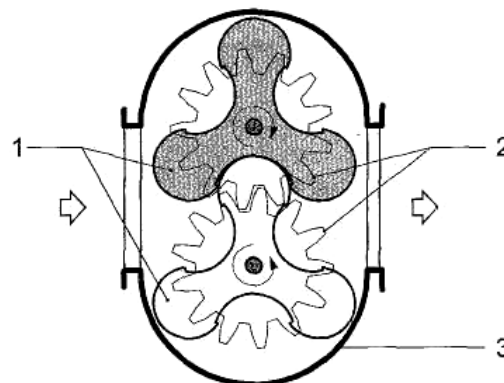


Рис. 2.19. Компрессор Рутса

ходного давления. Практическое отсутствие трущихся поверхностей в рабочей камере обеспечивает возможность достижения большой производительности благодаря высокой частоте вращения роторов.

### 2.3.3. ДИНАМИЧЕСКИЕ КОМПРЕССОРЫ

В центробежных компрессорах (турбокомпрессорах) основным элементом конструкции служит расположенное в спиральном отводе 2 рабочее колесо 1, представляющее собой диск со специально спрофилированными лопатками (рис. 2.20).

Всасываемый воздух поступает в осевом направлении к центру колеса. При вращении ротора лопатки раскручивают воздух и одновременно вовлекают его в относительное движение по образованным ими каналам. Под действием центробежной силы воздух движется от центра колеса к периферии. Таким образом, потоку воздуха сообщается кинетическая энергия, которая при протекании его по специально спрофилированным направляющим и отводящим устройствам преобразуется в энергию давления. Как правило, центробежные компрессоры изготавливают многоступенчатыми, т.е. с несколькими рабочими колесами, устанавливаемыми на одном валу. Требуемая степень сжатия воздуха обеспечивается его последовательной подачей с выхода одного колеса на вход другого. Основное преимущество компрессоров этого типа – большая производительность (до 400 тыс. м<sup>3</sup>/ч).

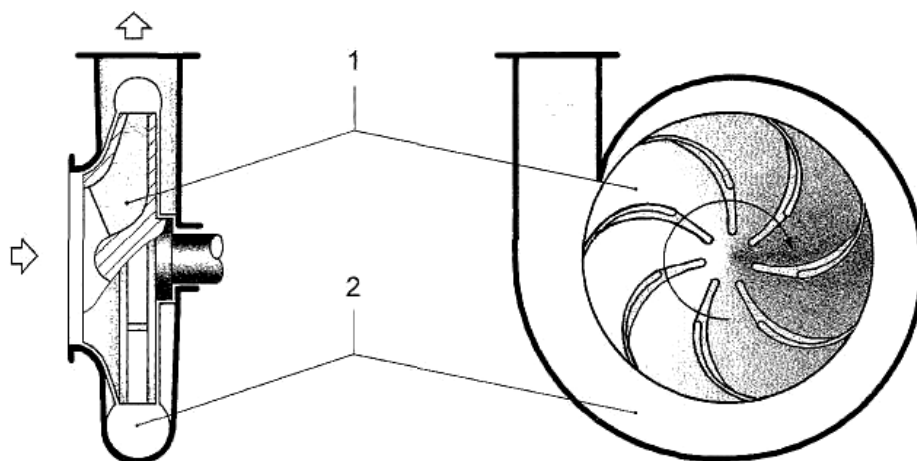


Рис. 2.20. Центробежный компрессор

Это же преимущество характерно и для осевых компрессоров (рис. 2.21).

Поток воздуха в них имеет осевое направление. Основным конструктивным элементом – вращающийся ротор 1, на поверхности которого укреплены рабочие лопатки 2. Осевые компрессоры развивают давление воздуха до 0,4 МПа, а их производительность достигает значений более 50 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

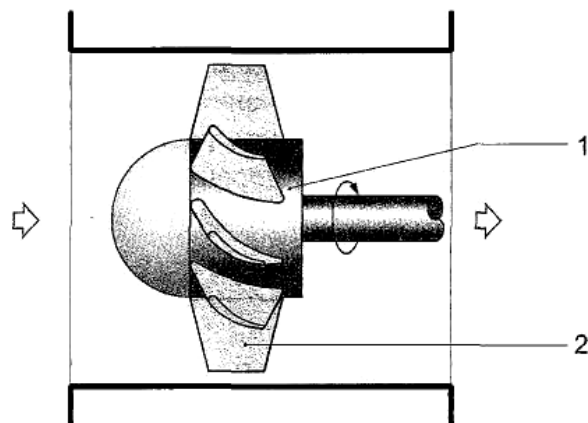


Рис. 2.21. Осевой компрессор

Производство сжатого воздуха сопровождается значительным потреблением электроэнергии. Например, при получении 10 м<sup>3</sup> сжатого воздуха под давлением 0,6 МПа с использованием поршневого компрессора затраты электроэнергии составляют 0,76 – 0,98 кВт·ч, а с использованием турбокомпрессора – 0,82 – 1,77 кВт·ч. При этом чем выше производительность компрессора, тем ниже затраты электроэнергии на каждый 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха. Следовательно, стоимость производства сжатого воздуха зависит от типа компрессора и от его производительности. Несложный расчет показывает, что сжатый воздух необходимо расходовать экономно и не допускать бесполезных утечек через неплотности в пневматических агрегатах и особенно в трубопроводах.

На принципиальных пневматических схемах условное графическое обозначение компрессора, каким бы ни было его конструктивное исполнение, согласно действующим стандартам имеет следующий вид (рис. 2.22, а):

Незакрашенный треугольник своей вершиной, лежащей на окружности, указывает направление движения потока сжатого воздуха (рис. 2.22, б).

Изображение простейшей компрессорной установки, состоящей из компрессора, воздухозаборника на линии всасывания, приводного электродвигателя и соединительной муфты, принимает, таким образом, следующий вид (рис. 2.22, в).

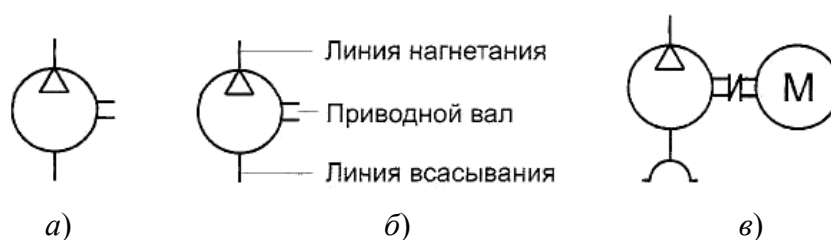


Рис. 2.22. Условное графическое обозначение компрессора

Чтобы производительность компрессора соответствовала изменяющемуся потреблению сжатого воздуха, необходимо регулировать давление, развиваемое компрессором, в диапазоне от максимального до минимального. На практике применяют различные виды регулирования.

*Регулирование по нагрузке.* Уровень давления в напорной магистрали регулируется путем изменения частоты вращения приводного двигателя компрессора.

*Регулирование периодическим отключением.* При достижении заданного максимального уровня давления приводной двигатель компрессора отключается. Включение двигателя производится при снижении величины давления до минимально допустимого значения. Чтобы обеспечить приемлемую периодичность включений–выключений компрессора, необходимо иметь резервный запас сжатого воздуха на его выходе, который создается с помощью ресивера. Для предотвращения выхода воздуха из ресивера в атмосферу через неработающий компрессор на выходе последнего (в напорной магистрали) устанавливают обратный клапан (рис. 2.23).

Обратный клапан предназначен для пропускания потока воздуха только в одном направлении. При этом запорный элемент 1 отжимается от седла 2 клапана потоком воздуха. Когда же воздух подается в обратном направлении, клапан закрывается под действием оказываемого им давления и встроенной пружины.

*Регулирование холостым ходом.* Различают регулирование на входе, на выходе и коротким замыканием. Регулирование на входе выполняют следующими способами:

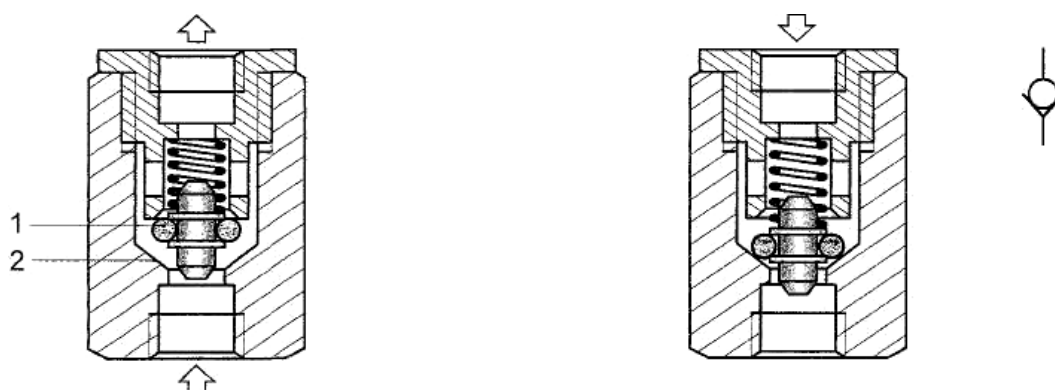


Рис. 2.23. Обратный клапан

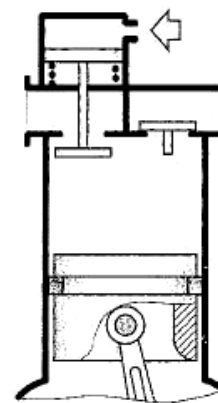
а) прекращение подачи осуществляется путем перекрытия всасывающей магистрали компрессора;

б) всасывающий клапан компрессора удерживается открытым посредством встроенного привода, что не позволяет воздуху в рабочей камере сжиматься (рис. 2.24).

*Регулирование на выходе* состоит в том, что на линии нагнетания компрессора устанавливают устройство разгрузки, через которое сжатый воздух начинает стравливаться в атмосферу при достижении максимально допустимого давления.

*Регулирование коротким замыканием* заключается в том, что вход и выход компрессора закоротывают, компрессор работает «сам на себя».

Компрессорные установки размещают в помещениях, обеспечивающих защиту от шума, создаваемого оборудованием, расположенным на основных производственных площадях. Место установки должно обеспечивать свободный доступ к компрессору для его обслуживания и эксплуатации. Чтобы свести к минимуму гидравлические сопротивления, всасывающие трубопроводы выполняют по возможности короткими и с большими проходными сечениями. Всасываемый воздух должен быть сухим, холодным и без пыли, поэтому воздухозаборные устройства рекомендуется располагать на высоте 4 – 6 м.



**Рис. 2.24. Управление всасывающим клапаном компрессора**

#### 2.3.4. БЛОКИ ПОДГОТОВКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Чтобы преобразовать воздух из окружающей среды в рабочее тело пневматического привода, над ним необходимо произвести ряд последовательных действий: сжать до требуемого значения давления, осушить и очистить. Для нормальной работы пневмоприводов необходимо, чтобы загрязненность сжатого воздуха не превышала допустимого уровня. Основные загрязнители воздуха – вода и компрессорное масло в жидком и парообразном состояниях, а также твердые и газообразные вещества.

Источником воды, содержащейся в сжатом воздухе, является водяной пар, засасываемый компрессором вместе с атмосферным воздухом. Для характери-



ки влагосодержания (влажности) воздуха используются понятия абсолютной и относительной влажности.

Абсолютная влажность ( $\text{г/м}^3$ ) – это масса паров воды, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

Влажность насыщенного пара – это наибольшая масса паров воды, которые могут содержаться в  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данной температуре.

Относительная влажность, измеряемая в процентах, определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{f_{\text{абс}}}{f_{\text{нп}}} \times 100\%.$$

Способность некоторого постоянного объема сжатого воздуха удерживать пары воды зависит от температуры и не зависит от давления.

При понижении температуры воздух насыщается водяными парами, его относительная влажность возрастает. В момент, когда относительная влажность достигает значения 100% (состояние насыщения), начинается конденсация избыточного количества водяных паров и появляется вода (конденсат). Температура, при которой имеет место данное явление, называется точкой росы. При более высокой температуре конденсация водяных паров не наблюдается. Поэтому точку росы часто указывают в качестве меры содержания в воздухе водяных паров.

Источниками загрязнения сжатого воздуха маслом могут быть смазочные материалы компрессоров и пневматических устройств, пары и распыленное в окружающем воздухе масло. В сжатом воздухе масло обычно находится в парообразном и жидком состояниях. Предельная концентрация паров масла в воздухе, как и паров воды, уменьшается с понижением температуры и повышением давления. Попадание в линию питания смазочных материалов компрессоров обычно является основной причиной загрязнения сжатого воздуха.

Качественным считается такой сжатый воздух, в котором содержание паров воды и масла настолько мало, что исключается образование капель и льда в элементах и устройствах при любых возможных температурах окружающей среды, а уровень содержания пыли не приводит к закупорке их наиболее узких участков.

Таким образом, в источник питания сжатым воздухом должны входить:

- компрессор;

- фильтр для очистки воздуха от пыли;
- маслоотделитель;
- устройства осушки и охлаждения сжатого воздуха;
- ресивер – емкость для создания резервного запаса воздуха.

Несмотря на принимаемые меры по централизованной очистке и осушке сжатого воздуха в магистральных трубопроводах, сохраняется вероятность попадания загрязнителей различного происхождения в воздух, поступающий непосредственно к потребителю. Для обеспечения стабильного уровня давления и окончательной подготовки сжатого воздуха непосредственно у потребителя устанавливают ряд устройств кондиционирования, объединенных в блоки или выполненных в виде моноблоков. Эти устройства называются блоками подготовки воздуха. В зависимости от конструктивного исполнения пневмоэлементов, входящих в конкретный пневмопривод, состав и количество устройств, составляющих блок подготовки воздуха, могут быть различными. Рассмотрим его базовые элементы.

Фильтр-влагоотделитель. Конструкция, принцип действия и условное графическое обозначение фильтра-влагоотделителя рассмотрено ранее. Это устройство предназначено для удаления из сжатого воздуха механических включений (грязь, окалина, ржавчина) и конденсата.

Выбор фильтра-влагоотделителя для каждого конкретного привода осуществляется путем подбора устройства с требуемыми характеристиками по промышленным каталогам. Каталоги различных фирм-производителей могут отличаться по своей информативности, но все они, как правило, содержат следующие параметры: номинальный расход; диапазон рабочих давлений; диапазон рабочих температур; тонкость фильтрации; объем емкости для сбора конденсата; габаритные и присоединительные размеры; материалы конструктивных элементов.

Нормальная работа фильтра-влагоотделителя гарантируется только в определенном диапазоне температур и расходов воздуха, а степень фильтрации зависит от размера ячеек сменного фильтроэлемента. Замена стандартного фильтроэлемента на фильтр тонкой очистки приводит к снижению расхода воздуха, проходящего через аппарат.

На практике желательно применять фильтры-влагоотделители с автоматическим отводом конденсата, которые не допускают обводнения пневмосистемы и

не требуют затрат рабочего времени на открытие и закрытие сливных кранов. Ручные устройства более просты и надежны, однако применять их следует тогда, когда мала опасность накопления конденсата сверх допустимого уровня, а сброс воздуха в атмосферу осуществляется не чаще одного раза в смену. При отсутствии дренажной системы рекомендуется отводить конденсат в специальные емкости и периодически удалять его оттуда.

**Редукционный клапан.** Давление сжатого воздуха обычно не находится на строго заданном уровне, а колеблется в определенном диапазоне, что обусловлено рядом факторов: режимом работы компрессорной станции, запасом воздуха в ресивере, числом подключенных потребителей. Практический опыт показывает: наиболее эффективно пневматические системы функционируют при стабильных уровнях давления сжатого воздуха 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>) в исполнительной части системы и 0,3–0,4 МПа – в управляющей. Указанные параметры обеспечиваются редукционными пневмоклапанами, которые понижают рабочее давление и поддерживают заданный его уровень на выходе вне зависимости от колебаний давления в системе подачи воздуха перед клапаном и от изменения расхода воздуха за клапаном (у потребителя).

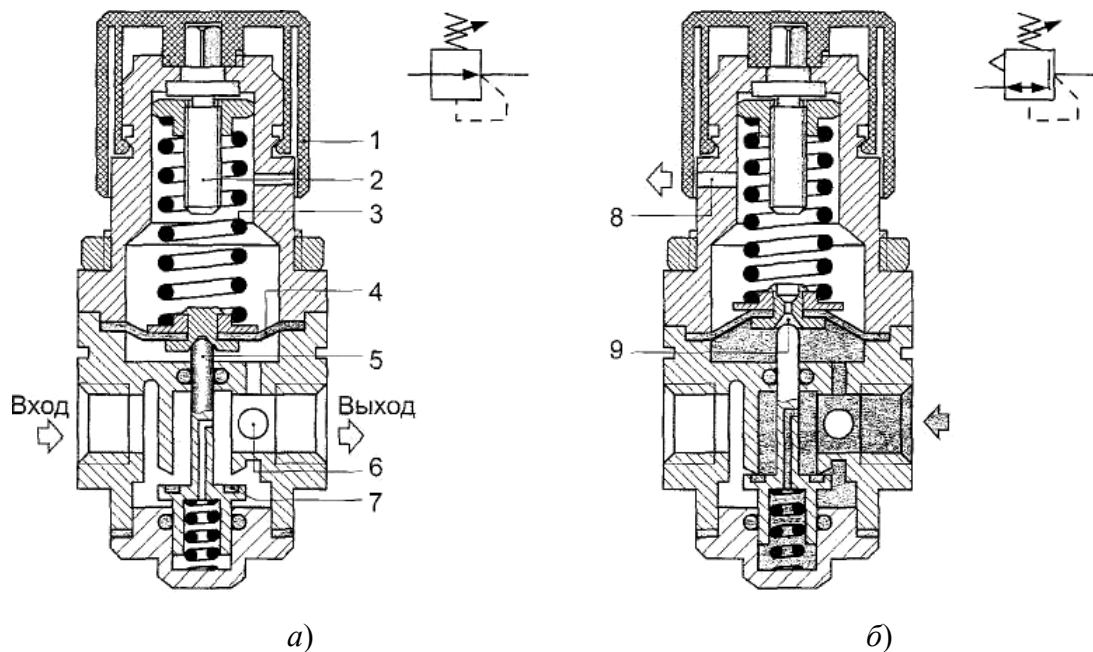
Установка в системе нескольких редукционных клапанов позволяет независимым образом поддерживать различные уровни давления в отдельных ее частях.

Применяемые в пневмоприводах редукционные клапаны различают по следующим основным признакам:

- способ настройки выходного давления (механическая или пневматическая настройка);
- возможность сброса избыточного выходного давления (с клапаном сброса или без него).

Рассмотрим конструкцию и принцип действия редукционного клапана с ручной настройкой и без сброса избыточного выходного давления (рис. 2.25, а).

Давление на выходе редукционного клапана регулируется путем создания перепада давления на седельном клапане 7 (между входным и выходным каналами). Проходное сечение клапана 7 автоматически меняется в зависимости от положения мембраны 4, которая с одной стороны воспринимает усилие, создаваемое нагрузочной пружиной 3, а с другой – усилие, обусловленное выходным давлением.



**Рис. 2.25. Редукционные клапаны:**

*а* – двухлинейный; *б* – трехлинейный

В исходном положении (давление на выходе отсутствует) седельный клапан 7 под действием усилия от нагрузочной пружины 3, передаваемого через мембрану 4 и толкатель 5, открыт, благодаря чему сжатый воздух проходит со входа на выход аппарата.

При повышении давления на выходе мембрана выгибается, сжимая регулировочную пружину 3; проходное сечение седельного клапана 7 уменьшается, и при достижении требуемого давления происходит полное его закрытие.

Возрастание расхода сжатого воздуха у потребителя сопровождается понижением выходного давления, в результате чего нагрузочная пружина разжимается, вызывая прогиб мембраны и увеличение проходного сечения клапана, что приводит, в свою очередь, к увеличению расхода воздуха через редукционный клапан и повышению давления на его выходе.

Таким образом, седельный клапан, управляемый мембраной, автоматически «отслеживает» выходное давление путем непрерывной корректировки своего проходного сечения. Нормальная работа редукционного клапана возможна только в том случае, если давление на входе клапана больше давления на выходе.

Рассмотренную конструкцию называют двухлинейной (рис. 2.25, *а*), так как к клапану подходят две линии: линия входа (высокое давление в магистрали) и

линия выхода (давление у потребителя, пониженное до необходимого уровня). Условное графическое обозначение двухлинейного редукционного клапана отражает принцип его функционирования: редукционный клапан нормально открыт и «отслеживает» давление «за собой».

Настраивают клапан на определенное значение выходного давления, изменяя степень поджатия нагрузочной пружины 3 путем поворота регулировочного винта 2. Для этого рукоятку 1 переводят в верхнее положение и тем самым выводят ее из шлицевого зацепления с корпусом. После настройки рукоятку возвращают в прежнее положение. Давление настройки редукционного клапана контролируется манометром, подключенным к выходному каналу через отверстие 6.

Трехлинейный редукционный клапан (рис. 2.25, б) отличается по конструкции от двухлинейного только тем, что в центральной части мембраны выполнен дополнительный канал 9, корпус которого образует в совокупности с толкателем клапан сброса. Функционирует трехлинейный клапан аналогично двухлинейному. Отличие заключается в том, что при повышении давления на выходе сверх давления настройки мембранный узел перемещается вверх до тех пор, пока не откроется клапан сброса. В результате часть сжатого воздуха (избыточное давление) через клапан сброса и отверстие 8 в верхней части корпуса выводится в атмосферу и давление на выходе редукционного клапана снижается до величины, определяемой настройкой нагрузочной пружины. Можно сказать, что в описанном случае редукционный клапан работает в режиме предохранительного клапана.

Дополнительные функциональные возможности трехлинейного клапана по сравнению с двухлинейным отражены в его условном графическом обозначении. Двусторонняя стрелка указывает на то, что сжатый воздух может протекать через клапан в обоих направлениях, причем в обратном направлении – через дополнительный канал выхлопа (третья линия).

Итак, в блок подготовки воздуха должны входить как минимум фильтр-влагоотделитель и редукционный клапан, установленные последовательно. Часто эти два устройства монтируют в одном корпусе, что приводит к уменьшению габаритных размеров и дает ощутимые преимущества в эксплуатации. Такой моноблок называется фильтрредукционный пневмоклапан или фильтр-регулятор (рис. 2.26).

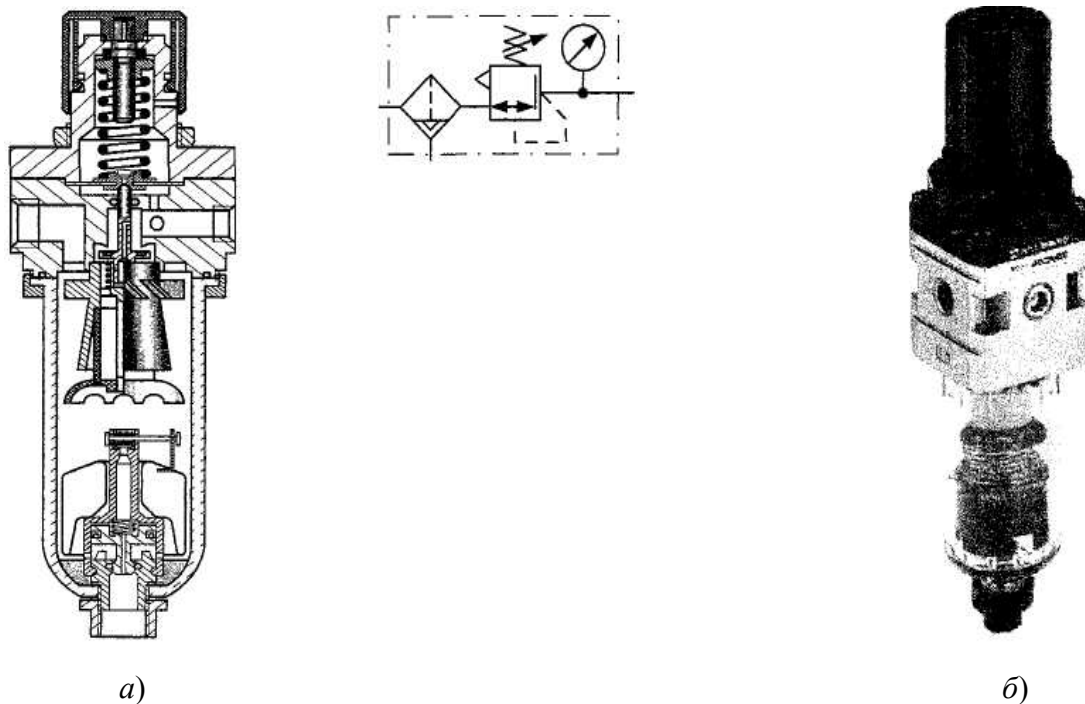


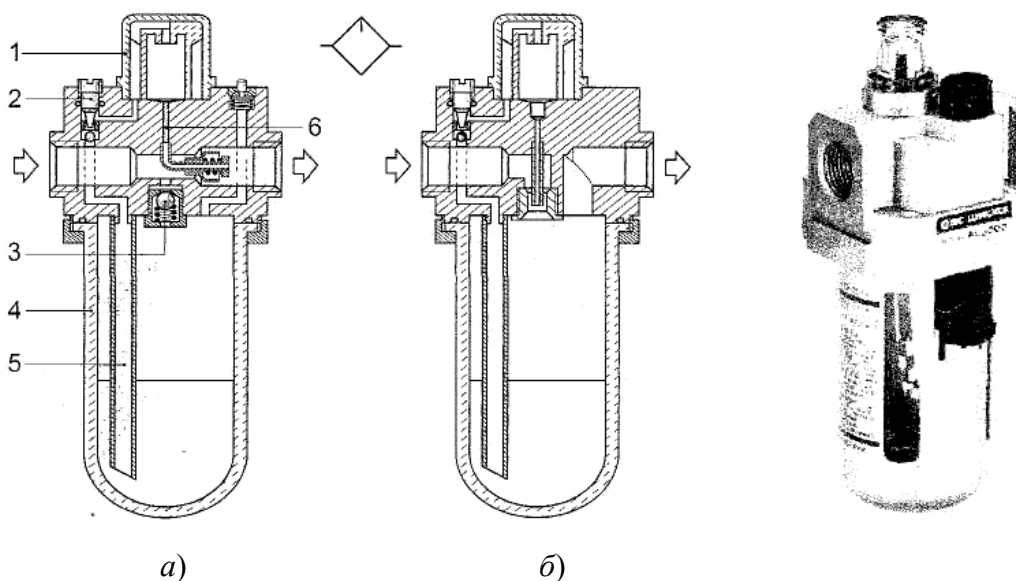
Рис. 2.26. Фильтр-регулятор

**Маслораспылитель.** Если подвижные части пневмоцилиндров, пневмомоторов или иных пневматических устройств нуждаются в постоянной внешней смазке, то к трущимся поверхностям наиболее просто подавать смазывающий материал с потоком поступающего в них воздуха. Устройства, обеспечивающие ввод масла в поток воздуха, называют маслораспылителями. Устанавливают их, как правило, в блоке подготовки воздуха за фильтром-влажнотделителем и редукционным клапаном.

Чтобы масло переносилось потоком сжатого воздуха по трубопроводам на значительные расстояния, его вводят в виде аэрозоля. Маслораспылители делят по особенностям функционирования и качеству получаемого таким способом масляного тумана на два типа: однократного и двукратного распыления (рис. 2.27).

В маслораспылителях однократного распыления (рис. 2.27, *a*) поток сжатого воздуха направляется с входа аппарата непосредственно на выход. Часть воздуха через обратный клапан 3 попадает в стакан 4 и начинает вытеснять масло по маслозаборной трубке 5 в смотровой колпачок-капельницу 1, через который осуществляется визуальный контроль за подачей масла. Расход регулируется винтом 2, вращение которого сопровождается изменением проходного сечения маслоподающего канала. По эжектирующей трубке 6 происходит подсос масла из колпач-

ка  $I$  в основной поток, при попадании в который оно распыляется. Поскольку основная часть распыленного масла смачивает внутреннюю поверхность трубопровода, то на расстоянии 1,5 – 2 м от маслораспылителя начинается образование тонкой масляной пленки, которая перемещается по направлению движения потока воздуха. В связи с этим маслораспылители однократного распыления рекомендуется устанавливать непосредственно перед смазываемым пневмоаппаратом или выше него, чтобы масло могло поступать самотеком.



**Рис. 2.27. Маслораспылители:**

*а* – однократного распыления; *б* – двукратного распыления

При необходимости транспортировки масла на расстояния до 30 м применяют маслораспылители двукратного распыления (рис. 2.27, *б*). В этих устройствах распыленное масло не подается сразу на выход, а поступает в стакан, из которого в выходной канал попадают только частицы масла размером менее 3 мкм. Обычно такие маслораспылители применяются в сложных пневмоприводах с большим числом пневмоустройств.

В каталогах элементов промышленной пневмоавтоматики приводятся следующие данные по маслораспылителям:

- номинальный расход;
- диапазон рабочих давлений;
- объем масла или емкости для масла;

- габаритные и присоединительные размеры;
- материалы конструктивных элементов.

Марки и количество вносимых смазочных материалов должны указываться в руководстве по эксплуатации для конкретного пневматического устройства. Если такая информация отсутствует, рекомендуется заправлять маслораспылители минеральными маслами, вязкость которых не превышает  $35 \text{ мм}^2/\text{с}$  (сСт) при температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; при этом расход масла должен составлять 1 – 10 капель на  $1 \text{ м}^3$  сжатого воздуха. Запрещается заправлять в маслораспылители компрессорные масла!

Для удобства обслуживания маслораспылители устанавливают последовательно с фильтрами-влажнотделителями и редукционными пневмоклапанами и объединяют в единые функциональные блоки – блоки подготовки воздуха (рис. 2.28).

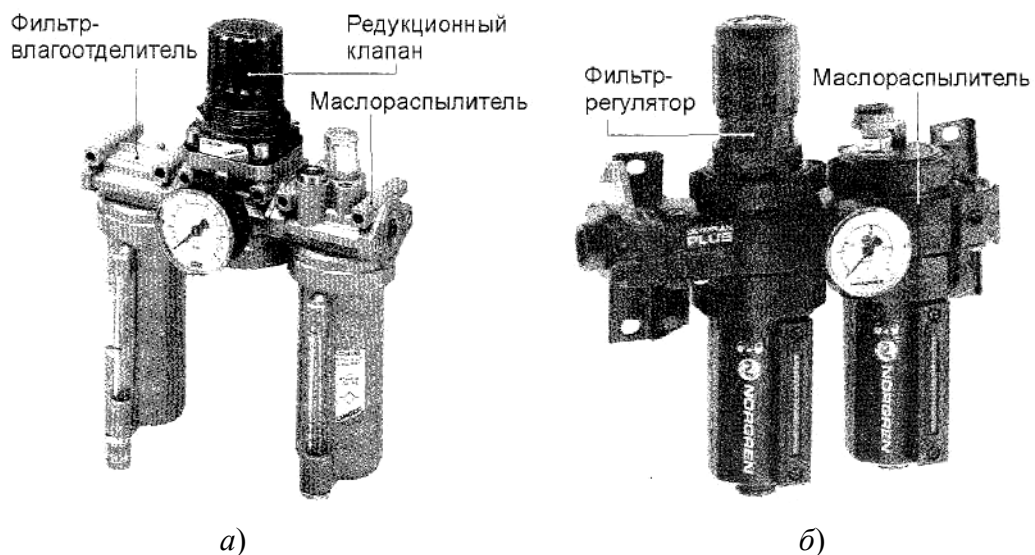


Рис. 2.28. Блоки подготовки воздуха

В зависимости от того, состоит ли блок подготовки воздуха из отдельных устройств, или выполнен в виде моноблока, его условные графические обозначения на принципиальных пневмосхемах будут несколько различаться (рис. 2.29).

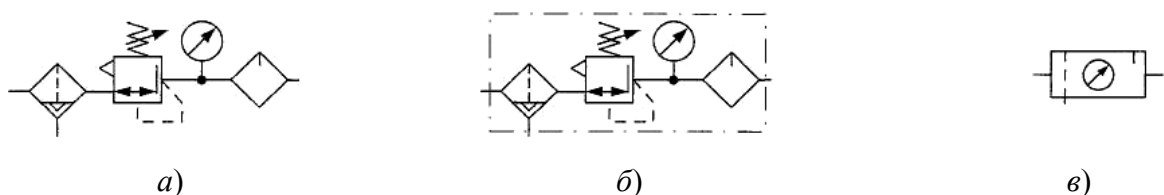


Рис. 2.29. Условные графические обозначения блоков подготовки воздуха



На рисунке 2.29, *a* показано обозначение блока подготовки воздуха, состоящего из отдельных устройств. На принципиальной пневмосхеме каждому из них присваивают свой номер для внесения в спецификацию. На рисунке 2.29, *б* показано развернутое обозначение блока подготовки воздуха, выполненного в виде моноблока, а на рис. 2.29, *в* – его упрощенное обозначение.

Для пневмоприводов, эксплуатируемых в тяжелых условиях и с высокой цикличностью работы при жестких требованиях к надежности, применяют более сложные системы смазки с регенерацией и циркуляцией масла. В таких случаях используют фильтры-маслоотделители, которые устанавливают на общей линии сброса отработавшего сжатого воздуха (линии выхлопа). Отделенное от воздуха масло с помощью специальных насосов вновь подается в маслораспылители, что позволяет снизить его расход в 8 – 10 раз.

Хотя тем или иным способом можно решить проблему подачи внешней смазки к пневмоустройствам, удобнее и выгоднее применять аппаратуру, способную работать на воздухе, не содержащем масла.

Для нормального функционирования подобных устройств в течение всего их жизненного цикла достаточно внести в них консистентную смазку при сборке. Такое техническое решение возможно благодаря применению новых материалов с низким коэффициентом трения для изготовления корпусных и подвижных деталей, а также специальных полимеров для уплотнений. Такие пневмоприводы имеют ряд существенных преимуществ: не требуются специальные смазывающие устройства; окружающая среда не загрязняется парами минеральных масел при сбросе отработавшего сжатого воздуха; эксплуатация и обслуживание не вызывают затруднений. Использовать сжатый воздух с распыленным маслом в таких пневмоприводах не рекомендуется, поскольку в таком случае будет происходить вымывание консистентной смазки. После работы на воздухе, содержащем масло, эксплуатация таких устройств на сухом воздухе не допускается.

Если некоторые элементы пневмопривода нуждаются во внешней смазке (чаще всего это исполнительные механизмы), а некоторые не нуждаются (например, аппараты системы управления), то в блок подготовки воздуха встраивают модуль отвода, который располагают перед маслораспылителем (рис. 2.30).

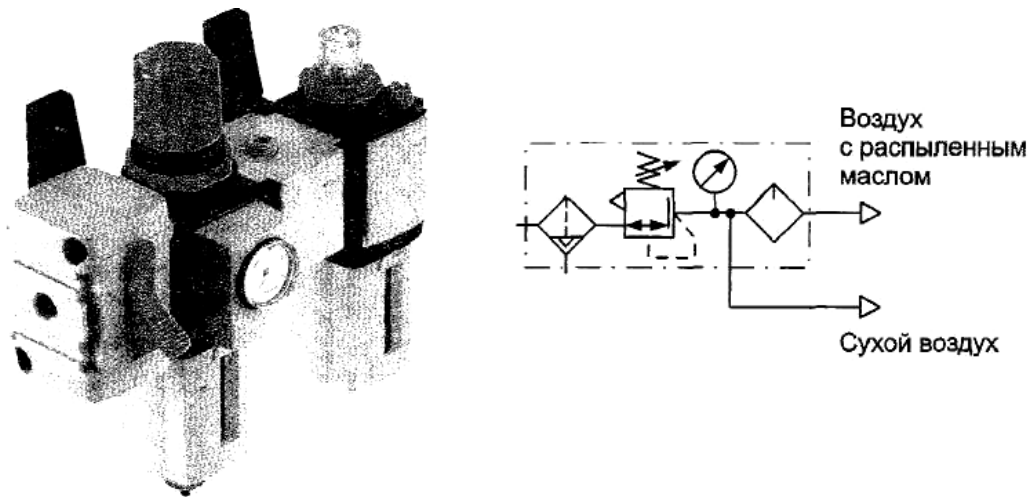


Рис. 2.30. Блок подготовки воздуха с модулем отвода

Таким образом, блок подготовки сжатого воздуха – это совокупность устройств кондиционирования воздуха, которые должны располагаться на каждой автономной машине или на каждом механизме в составе сложного технологического оборудования, потребляющего сжатый воздух. Пневмопривод конкретной машины начинается собственно с блока подготовки сжатого воздуха. Правильная подготовка сжатого воздуха представляет собой необходимое условие надежного функционирования и долговечности пневматических систем.

Основные правила:

- блоки подготовки сжатого воздуха должны располагаться вертикально ( $\pm 5^\circ$ );
- при отсутствии автоматического конденсатоотводчика недопустимо, чтобы уровень конденсата в фильтре-влагоотделителе превышал допустимую норму;
- давление настройки редукционного клапана не должно превышать требуемый уровень рабочего давления пневмопривода;
- в маслораспылителе следует заправлять те масла, которые подходят для смазки пневмоустройств;
- необходимо периодически промывать внутренние поверхности устройств от накапливающихся отложений.

## 2.4. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ

В пневмосистемах энергия давления сжатого воздуха преобразуется в механическую энергию исполнительных механизмов при воздействии воздуха на их рабочие органы, которыми могут служить поршень, лопатка или мембрана. Усилие, развиваемое исполнительным механизмом, пропорционально давлению в нем, а скорость движения выходного звена определяется расходом сжатого воздуха.

Широкая гамма конструктивных решений пневматических приводов дает возможность осуществлять множество разнообразных операций, которые могут выполнять следующие виды движения:

- линейное (возвратно-поступательное);
- поворотное (в ограниченном угловом диапазоне);
- вращательное.

По реализуемому виду движения пневматические приводы подразделяются на три основных типа:

- линейные пневмодвигатели – пневматические цилиндры;
- поворотные пневмодвигатели;
- пневмодвигатели вращательного действия – пневматические моторы.

В отдельную группу можно выделить специальные пневматические приводы – вакуумные захваты, цанговые зажимы и т.п.

Все перечисленные типы приводов имеют свои преимущества и недостатки, и соответственно характеризуются некоторой предпочтительной областью применения.

### 2.4.1. ПОРШНЕВЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ

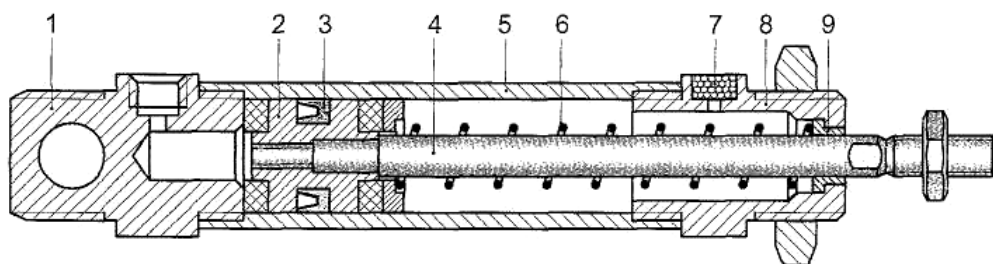
Пневматические поршневые приводы являются наиболее часто применяемой конструкцией и имеют широкий диапазон основных параметров: диаметр поршня: 2,5 – 320,0 мм; рабочий ход: 1 – 2000 мм (в бесштоковых конструкциях до 10 м); развиваемое усилие: 2 – 50 000 Н; скорость движения выходного звена: 0,02 – 1,50 м/с.

По функциональным возможностям поршневые пневмоприводы подразделяют на два базовых типа:

- пневмоприводы одностороннего действия: подача сжатого воздуха в них осуществляется для выполнения рабочего хода в одном направлении;
- пневмоприводы двустороннего действия: полезная работа совершается ими как при прямом, так и при обратном ходе поршня.

#### 2.4.1.1. Поршневые пневмоприводы одностороннего действия

Пневмоприводы одностороннего действия применяют в выталкивателях, отсекателях, в зажимных конструкциях и т.п. Рабочий ход в них осуществляется под действием сжатого воздуха, а в исходную позицию шток возвращается встроенной пружиной либо от внешней нагрузки (рис. 2.31).



**Рис. 2.31. Пневмопривод одностороннего действия**

На рисунке 2.31 цилиндрический корпус 5 с обеих сторон закрыт крышками 1 и 8. В задней крышке 1 выполнено отверстие для подвода воздуха, а передняя крышка 8 имеет декомпрессионное отверстие с вмонтированным фильтроэлементом 7. Поршень 2 делит внутреннее пространство корпуса (гильзы) на две полости: штоковую и поршневую. Шток 4 жестко связан с поршнем. Полости разграничены уплотнением 3 (манжетой). Передняя крышка 8 снабжена направляющей втулкой 9, которая является опорой скольжения штока, передающего усилие от поршня на внешний объект. Возвратная пружина 6 смонтирована внутри цилиндра и охватывает шток.

Рабочий ход пневмоцилиндра, являющегося основным элементом привода, осуществляется при подаче сжатого воздуха в поршневую полость; обратный ход происходит под действием встроенной пружины, что обуславливает меньшее потребление воздуха по сравнению с пневмоцилиндрами двустороннего действия

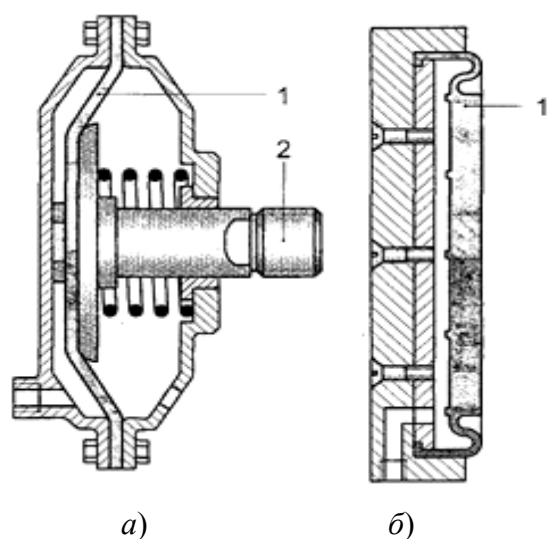
аналогичных размеров. Кроме того, в пневмоцилиндрах одностороннего действия не требуется полная герметизация штоковой полости, постоянно связанной с атмосферой, а отсутствие дополнительных уплотнений снижает потери на трение.

Пневмоцилиндры одностороннего действия применяют в тех случаях, когда требуется передача усилия только в одном направлении, а возврат происходит беспрепятственно, а также тогда, когда из соображений безопасности должно обеспечиваться втянутое положение штока при отключении питания (падении давления сжатого воздуха в пневмосети). Область применения пневмоцилиндров одностороннего действия ограничена недостатками, присущими данной конструкции:

- рабочее усилие снижено вследствие противодействия пружины (примерно на 10%);
- малое усилие при обратном ходе (примерно 10% рабочего);
- ограниченное перемещение штока (обычно не более 100 мм);
- увеличенные продольные габариты (прибавляется длина сжатой пружины).

Существует большое количество конструктивных исполнений пневмоприводов одностороннего действия, например мембранные пневмоприводы (рис. 2.32).

Принцип функционирования мембранного пневмопривода (рис. 2.32, а) аналогичен принципу работы поршневого пневмоцилиндра одностороннего действия. Конструктивные отличия заключаются в том, что подвижной поршень за-



**Рис. 2.32. Мембранные пневмоприводы одностороннего действия**

менен жестко защемленной упругой мембраной 1, изготовленной из резины, прорезиненной ткани или пластика. Благодаря большой площади мембраны такие пневмоцилиндры развивают усилия до 25 000 Н, но при этом ход штока 2 ограничен. Мембранные пневмоцилиндры характеризуются существенно меньшими продольными габаритами и простотой монтажа; они недороги, и в них отсутствуют подвижные уплотнения.

Мембранный пневмоцилиндр одностороннего действия, показанный на рис. 2.32, б, предназначен для зажима деталей с целью их последующей механической обработки. В таком пневмоцилиндре отсутствует шток, а усилие передается непосредственно через мембрану  $l$ , рабочий ход которой составляет 1 – 5 мм.

На принципиальных пневмосхемах пневмоцилиндры одностороннего действия, вне зависимости от конкретного конструктивного исполнения, обозначаются символами, приведенными на рис. 2.33.



**Рис. 2.33. Условные графические обозначения пневмоцилиндров одностороннего действия**

На рисунке 2.33, а показано условное графическое обозначение пневмоцилиндра одностороннего действия, в котором рабочий ход осуществляется при выдвигании штока, а на рис. 2.33, б – при его втягивании.

#### **2.4.1.2. Пневмоприводы двустороннего действия**

Пневмоприводы двустороннего действия применяют в тех случаях, когда требуется передавать рабочее усилие при линейных перемещениях в обоих направлениях, например при перемещении, установке, подъеме и опускании рабочих органов машин и других производственно-технологических операциях.

Принципиальное отличие пневмоприводов двустороннего действия от рассмотренных выше заключается в том, что в них как прямой, так и обратный ходы поршня осуществляются под действием сжатого воздуха при попеременной его подаче в одну из полостей, в то время как другая соединена с атмосферой (рис. 2.34).

Перемещение штока в любом направлении является рабочим и может осуществляться под нагрузкой. При обратном ходе поршня штоковая полость находится под избыточным давлением, что связано с необходимостью установки дополнительных уплотнений на поршне и в передней крышке для предотвращения

утечек сжатого воздуха по штоку. В поршневых пневмоцилиндрах одностороннего и двустороннего действия практически все элементы, а также способы их крепления одинаковы.

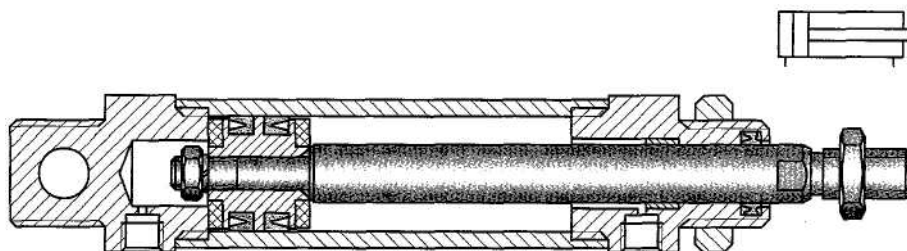


Рис. 2.34. Пневмоцилиндр двустороннего действия

Конструктивное исполнение пневмоцилиндров может быть различным в зависимости от их типоразмера и области применения. Наиболее распространенным способом крепления корпусных деталей пневмоцилиндров с диаметром поршня до 25 мм (иногда – до 63 мм) является завальцовка гильзы в крышках (рис. 2.35, *а*). Такая конструкция имеет существенный недостаток – пневмоцилиндры не подлежат ремонту.

Если диаметр поршня свыше 32 мм, то традиционным способом крепления остается стягивание крышек и гильзы шпильками (рис. 2.35, *б*). Удобны в эксплуатации и фактически не имеют ограничений по диаметру поршня пневмоцилиндры, крышки которых присоединены болтами к цельнотянутой спрофилированной гильзе (рис. 2.35, *в*).

Технология производства цельнотянутых гильз-корпусов позволяет при необходимости выполнять в них каналы для подвода воздуха, пазы для датчиков положения поршня, придавать конфигурацию, удобную для монтажа и обслуживания.

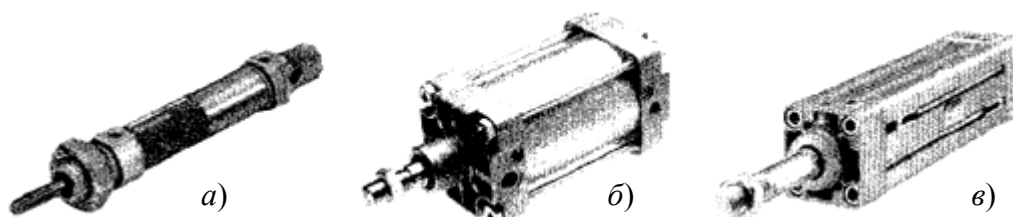


Рис. 2.35. Способы крепления крышек пневмоцилиндров

### 2.4.1.3. Пневмоприводы с демпфированием в конце хода

Одним из преимуществ пневмоприводов является высокая – до 1,5 м/с (а в ударных цилиндрах до 10 м/с) – скорость движения выходного звена. При достижении конечного положения, когда поршень «садится» на крышку, развиваются значительные ударные усилия, что сопровождается характерным стуком. Такие удары не только являются причиной возникновения шума, но и приводят к преждевременному износу и даже поломке элементов конструкции. Избежать преждевременного выхода из строя пневмоцилиндра можно путем установки на поршне эластичных (например, резиновых) демпферов (рис. 2.34). Однако такой способ демпфирования оказывается недостаточно эффективным, если имеют место значительные инерционные нагрузки. В таких случаях применяют пневмоцилиндры двустороннего действия с воздушным демпфированием в конце хода (рис. 2.36).

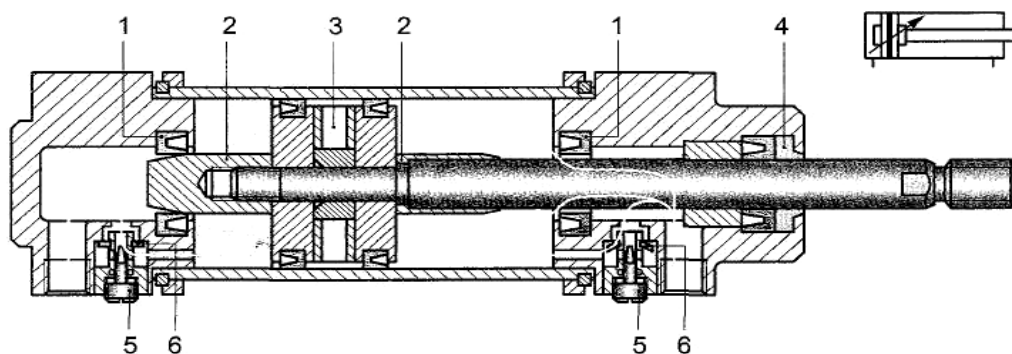


Рис. 2.36. Пневмопривод двустороннего действия с демпфированием в конце хода

Расширение функциональных возможностей таких цилиндров достигается путем введения в традиционную конструкцию дополнительных элементов. По обе стороны поршня устанавливаются втулки демпфера 2, а в крышках цилиндра – уплотнительные манжеты 1 и дроссели 5 с обратным клапаном 6. Сжатый воздух, подводимый к цилиндру, свободно поступает в соответствующую полость, в том числе и через встроенный обратный клапан 6. Поршень движется к удаленной от него в этот момент крышке с максимальной скоростью до тех пор, пока втулка демпфера 2 не дойдет до уплотнительных манжет 1. При этом происходит «запирание» некоторого объема отводимого из цилиндра воздуха в полости, которая только что была соединена с атмосферой. Теперь воздух из этой полости может



вытесняться в атмосферу лишь через отверстие малого диаметра в дросселе 5, величину проходного сечения которого можно изменять. Между крышкой и поршнем образуется «воздушная подушка». При дальнейшем движении поршня воздух в запертом объеме начинает сжиматься, давление возрастает, что приводит к торможению поршня, степень которого тем больше, чем меньше проходное сечение дросселя. В конечном итоге поршень упирается в крышку без удара, мягко.

При изменении направления движения сжатый воздух свободно поступает под поршень через обратный клапан 6, составляющий вместе с дросселем 5 единый узел, что обеспечивает быстрое трогание цилиндра с места.

При очень больших инерционных нагрузках или высоких скоростях движения поршня дополнительно устанавливают внешние гидравлические амортизаторы.

Следует отметить, что пневмопривод, показанный на рис. 2.36, существенно отличается от рассмотренных выше конструкций тем, что в нем помимо установленных регулируемых демпферов смонтирован на поршне кольцевой постоянный магнит 3, магнитное поле которого распространяется за пределы гильзы и может регистрироваться с помощью специальных датчиков. Таким образом обеспечивается возможность контроля определенных, функционально важных положений выходного звена пневмопривода.

Для защиты штока от внешних загрязнителей в проходной (передней) крышке практически всех пневмоприводов устанавливают грязесъемное кольцо 4.

Наличие в пневмоприводе регулируемых демпфирующих устройств отображается в условном графическом обозначении стилизованным изображением втулок демпферов, пересеченных стрелкой, а наличие постоянного магнита – жирной линией на изображении поршня.

Описанная конструкция пневмоприводов благодаря своей простоте и функциональным возможностям является наиболее распространенной, и ее можно назвать типовой или даже традиционной.

Пневмопривод двустороннего действия присущ ряд недостатков, ограничивающих область их применения:

- усилия при прямом и обратном ходах поршня различны вследствие неравномерности его площадей в штоковой и поршневой полостях;

- шток расположен консольно, причем размер консоли различен во втянутом и выдвинутом положении;
- шток хорошо воспринимает только осевую нагрузку, а радиальную – плохо.

#### 2.4.1.4. Пневмоприводы с проходным штоком

В пневмоприводах с проходным, или двусторонним штоком (рис. 2.37) обе рабочие полости штоковые, а площади поршня равны с обеих сторон. Шток опирается не на одну опору в крышке, как в ранее рассмотренных конструкциях, а на две – в каждой из крышек.

Подобная конструкция имеет ряд преимуществ:

- возможность осуществления рабочих перемещений со стороны обоих торцов пневмоцилиндра;
- нагрузка на шток воспринимается двумя опорами, что увеличивает срок службы пневмоцилиндра;
- равенство площадей поршня в обеих рабочих полостях, что обеспечивает равные рабочие усилия при движении его в любом направлении.

К недостаткам пневмоприводов с проходным штоком относят увеличенный почти вдвое по сравнению с традиционной конструкцией продольный габарит пневмопривода за счет увеличения длины штока. Применяют также пневмоприводы, в которых проходной шток выполнен полым, что позволяет использовать его как часть трубопровода, что в некоторых случаях является удобным конструктивным решением.

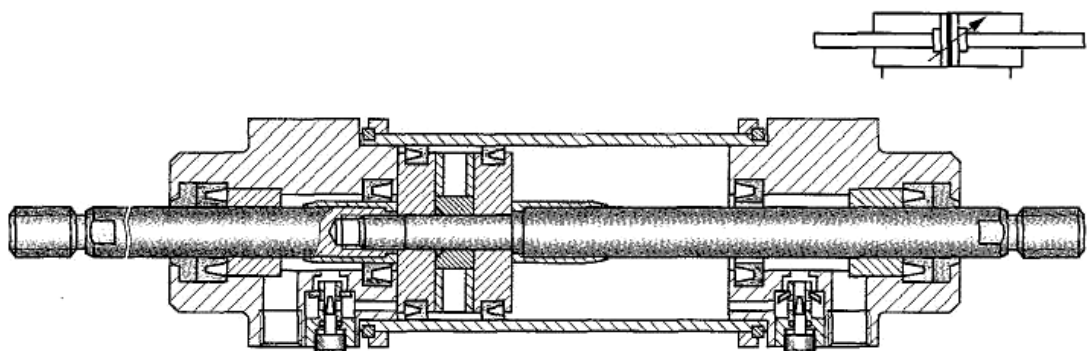


Рис. 2.37. Пневмопривод с проходным (двухсторонним) штоком

### 2.4.1.5. Тандем-пневмоцилиндры

В случаях, когда требуется получение значительных усилий, а поперечный размер монтажного пространства недостаточен для установки пневмоцилиндра соответствующего диаметра, применяют тандем-пневмоцилиндры (рис. 2.38).

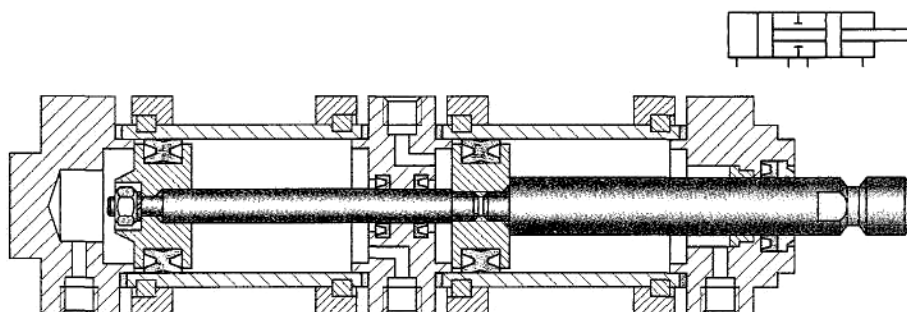


Рис. 2.38. Тандем-пневмоцилиндр

Тандем-пневмоцилиндр, или сдвоенный пневмоцилиндр, – это, по существу, два пневмоцилиндра двустороннего действия, объединенные в одном корпусе и имеющие общий шток. По сравнению с традиционными пневмоцилиндрами того же диаметра усилия, развиваемые тандем-пневмоцилиндрами, фактически в два раза больше вследствие суммирования усилий, получаемых одновременно на двух поршнях.

Если необходимо увеличить развиваемое пневмоцилиндром толкающее усилие в три-четыре раза, применяют секционные пневмоцилиндры, которые последовательно стыкуются между собой. Наличие в их корпусах распределительных каналов позволяет подводить сжатый воздух в полости всех пневмоцилиндров всего через два внешних подсоединения.

Продольный габарит тандем-пневмоцилиндров как минимум в два раза больше, чем традиционных пневмоцилиндров. В конструкции, представленной на рис. 2.39, этот недостаток отсутствует.

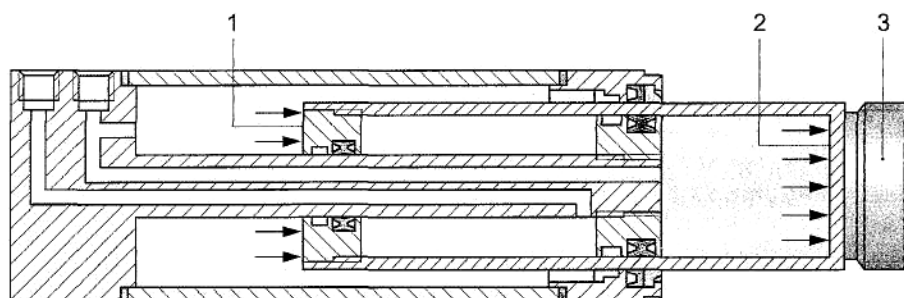


Рис. 2.39. Компактный тандем-пневмоцилиндр

В таком пневмоцилиндре развиваемое усилие увеличивается в два раза только при выдвигании штока-плунжера 3, так как при этом сжатый воздух воздействует на один внешний 1 и один внутренний 2 его торцы. При втягивании же штока цилиндр развивает незначительные усилия.

## 2.4.2. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПНЕВМОПРИВОДОВ

### 2.4.2.1. Многопозиционные пневмоприводы

Традиционные конструкции пневмоприводов позволяют обеспечить две точки позиционирования штока и, соответственно, связанных с ними объектов – «шток втянут» и «шток выдвинут». Область эффективного применения пневмоприводов значительно расширяется, если реализуются останов и удержание их выходных звеньев в некоторых заданных промежуточных точках с допустимыми позиционными ошибками. В зависимости от предъявляемых требований – числа точек позиционирования выходного звена, частоты их смены (режима работы), необходимой точности отработки приводом заданного перемещения – используют пневматические механизмы различной структуры и с различными принципами управления движением выходного звена.

Чтобы обеспечить некоторое ограниченное число точек позиционирования (более двух), применяют многопозиционные пневмоприводы, состоящие из двух или более пневмоцилиндров с различными рабочими ходами. На рисунке 2.40 представлены две конструкции многопозиционных пневмоприводов, одна из которых (рис. 2.40, а) обеспечивает три, а вторая (рис. 2.40, б) – четыре точки позиционирования.

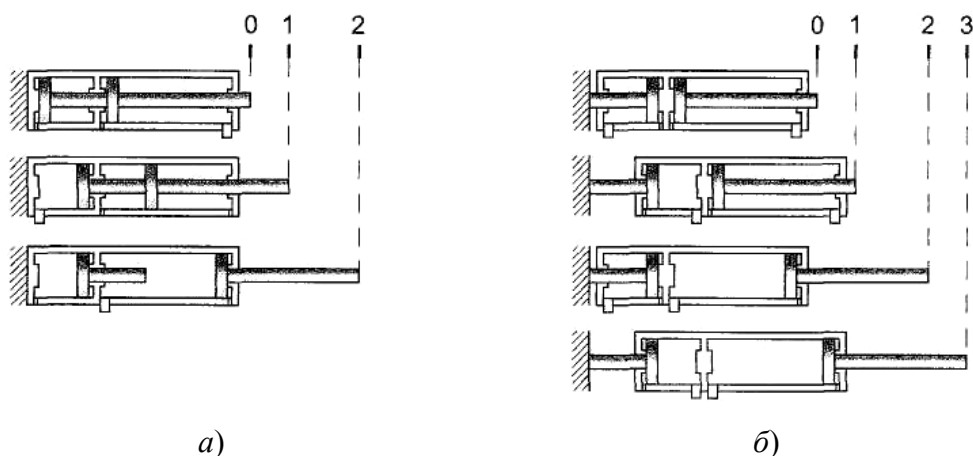


Рис. 2.40. Многопозиционные пневмоцилиндры

Во время работы корпус четырехпозиционного пневмопривода перемещается и, следовательно, пневмопривод должен быть укомплектован при монтаже подвижными соединениями для пневмошлангов.

Число точек позиционирования можно увеличить, если скомбинировать таким же образом не два, а большее число пневмоцилиндров. При этом следует учитывать, что подобные конструкции могут функционировать нестабильно, когда штоки разных цилиндров движутся в противоположных направлениях.

#### 2.4.2.2. Пневмоцилиндры с фиксатором штока

Путем механического удержания штока посредством специальных устройств (рис. 2.41) можно получить фактически неограниченное число точек позиционирования.

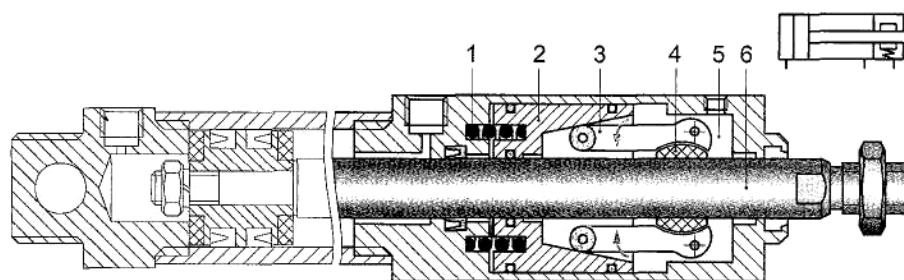


Рис. 2.41. Пневмоцилиндр с фиксатором штока

На рисунке 2.41 шток 6 удерживается разрезным тормозным башмаком 4, который обжимает его под действием встроенной пружины 1. Разблокировка штока 6 осуществляется при подаче сжатого воздуха в рабочую полость 5 фиксатора. При этом поршень 2, сжимая пружину 1, освобождает элементы конструкции 3, прижимающие тормозной башмак 4 к штоку 6. Фиксаторы позволяют надежно удерживать шток пневмопривода под нагрузкой даже при внезапном падении давления в пневмосети.

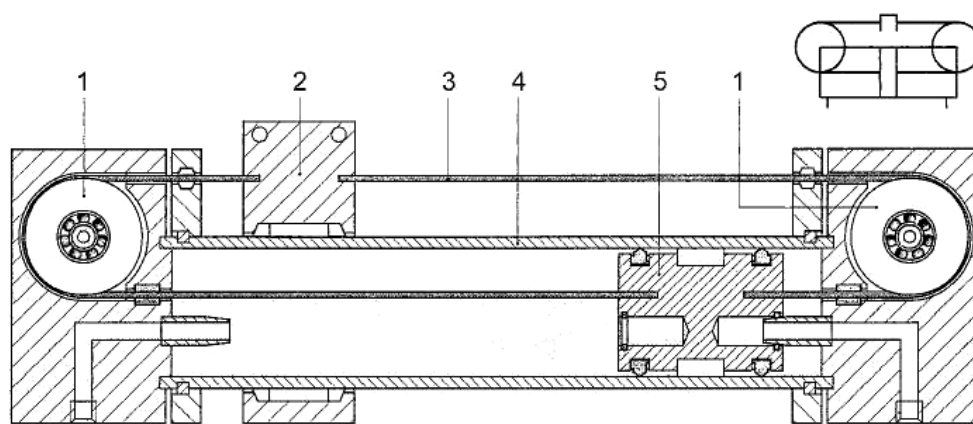
#### 2.4.2.3. Бесштоковые пневмоприводы

Там, где требуются значительные (до нескольких метров) перемещения объектов, применение пневмопривода традиционного исполнения затруднительно или невозможно. Для обеспечения большого хода необходим шток соответ-

вующей длины, что обуславливает резкое увеличение продольного габарита пневмоцилиндра; значительные размеры консольной части штока в выдвинутом положении могут стать причиной потери устойчивости под нагрузкой.

Задачу осуществления значительных по величине перемещений при ограничениях в габаритах можно было бы решить посредством телескопических цилиндров.

Так как шток предназначен только для передачи усилия от поршня к внешнему объекту, то бесштоковые конструкции, в которых усилие передается непосредственно от поршня, имеют очевидные преимущества, главное из которых заключается в как минимум двукратном уменьшении продольного габарита по сравнению с пневмоприводом традиционной конструкции с той же величиной хода. Очевидно, что преимущества бесштоковых пневмоприводов проявляются в значительной степени при больших величинах рабочего хода. Одним из конструктивных решений, позволяющих отказаться от штока в его традиционном значении, является пневмопривод с гибким штоком (рис. 2.42).

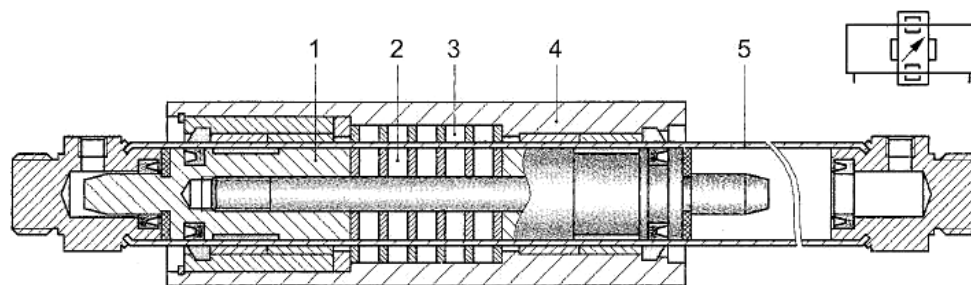


**Рис. 2.42. Пневмопривод с гибким штоком**

Жесткий шток в данной конструкции заменен покрытым нейлоном металлическим тросом 3 (либо лентой из синтетического материала), охватывающим ролики 1, размещенные в крышках пневмоцилиндра. Внутри гильзы 4 цилиндра трос 3 жестко связан с поршнем 5, а снаружи – с кареткой 2, к которой и крепится перемещаемый объект.

Данное техническое решение, несмотря на свою относительную простоту, не получило широкого распространения. В пневмоприводах с магнитной муфтой

(рис. 2.43) усилия, развиваемые поршнем, передаются на внешнюю каретку за счет сил магнитного взаимодействия.



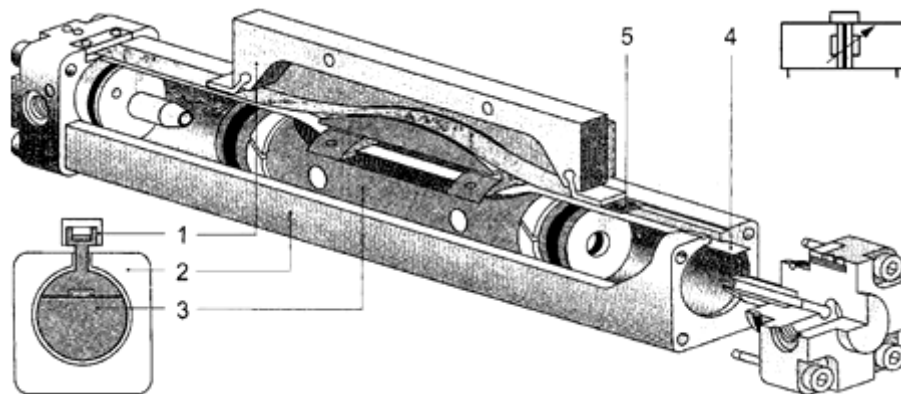
**Рис. 2.43. Пневмопривод с магнитной муфтой**

Поршень *1* имеет набор кольцевых постоянных магнитов *2*, которые взаимодействуют с кольцевыми магнитами *3*, расположенными в каретке *4*, охватывающей гильзу *5*. Если гильза выполнена из немагнитного материала и является тонкостенной, то движение поршня (1-я полумуфта) сопровождается синхронным перемещением каретки (2-я полумуфта), к которой присоединен внешний объект (нагрузка).

По сравнению с конструкциями, в которых усилие с поршня на нагрузку передается механическим путем, в пневмоприводах с магнитной муфтой при равных значениях диаметра цилиндра и давления питания развиваемое усилие приблизительно на 20% меньше. Такие пневмоприводы чувствительны к перегрузкам, могущим привести к «разрыву» муфты.

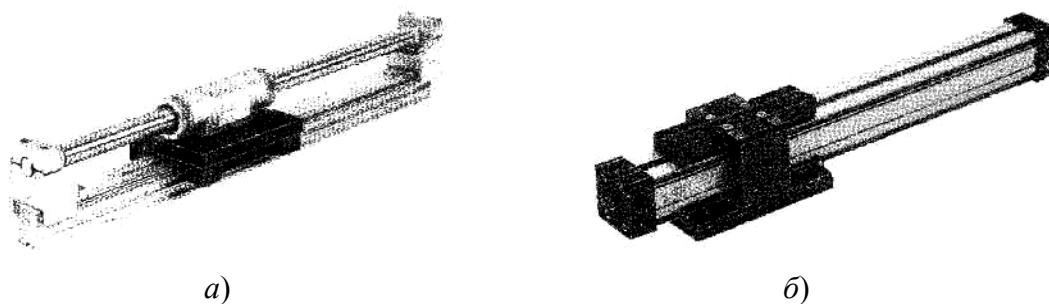
Установив дополнительные магнитные кольца, можно увеличить силу магнитного сцепления поршня с кареткой, однако в этом случае возрастает продольный габарит поршня и всей конструкции в целом. Особенности конструктивного исполнения пневмоцилиндров с магнитной муфтой (нежесткая связь между поршнем и кареткой, эксцентричное положение нагрузки) накладывают ограничения на величины осевых и радиальных нагрузок и местонахождение точек их приложения, а также на допустимое соотношение скорости и массы перемещаемых объектов.

В настоящее время наиболее широко распространены бесштоковые пневмоприводы, в которых усилие механически передается на нагрузку непосредственно поршнем (рис. 2.44).



**Рис. 2.44. Пневмопривод с ленточным уплотнением**

Гильза 2 пневмопривода имеет сквозной продольный паз (по всей длине гильзы). Через этот паз поршень 3 механически связан с внешней кареткой 1 (т.е. поршень выполнен заодно с ней). С целью герметизации гильзы паз с ее внутренней стороны закрыт металлической либо синтетической лентой 4, закрепленной в крышках. Чтобы пропустить поршень сквозь паз, часть ленты, расположенную между уплотнениями поршня, проводят через тело последнего под узкой частью. При работе пневмопривода лента, неподвижная относительно его корпусных деталей, скользит в теле поршня, открывая паз в гильзе только в месте нахождения поршня. Чтобы предотвратить попадание загрязнителей из окружающей среды внутрь гильзы 3, продольный паз закрыт с внешней стороны защитной лентой 5, пропущенной через каретку 1.



**Рис. 2.45. Бесштоковые пневмоприводы с направляющими**

При работе в условиях значительных радиальных нагрузок бесштоковые пневмоприводы с целью их разгрузки снабжают специальными направляющими (рис. 2.45, а) или выполняют каретку таким образом, что она передает нагрузку на гильзу-корпус (рис. 2.45, б). Подобное конструктивное исполнение позволяет



обеспечить высокую точность направления движения каретки, защиту присоединенного объекта от проворота и некоторое возрастание значения полезной нагрузки на привод.

#### 2.4.2.4. Защита штока пневмоприводов от проворота

При возвратно-поступательном движении штока в стандартных пневмоприводах имеет место некоторый его проворот относительно оси движения, что обусловлено наличием микронеровностей на поверхности самого штока, а также на направляющих и уплотнениях. В связи с этим непосредственно на штоке пневмопривода нельзя закреплять инструмент (например, краскопульт), требующий строгой ориентации в пространстве. С целью устранения этого недостатка, особенно в тех случаях, когда к штоку прикладывается крутящий момент, применяют различные конструкции, в которых шток защищен от проворота (рис. 2.46). Крутящий момент в таких конструкциях может восприниматься: штоком (рис. 2.46, а, б); поршнем (рис. 2.46, в, г); направляющими (рис. 2.46, д, е).

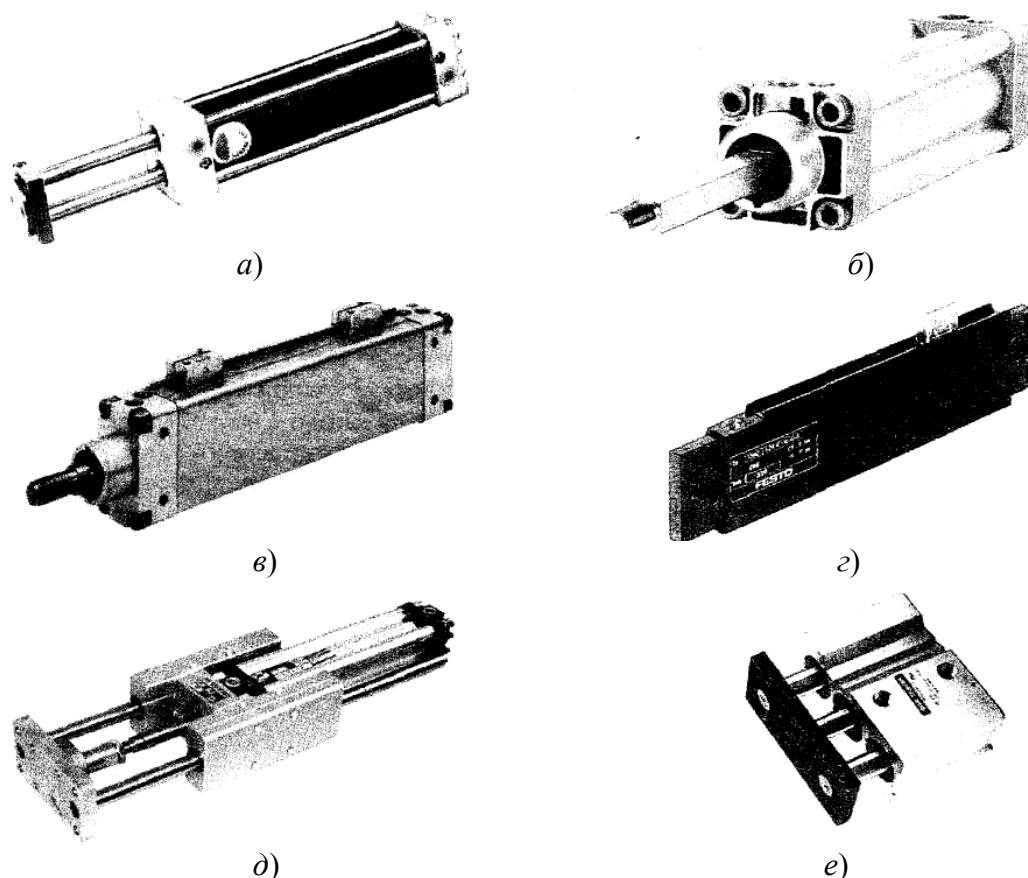


Рис. 2.46. Пневмоприводы с неповорачивающимся штоком

При небольших значениях крутящих моментов могут использоваться конструкции с двумя штоками (рис. 2.46, *а*) либо с квадратным штоком (рис. 2.46, *б*). Более высокие значения крутящих моментов воспринимают пневмоцилиндры с овальным (рис. 2.46, *в*) или прямоугольным (рис. 2.46, *г*) поршнем. Кроме того, благодаря прямоугольному профилю гильзы такие цилиндры позволяют обеспечить высокую плотность монтажа. Если пневмоцилиндры работают в условиях значительных по величине крутящих моментов, их снабжают либо внешними направляющими (рис. 2.46, *д*), либо направляющими, выполненными в одном корпусе с гильзой (рис. 2.46, *е*).

## 2.5. ПОВОРОТНЫЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

В конструкциях путевых и некоторых других мобильных машин существует круг задач, в которых требуется не линейное перемещение выходного звена исполнительного механизма, а поворот его на заданный угол в диапазоне от 0 до 360°. Для этого применяют поворотные пневматические двигатели (пневмодвигатели), чаще всего поршневые или шиберные – пластинчатые.

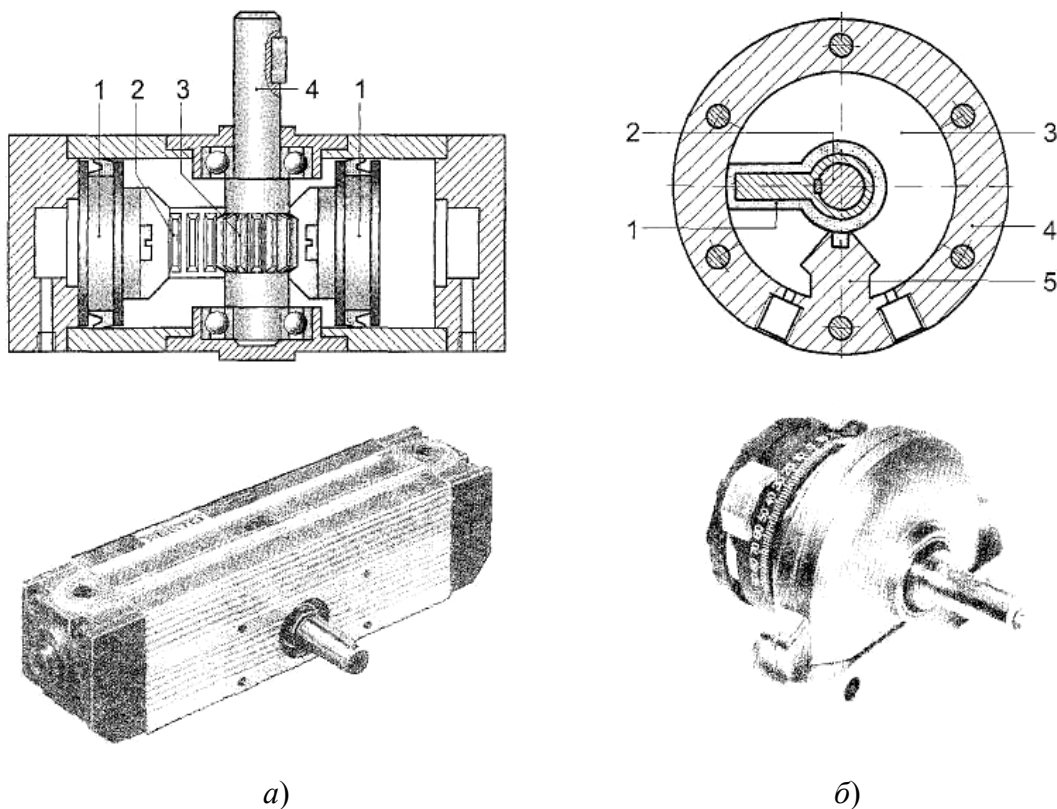


Рис. 2.47. Поворотные пневмодвигатели

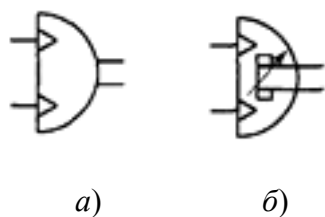
Поршневой поворотный пневмодвигатель с реечной передачей (рис. 2.47, *a*) выполняют на базе передачи «шестерня–рейка». Шестерня 3 устанавливается на выходном валу 4, входит в зацепление со штоком-рейкой 2, который жестко связан с поршнями 1 двух разнонаправленных цилиндров одностороннего действия.

При подаче сжатого воздуха в рабочую полость одного из пневмоцилиндров поршни вместе со штоком-рейкой совершают прямолинейное движение, которое посредством реечной передачи преобразуется во вращательное (в пределах одного оборота) движение вала. Вал связан с объектом, который необходимо повернуть на некоторый угол (например, с захватным устройством промышленного робота).

Очевидно, что поршневые пневмодвигатели можно выполнить таким образом, чтобы в конце рабочего хода происходило демпфирование, а поршни были снабжены магнитными вставками с целью обеспечения возможности бесконтактного опроса их положения. В некоторых конструкциях предусматривается также регулирование угла поворота.

Максимальный крутящий момент, развиваемый поршневыми поворотными пневмодвигателями, как правило не превышает 150 Н·м (при диаметре поршней 100 мм).

Пластинчатый (шиберный) поворотный пневмодвигатель (рис. 2.47, *б*) устроен таким образом, что сжатый воздух воздействует на жестко закрепленную на выходном валу 2 пластину 1 (шибер), расположенную внутри цилиндрической расточки 3 в корпусе 4. Чтобы предотвратить перетекание воздуха из одной рабочей



**Рис. 2.48. Условное графическое обозначение поворотных пневмодвигателей:**

- a* – общее;
- б* – с демпфированием в конце хода

полости двигателя в другую пластину выполняют с резиновым либо пластмассовым покрытием. Угол поворота шибера зависит от размеров корпусного ограничителя 5 и в стандартных конструкциях составляет 90, 180 или 270°. Для установки произвольного угла поворота такие пневмодвигатели снабжают внешними передвижными упорами. Они развивают крутящий момент до 250 Н·м.

На принципиальных пневматических схемах поршневые и пластинчатые (шиберные) пневмодвигатели обозначаются одинаковыми символами (рис. 2.48).

Поскольку останов вращающейся массы без демпфирования или при наличии перегрузок создает опасность повреждения шестерни или лопасти, то, выбирая подходящий поворотный двигатель, очень важно правильно учесть моменты инерции приводимых во вращательное движение технологических объектов. Значения их должны быть меньше указываемых в промышленных каталогах предельно допустимых значений для выбранного типоразмера пневмодвигателя.

## 2.6. ПНЕВМОМОТОРЫ

Пневмодвигатели вращательного действия, или пневмомоторы, предназначены для преобразования потенциальной энергии сжатого воздуха в механическую работу и обеспечивают неограниченное вращательное движение выходного вала. Как и другие устройства, работающие на сжатом воздухе, пневмомоторы имеют ряд преимуществ, которые во многих случаях делают их использование предпочтительным с экономической и технической точек зрения. К этим преимуществам относятся:

- простота регулирования скорости вращения и крутящего момента;
- возможность полного торможения под нагрузкой без ущерба для конструкции и рабочих качеств пневмомотора;
- отсутствие перегрева;
- большой ресурс работы;
- полная взрывобезопасность;
- нечувствительность к неблагоприятным факторам внешней среды (пыль, влага и др.);
- простота монтажа.

### 2.6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОТОРОВ

Существует довольно много вариантов конструктивного исполнения пневмомоторов (рис. 2.49), однако не все они нашли широкое применение.

При эксплуатации пневмомоторов существенное значение имеет такой установившийся режим, при котором достигается максимальная производитель-

ность машины. Этому режиму соответствуют статические характеристики крутящего момента  $M$ , мощности  $N$  и общего КПД, определяемые теоретически или экспериментально при постоянной частоте вращения  $n$  (рис. 2.50).



Рис. 2.49. Классификация пневмомоторов

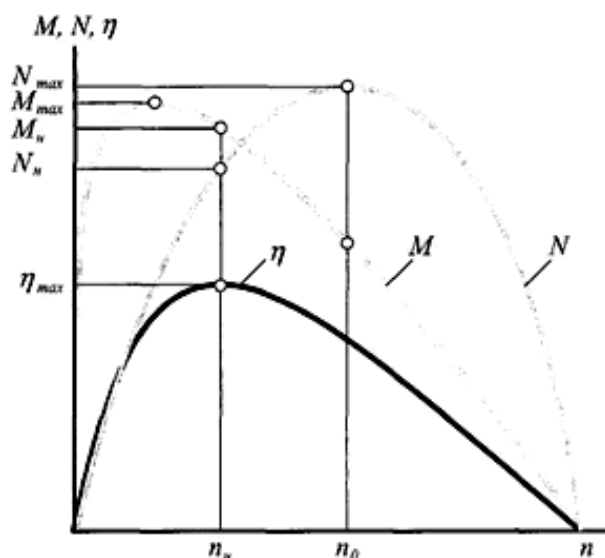


Рис. 2.50. Основные рабочие характеристики пневмомоторов

Как видно на рис. 2.50 мощность пневмомотора достигает максимального значения  $N_{\max}$  при частоте вращения  $n_0 \approx 0,5n_{\text{хх}}$ , где  $n_{\text{хх}}$  – частота вращения при холостом ходе), крутящий момент имеет наибольшее значение  $M_{\max}$  при частоте вращения, близкой к нулю.

Номинальной частотой вращения пневмомотора считают такое ее значение, при котором имеет место максимум КПД мотора. Для объемных двигателей общего назначения  $n_n = (0,30 - 0,35)n_{\text{хх}}$  наибольшая экономичность работы пневмомотора достигается именно при номинальной частоте вращения, а наибольшая техническая эффективность – при максимальной мощности.

В паспортных характеристиках пневмомоторов обычно указывают максимальную мощность и соответствующую ей частоту вращения при рабочем давлении сжатого воздуха, а также номинальную частоту вращения.

Рабочий процесс любого пневмомотора является обратным по отношению к рабочему процессу компрессора соответствующего типа. Если в компрессоре осуществляется процесс преобразования механической энергии вращательного движения приводного вала в потенциальную энергию сжатого воздуха на выходе,

то в пневмомоторе, наоборот, энергия сжатого воздуха, поступающего на вход, преобразуется в механическую энергию вращения вала.

### 2.6.2. ПЛАСТИНЧАТЫЕ (ШИБЕРНЫЕ) ПНЕВМОМОТОРЫ

Принципиальная конструктивная схема шиберного (пластинчатого) пневмомотора (рис. 2.51) практически не отличается от ранее рассмотренной конструктивной схемы пластинчатого компрессора.

При подаче сжатого воздуха в рабочую камеру пневмомотора возникают силы, которые действуют на пластины 3, ограничивающие объем камеры. Вследствие эксцентричного расположения ротора 1 относительно статора 2 площади пластин различны, поэтому различаются по величине и действующие на них силы. В точке, после прохождения которой объемы рабочих камер начинают уменьшаться, выполнено отверстие для сброса отработавшего воздуха. От равнодействующей всех приложенных сил возникает крутящий момент, приводящий к повороту ротора, в процессе которого увеличиваются объемы части рабочих камер, благодаря чему содержащийся в этих камерах сжатый воздух расширяется. Совершаемая при этом работа расширения преобразуется в дополнительную механическую энергию вращения ротора.

От числа пластин пневмомотора зависят его коэффициент полезного действия (КПД), условия пуска и быстрота разгона (приемистость), а также равномерность вращения. Стандартные конструкции имеют 3 – 5 пластин, в специальных случаях их число увеличивают до 10. Выпускаются как реверсивные, так и нереверсивные пластинчатые пневмомоторы.

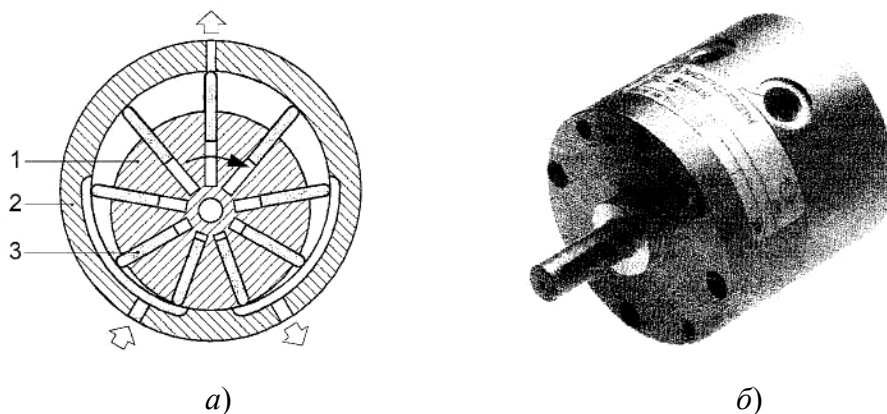


Рис. 2.51. Шиберный пневмомотор

К недостаткам шибберных пневмомоторов относятся необходимость обильной смазки и невысокая герметичность рабочих камер, что приводит к возникновению утечек воздуха, а следовательно, к снижению КПД. Диапазон мощностей пластинчатых пневмомоторов составляет 0,05 – 20 кВт, диапазон частот вращения – 30 – 20 000 об/мин.

Часто в конструкцию пластинчатого пневмомотора входят дополнительные узлы: редуктор (обычно планетарный), обеспечивающий потребителю частоту вращения, и центробежный регулятор. Последний позволяет ограничить частоту вращения на холостом ходу и обеспечить в определенных пределах ее постоянство при колебаниях нагрузки.

Пластинчатые пневмомоторы широко применяют в разнообразных специальных устройствах и приспособлениях, работающих на сжатом воздухе.

### 2.6.3. ШЕСТЕРЕННЫЕ ПНЕВМОМОТОРЫ

В корпусе 3 шестеренного пневмомотора расположены две находящиеся в зацеплении шестерни 1 и 2 (зубчатые колеса), причем одна из них закреплена на выходном валу или выполнена заодно с ним, а другая свободно вращается на опорах, установленных в корпусе (рис. 2.52).

Сжатый воздух, подаваемый в рабочую камеру, действует на боковые поверхности зубьев шестерен. Возникающие при этом силы, равные произведению давления сжатого воздуха на площадь боковой поверхности зуба, вызывают поворот шестерен, одна из которых вращается по часовой стрелке, а другая – в противоположном направлении. Шестерни могут иметь прямые, косые или шевронные

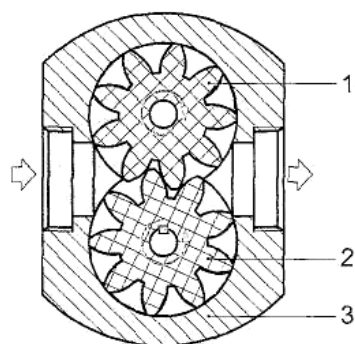


Рис. 2.52. Шестеренный пневмомотор

зубья. В случае применения косозубых или шевронных шестерен объемы рабочих камер изменяются в процессе поворота, в связи с чем появляется возможность использовать работу расширения сжатого воздуха.

Максимальная номинальная мощность шестеренных пневмомоторов достигает 70 кВт (для моторов с шевронными шестернями – 330 кВт), номинальная частота вращения обычно не превышает 1000 – 3000 об/мин.

Область применения шестеренных пневмомоторов достаточно широка.

## 2.6.4. РАДИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫЕ ПНЕВМОМОТОРЫ

Радиально-поршневые пневмомоторы довольно сложны по конструктивному исполнению, тихоходны (20 – 700 об/мин), имеют большие габариты и массу по сравнению с другими типами двигателей. При этом они обеспечивают значительную величину крутящего момента, а следовательно, как нельзя лучше подходят в тех случаях, когда требуется преодолевать большие нагрузки. Обычно они имеют от 4 до 6 поршней, а диапазон мощностей составляет 1 – 20 кВт.

В поршневых пневмомоторах поршню за счет энергии давления сжатого воздуха сообщается поступательное движение, которое затем преобразуется механическим путем во вращательное движение выходного вала (рис. 2.53).

Сжатый воздух одновременно подается в две рабочие камеры пневмомотора, например 1 и 2, через крановый распределитель 5, установленный на выходном валу.

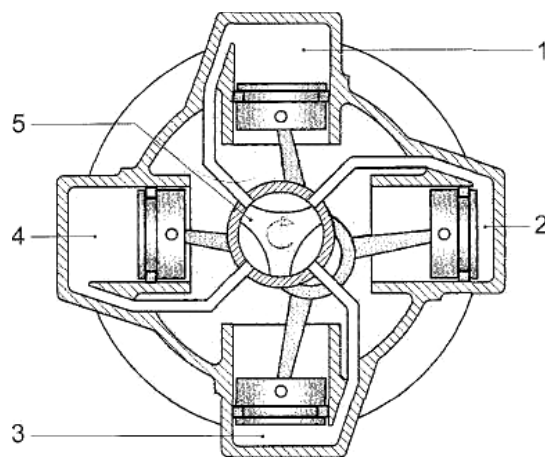
При этом соответствующие поршни, перемещаясь к нижней «мертвой точке», передают усилие на коленчатый вал через свои шатуны. После поворота вала, а вместе с ним и распределителя на некоторый угол сжатый воздух подается в рабочие камеры 2 и 3, а отработавший воздух из камер 4 и 1 сбрасывается в атмосферу также через крановый распределитель. Далее этот цикл повторяется.

Радиально-поршневые пневмомоторы применяют в больших подъемниках, в приводах различных транспортных средств.

## 2.6.5. ТУРБИННЫЕ ПНЕВМОМОТОРЫ

В турбинных пневмомоторах кинетическая энергия потока сжатого воздуха преобразуется в механическую энергию вращения выходного вала.

Турбинные пневмомоторы позволяют получать очень высокие частоты вращения (80 000 – 400 000 об/мин) выходного вала и небольшие крутящие моменты на нем по сравнению с частотами и моментами, достигаемыми при исполь-



**Рис. 2.53. Радиально-поршневой пневмомотор**







зовании, например, поршневых пневмомоторов. Турбинные моторы применяют для реализации высокоскоростного движения.

В путевых и строительных машинах широкого применения не нашли.

Пневмомоторы, вне зависимости от их конструктивного типа, обозначают на принципиальных пневматических схемах как показано в табл. 2.1.

**Таблица 2.1**

Пневмомоторы	Нерегулируемые	Регулируемые
Нереверсивные		
Реверсивные		

## 2.7. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ В МЕХАТРОНИКЕ

В пневматической ветви ГСП используется унифицированный сигнал – давление сжатого воздуха в диапазоне от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па. Это позволяет соединять различные приборы и регуляторы без дополнительного согласования их входных и выходных сигналов.

Промежуточные преобразователи предназначены для преобразования механических выходных сигналов датчиков (силы, перемещения) в унифицированные промежуточные сигналы. Кроме этого, они осуществляют преобразования неунифицированных электрических сигналов датчиков (электрическое сопротивление, э.д.с.) в унифицированные электрические сигналы, а также преобразования унифицированных пневматических сигналов в унифицированные электрические и наоборот.

Наибольшее распространение получили промежуточные преобразователи первой группы, поскольку большинство датчиков для измерения таких распространенных технологических параметров, как давление, уровень и расход, имеют механический выходной сигнал. Промежуточные преобразователи этой группы всегда составляют с датчиком одно устройство.

Преобразователи второй группы обычно применяют с датчиками температуры в случаях, когда сигнал необходимо передавать на устройство, имеющее только унифицированный вход, например УВМ.

Преобразователи третьей группы позволяют переходить от пневматической ветви ГСП к электрической и наоборот. Такой переход обычно необходим при управлении технологическими процессами, которые ведутся в пожаро- и взрывоопасных условиях. Если управление таким процессом ведется с помощью локальных АСР, то применяют элементы пневматической ветви ГСП или электрические, конструкция которых позволяет применять их во взрывоопасных помещениях. Если же используется АСУ ТП, то сигналы из цеха к УВМ и от УВМ в цех передаются через пневмоэлектрические и электропневматические промежуточные преобразователи.

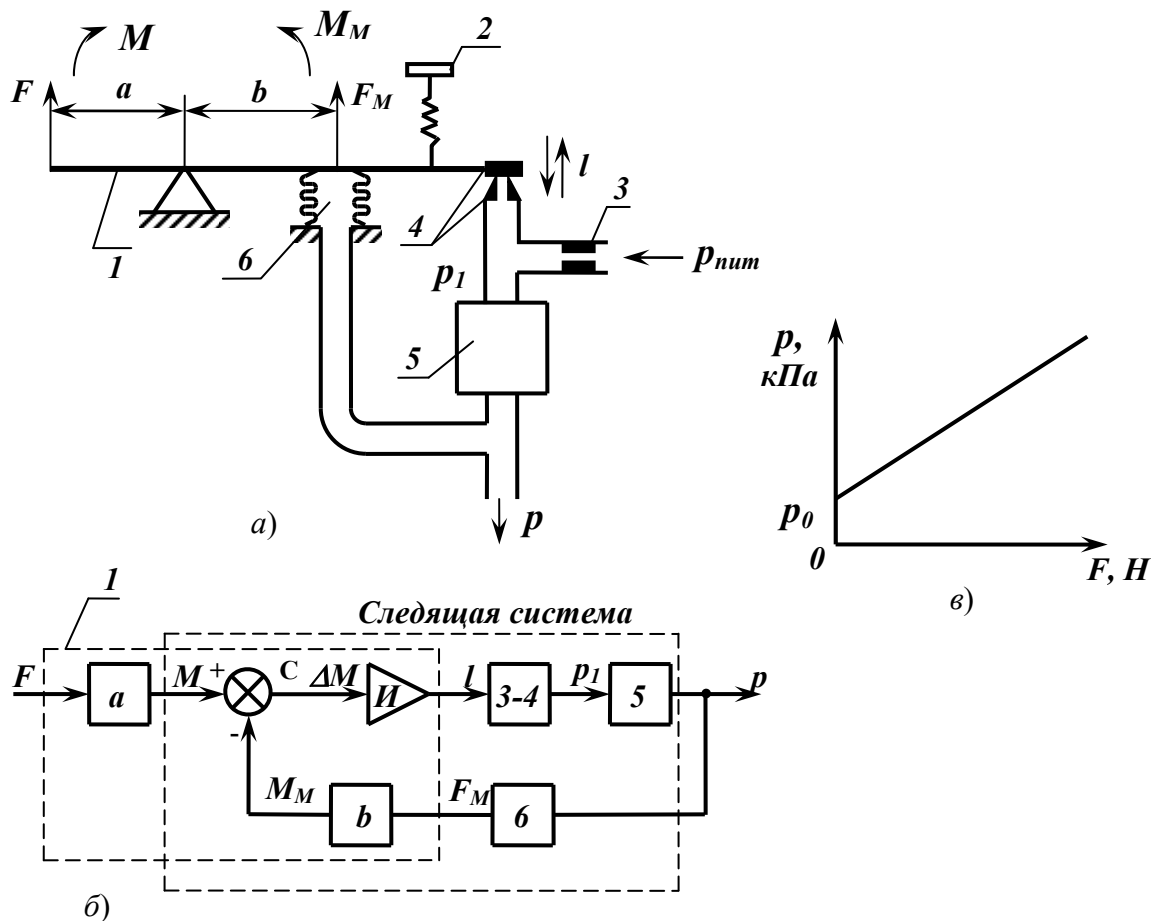
Промежуточный преобразователь представляет собой комбинацию элементарных преобразователей, обеспечивающую заданные метрологические характеристики: погрешность, стабильность, линейность, чувствительность. В большинстве преобразователей используется наиболее точный метод измерения – нулевой. Поэтому промежуточные преобразователи, как правило, представляет собой астатические следящие системы или статические с глубокой обратной связью.

Все промежуточные преобразователи пневматической ветви ГСП имеют одинаковый выходной унифицированный сигнал – давление сжатого воздуха от  $0,2 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Па. Среди промежуточных преобразователей с электрическим выходом наибольшее распространение получили преобразователи с выходным сигналом в виде постоянного тока, изменяющегося от 0 до 5 или от 4 до 20 мА. Такой выходной сигнал позволяет к одному промежуточному преобразователю подключить последовательно несколько потребителей: измерительные приборы, регуляторы, машины централизованного контроля системы управления.

### 2.7.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИЛЫ В ДАВЛЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Такой преобразователь (рис. 2.54, *a*) состоит из рычага *1*, сопла с заслонкой *4*, сильфона *6*, а также пневматического усилителя мощности *5*.

Входным сигналом преобразователя является сила *F*, приложенная к левому плечу рычага *a*, а выходным – давление сжатого воздуха *p* на выходе усилителя мощности.



**Рис. 2.54. Преобразователь силы в давление сжатого воздуха:**

$a$  – устройство;  $b$  – структурная схема;  $v$  – статическая характеристика;  
 $l$  – рычаг;  $2$  – корректор нуля;  $3$  – постоянный дроссель;  $4$  – сопло с заслонкой;  
 $5$  – усилитель мощности;  $6$  – сифон;  $a, b$  – плечи рычага;  $C$  – сумматор;  $I$  – интегратор

На рисунке 2.54,  $b$  приведена структурная схема преобразователя, из которого видно, что его можно представить в виде последовательного соединения двух преобразователей: преобразователя измеряемой силы  $F$  в момент  $M$  (приложенный к рычагу  $l$ ) и преобразователя этого момента в выходное давление  $p$ . Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в которой обратным преобразователем является сифон  $b$  вместе с правым плечом  $b$  рычага  $l$ . Рычаг одновременно выполняет функции преобразования приложенных к нему сил  $F$  и  $F_M$  в моменты  $M$  и  $M_M$  (преобразователи  $a$  и  $b$ ), вычитания этих моментов сумматора ( $C$ ) и интегратора ( $I$ ).

Рассмотрим принцип действия преобразователя. К рычагу приложены измеряемая сила  $F$  и сила  $F$ , создаваемая сифоном  $b$ . Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты

$$M = aF, \quad (2.1)$$

$$M_M = bF_M, \quad (2.2)$$

где  $a$  и  $b$  – длины плеч рычага.

Результирующий вращающий момент  $\Delta M = M - M_M$  вызывает поворот рычага  $l$  и перемещение  $l$  расположенной на нем заслонки элементарного преобразователя сопло-заслонка 3, 4. Выходной сигнал этого преобразователя – давление сжатого воздуха  $p_1$  – после усиления по мощности в усилителе 5 становится выходным сигналом  $p$  всего преобразователя. Этот выходной сигнал подается на вход обратного преобразователя – сильфона 6, замыкая тем самым цепь обратной связи.

Наличие в следящей системе интегратора И в виде рычага делает ее астатической. Следовательно, в установившемся состоянии такой системы рассогласование равно нулю. Так как в рассматриваемом преобразователе рассогласованием является разность моментов  $M$  и  $M_M$ , которые в состоянии равновесия оказываются равными. Это означает, что связь выходного сигнала следящей системы  $p$  с ее входным сигналом  $M$  такая же, как с сигналом  $M_M$ . Но, как видно из структурной схемы, момент  $M_M$  – результат преобразования выходного давления  $p$  двумя преобразователями в цепи обратной связи: сильфоном 6 и плечом  $b$  рычага  $l$ .

Таким образом, статическая характеристика всей следящей системы, как преобразователя момента  $M$  в давление  $P$ , определяется только статической характеристикой цепи обратной связи.

Найдем статическую характеристику цепи обратной связи. Для сильфона имеем:

$$F_M = Sp. \quad (2.3)$$

Подставляя это выражение в формулу для рычага (2.2), получим статическую характеристику всей цепи обратной связи:

$$M_M = bSp. \quad (2.4)$$

Искомая статическая характеристика следящей системы получается из уравнения (2.4), если заменить в нем  $M_M$  на  $M$  и затем решить относительно  $P$ :

$$P = M/bS. \quad (2.5)$$

Теперь можно получить статическую характеристику всего преобразователя. Для этого достаточно заменить момент  $M$  силой  $F$  по формуле (2.1):

$$P = kF,$$

где коэффициент пропорциональности  $k = a/bS$  – коэффициент передачи преобразователя.

Тот факт, что статическая характеристика астатической следящей системы определяется только характеристикой обратной связи, является важным свойством следящих систем как измерительных устройств. Благодаря этому свойству метрологические требования ко всей системе могут быть выполнены в результате выбора преобразователя в цепи обратной связи с необходимой характеристикой. При этом в прямой цепи следящей системы могут быть применены преобразователи с низкими метрологическими качествами.

Так, в нашем случае перемещение рычага  $l$  преобразуется в выходное давление  $p$  преобразователем сопло–заслонка и усилителем мощности. Такое преобразование является нелинейным и, кроме того, зависит от давления питания  $p_{\text{пит}}$ .

В преобразователе имеется корректор нуля 2 (пружина). Изменяя натяжение пружины, можно создавать дополнительный вращающий момент на рычаге и тем самым изменять величину входного сигнала преобразователя при неизменном значении входного. При наладке преобразователя корректором устанавливают начальное значение выходного давления ( $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па) при нулевом значении измеряемой силы  $F$ .

С учетом влияния корректора статическая характеристика преобразователя силы в давление сжатого воздуха примет вид:

$$p = p_0 + kF. \quad (2.6)$$

График этой характеристики приведен на рис. 2.55, в.

Следует подчеркнуть, что в данном преобразователе с помощью астатической следящей системы реализуется нулевой метод измерения. При этом роль переменной меры играют преобразователи в цепи обратной связи. Такой же прием используется во всех промежуточных преобразователях, которые будут описаны ниже.

Рассмотренный преобразователь может служить и для преобразования перемещения и давления сжатого воздуха. В этом случае перед ним включают дополнительный преобразователь перемещения в силу (например, пружину).

Для преобразования силы в давление сжатого воздуха промышленность выпускает преобразователи, обычно объединенные в один блок с первичным преобразователями, имеющими выходной сигнал в виде силы. Поэтому для них регламентируются лишь предельное расстояние передачи выходного сигнала по пневмотрассе (300 м) и постоянная времени (равная 7 с) при работе преобразователя на тупиковую импульсную трубку длиной 60 м и внутренним диаметром 6 мм. Эта постоянная времени обусловлена нагрузочным эффектом и зависит от мощности выходного сигнала, для повышения которого и применен пневматический усилитель мощности.

Предельное значение силы  $F$ , измеряемой преобразователем, для различных моделей – от 10 до 100 Н.

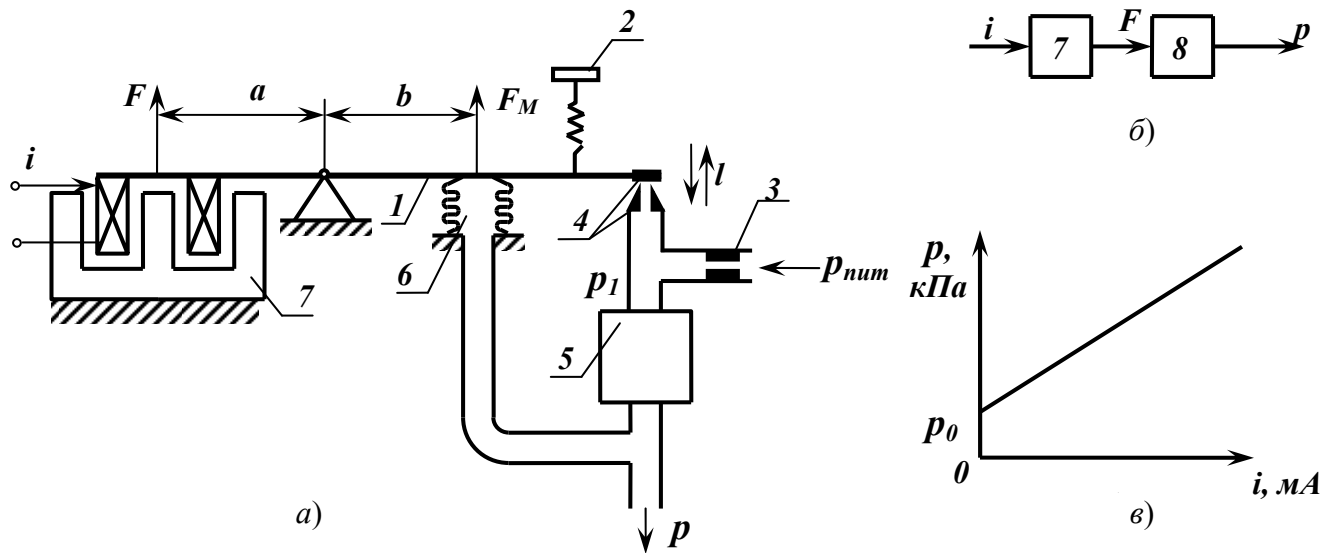
### 2.7.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТОКА В ДАВЛЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Такой преобразователь (рис. 2.55, *а*) состоит из рычага 1, преобразователя сопло-заслонка 3, 4, сильфона 6, магнитоэлектрического преобразователя 7, а также пневматического усилителя мощности 5.

Входным сигналом преобразователя является ток  $i$  в катушке магнитоэлектрического преобразователя, а выходным – давление сжатого воздуха  $p$  на выходе усилителя мощности.

Сравнив этот преобразователь с рассмотренным выше, можно, заметить, что он представляет собой последовательное соединение двух преобразователей (рис. 2.55, *б*). Первый – магнитоэлектрический преобразователь 7 входного тока  $i$  в силу  $P$ . Второй – преобразователь 8 этой силы в выходное давление сжатого воздуха  $P$ . Так как статические характеристики обоих преобразователей линейны, то и статическая характеристика всего преобразователя тока в давление сжатого воздуха также линейна.

Статическая характеристика преобразователя приведена рис. 2.55, *в*.



**Рис. 2.55. Преобразователь тока в давление сжатого воздуха:**

*a* – устройство; *б* – структурная схема; *в* – статическая характеристика;

*1* – рычаг; *2* – корректор нуля; *3* – постоянный дроссель; *4* – сопло с заслонкой;

*5* – усилитель мощности; *6* – сильфон; *7* – магнитоэлектрический преобразователь;

*8* – преобразователь силы в давление сжатого воздуха

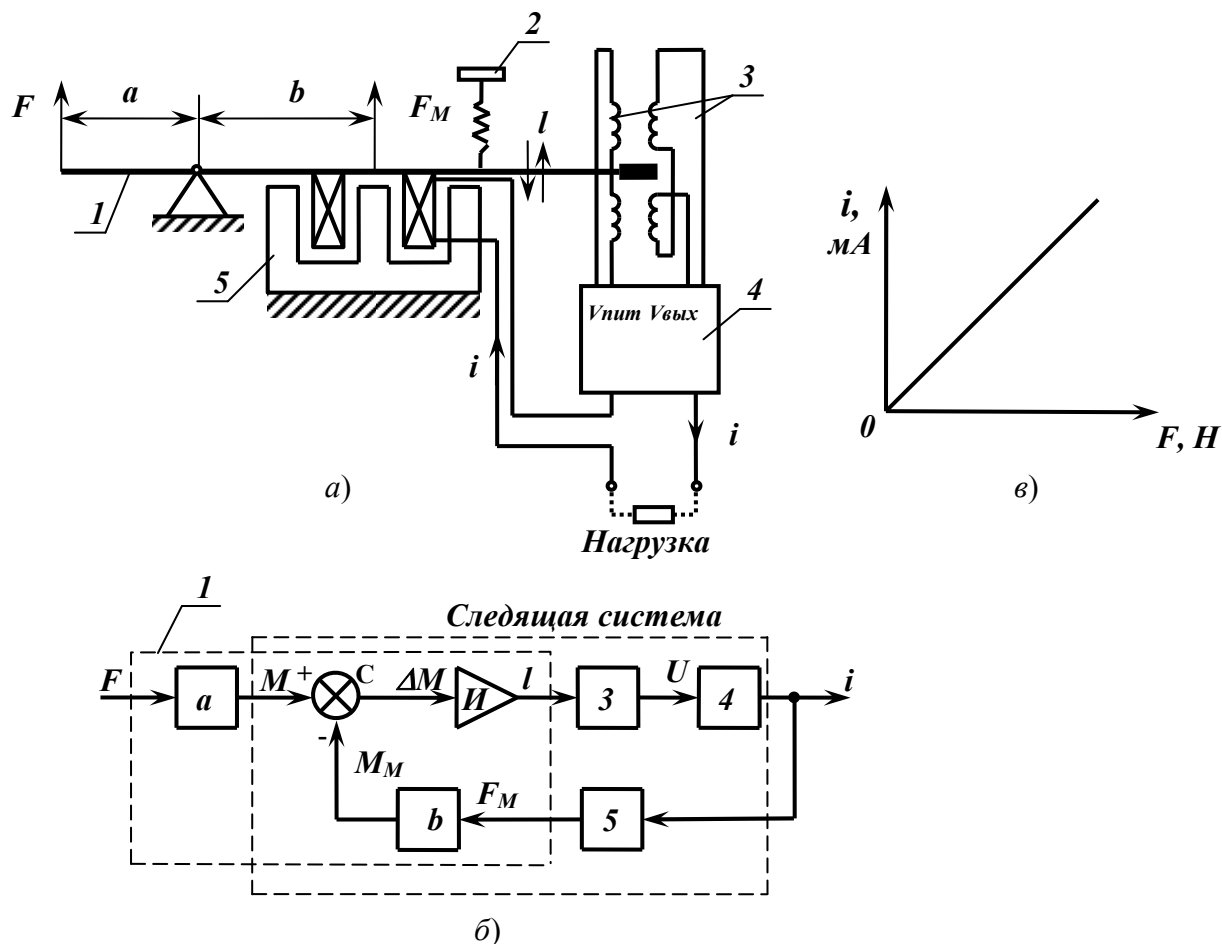
Установка начального значения выходного давления  $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$  Па при нулевом входном токе производится корректором нуля *2*.

### 2.7.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИЛЫ В ТОК

Преобразователь (рис. 2.56, *a*), состоит из рычага *1*, дифференциально-трансформаторного преобразователя *3*, магнитоэлектрического преобразователя *5*, а также электронного усилителя *4* с выпрямителем переменного тока.

Входным сигналом преобразователя является сила *F*, приложенная к левому плечу рычага *a*, а выходным – ток *i* на выходе усилителя.

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 2.56, *б*. Из схемы видно, что его можно представить в виде двух последовательно соединенных преобразователей: преобразователя измеряемой силы *F* в момент *M* (приложенный к рычагу *1*) и преобразователя этого момента в выходной сигнал *i*. Второй преобразователь представляет собой следящую систему, в цепь обратной связи, которой включен магнитоэлектрический преобразователь *5* вместе с правым плечом рычага *b*. Рычаг выполняет те же функции, что и в преобразователях двух рассмотренных выше типов.



**Рис. 2.56. Преобразователь силы в ток:**

*a* – устройство; *б* – структурная схема; *в* – статическая характеристика;  
*l* – рычаг; 2 – корректор нуля; 3 – дифференциально-трансформаторный преобразователь;  
 4 – усилитель; 5 – магнитоэлектрический преобразователь

Принципы действия этих преобразователей во многом схожи. Здесь на рычаг *l* также действуют две силы: измеряемая сила *F* и сила  $F_M$ , создаваемая магнитоэлектрическим преобразователем 5. Моменты этих сил *M* и  $M_M$  сравниваются на рычаге, и результирующий вращающий момент  $\Delta M$  вызывает поворот рычага и перемещение *l* прикрепленного к нему плунжера дифференциально-трансформаторного преобразователя 3. Этот преобразователь преобразует перемещение *l* в напряжение *U* переменного тока, которое затем усиливается и выпрямляется в электронном усилителе 4. Выходной сигнал усилителя – постоянный ток *i* – проходит через внешнюю нагрузку (например, миллиамперметр) и катушку магнитоэлектрического преобразователя, которые включены последовательно. Иначе говоря, выходной сигнал преобразователя – ток *I* – подается на вход магнитоэлектрического преобразователя 7, замыкая тем самым контур обратной связи следя-



щей системы. Наличие интегратора И (рычага) делает эту систему астатической аналогично следящей системе на рис. 2.56, б. Поэтому статическая характеристика системы также определяется статической характеристикой цепи обратной связи. Магнитоэлектрический преобразователь в этой цепи имеет линейную характеристику и поэтому статическая характеристика всей следящей системы – зависимость тока  $i$  от момента  $M$  – также линейна. А так как характеристика преобразователя силы  $F$  в момент  $M$  линейная, то и статическая характеристика всего преобразователя оказывается также линейной. Эта характеристика приведена на рис. 2.56, в.

Промышленность выпускает преобразователь силы в ток, который состоит из двух отдельных блоков. Один блок включает в себя элементы, имеющие механическую связь между собой: рычаг дифференциально-трансформаторный преобразователь и магнитоэлектрический преобразователь. Вторым блоком преобразователя является электронный усилитель. Расстояние между блоками должно быть не более 3 м при монтаже линии связи неэкранированным кабелем и не более 100 м при монтаже экранированным кабелем. Сопротивление нагрузки – не более 2500 Ом.

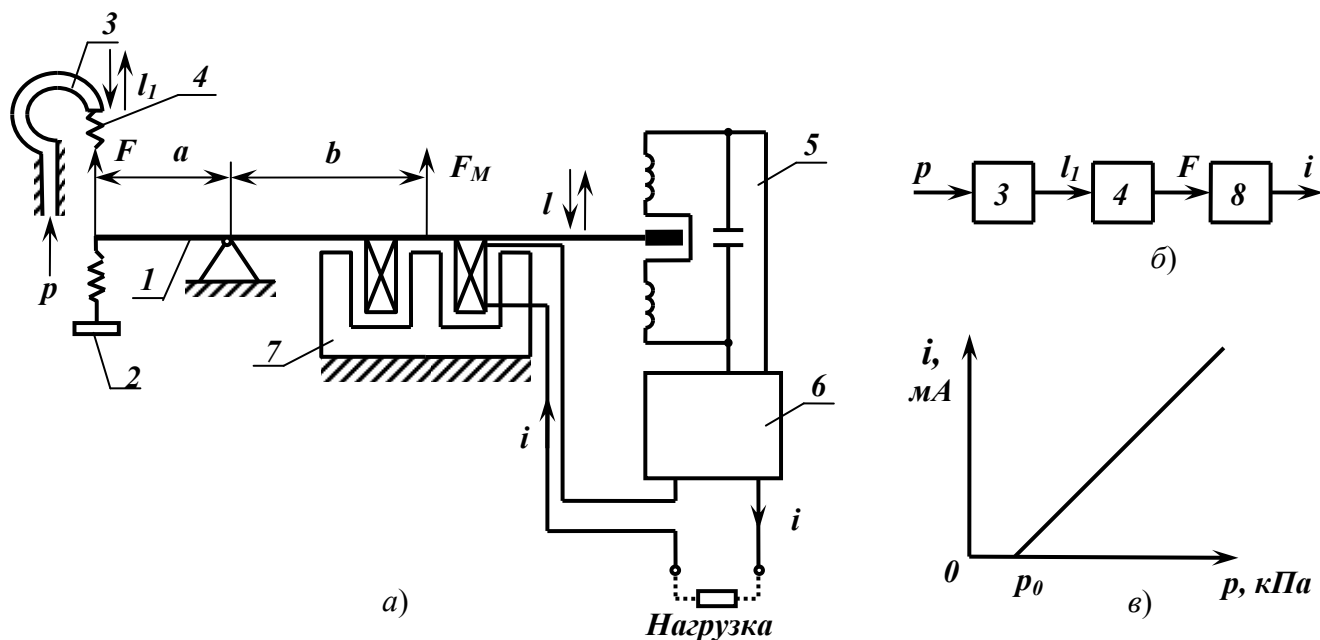
Измерительные приборы или другие потребители, например регулятор, могут быть подключены к преобразователю по двум схемам: измерения тока или измерения напряжения. В первом случае несколько потребителей соединяются последовательно друг с другом, во втором – параллельно специальному нагрузочному резистору.

В преобразователе имеется корректор нуля 2 – пружина, натяжением которой устанавливают нулевое значение выходного тока при нулевом значении измеряемой силы.

Максимальная сила, измеряемая преобразователем, в зависимости от модели, от 10 до 100 Н.

#### 2.7.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ТОК

Такой преобразователь (рис. 2.57, а) состоит из трубчатой пружины 3, пружины 4, рычага 1, колебательного контура 5 специального усилителя 6 и магнитоэлектрического преобразователя 7.



**Рис. 2.57. Преобразователь давления сжатого воздуха в ток:**

*a* – устройство; *б* – структурная схема; *в* – статическая характеристика;

*1* – рычаг; *2* – корректор нуля; *3* – трубчатая пружина; *4* – пружина; *5* – колебательный контур;

*б* – усилитель; *7* – магнитоэлектрический преобразователь; *8* – преобразователь силы в ток

Входным сигналом преобразователя является давление сжатого воздуха  $P$ , подаваемое в трубчатую пружину, а выходным – ток  $i$ .

Структурная схема преобразователя приведена на рис. 2.57, б. Как видно из схемы, преобразователь представляет собой последовательное соединение трех преобразователей. Первый – преобразователь 3 давления сжатого воздуха  $P$  в перемещение  $l_1$  конца трубчатой пружины, второй преобразователь 4 этого перемещения в силу  $F$ , приложенную к левому плечу  $a$  рычага  $1$ . Статические характеристики обоих этих преобразователей линейны. Третий преобразователь 8 силы  $F$  в выходной ток  $i$  почти аналогичен предыдущему. Отличается он лишь тем, что перемещение  $l$  преобразуется не в напряжение переменного тока  $U$ , а в резонансную частоту колебательного контура 5 и затем усилителем 6 – в выходной ток  $i$ .

Статическая характеристика преобразователя 8 определяется характеристикой магнитоэлектрического преобразователя 7 и поэтому линейна. Следовательно, рассмотренный преобразователь, измерительная цепь которого состоит из трех преобразователей, имеет линейную статическую характеристику (рис. 2.57, в).

В преобразователе имеется: корректор нуля 2, изменяющий натяжение пружины 4. Этим корректором устанавливают нулевое значение выходного тока при начальном значении измеряемого давления  $P_0$ .

### 2.7.5. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРЕМЕЩЕНИЕ

Принципиальная схема преобразователя приведена на рис. 2.58, а. Прибор состоит из сильфона 10, рычага 1, сопла с заслонкой 2, мембраны 4, связанной с рычагом 5, и пружины 9, связанной с другим концом рычага 5 леской 6. На леске укреплена стрелка показывающего устройства 7. Структурная схема прибора дана на рис. 2.58, б. Измерительная цепь состоит из четырех преобразователей. Первый – сильфон 10 – преобразует измеряемое давление  $P$  в силу  $F$ , приложенную к рычагу 1. Второй преобразует эту силу в момент  $M$ . Функцию этого преобразователя

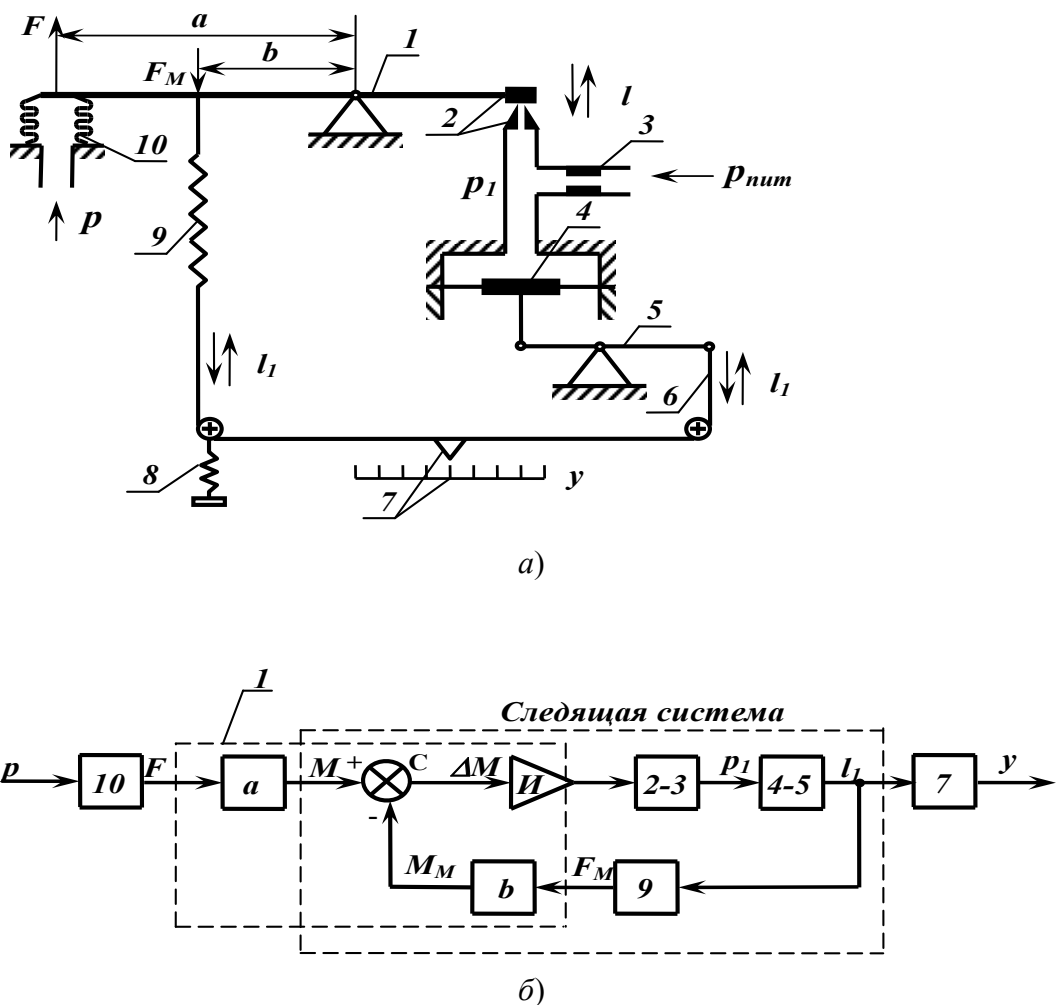


Рис. 2.58. Преобразователь давления в перемещение:

$a$  – принципиальная схема;  $b$  – структурная схема

выполняет большее плечо  $a$  рычага  $l$ . Третий преобразует этот момент в перемещение стрелки  $l$  и представляет собой следящую систему. Цепь обратной связи этой системы образована пружиной  $9$  и меньшим плечом  $b$  рычага  $l$ . Наконец, четвертый преобразователь – показывающее устройство  $7$  – преобразует перемещение стрелки относительно шкалы в перемещение  $y$ .

Рассмотрим принцип действия преобразователя. К плечам рычага  $l$  приложены две силы: сила  $F$ , развиваемая сильфоном, и сила  $F_m$ , создаваемая пружиной. Эти силы создают на рычаге противоположно направленные моменты  $M$  и  $M_m$ . Результирующий момент  $\Delta M$ , равный их разности, преобразуется в перемещение  $l$  заслонки относительно сопла. Выходное давление  $P_1$  преобразователя сопло-заслонка  $2, 3$  действует на мембрану  $4$ . Прогиб мембраны вызывает поворот рычага  $5$ . При этом правый конец рычага тянет леску  $6$ , вызывая перемещение  $l$  нижнего конца пружины. Это перемещение является выходным сигналом следящей системы и одновременно входным сигналом цепи обратной связи. Растяжение пружины вызывает силу  $F_m$ , которая через меньшее плечо рычага  $b$  создает на нем момент  $M_m$ , замыкая тем самым контур обратной связи следящей системы.

В прямой цепи этой системы находится интегратор, роль которого выполняет рычаг  $l$ , и поэтому она является астатической. Статическая характеристика астатической системы, как известно, определяется характеристикой элементов в цепи обратной связи – пружины  $9$  с плечом  $b$  рычага. Следовательно, она линейная. Остальные элементы цепи на рис. 2.58,  $6$  имеют также линейные характеристики, поэтому шкала преобразователя получается одномерной.

### **3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ГИДРОПРИВОДЫ В СОСТАВЕ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

---

#### **3.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМАХ**

Гидравлические исполнительные механизмы преобразуют энергию давления жидкости в механическую энергию перемещения или вращения.

Гидравлические исполнительные механизмы (ГИМ) имеют ряд важных преимуществ перед электрическими, а именно:

- они обладают большими мощностями и быстродействием, чем электрические исполнительные механизмы при тех же габаритах и массах;
- они позволяют получить большие перестановочные усилия при сохранении высокого уровня плавности перемещения выходного штока или вращения выходного вала.

Наиболее широкое применение они находят в тех случаях, когда при относительно небольших габаритах и массах самих ГИМ требуется развивать большие усилия:

- для перемещения рабочих органов (например, отвала бульдозера, ковша экскаватора и др.) в дорожных и строительных машинах;
- для приведения в движение выходного звена (вала, штока), соединенного с регулирующим органом систем автоматического управления газовыми, гидравлическими или паровыми турбинами;
- для управления регулирующими и рабочими органами в машинах и агрегатах машиностроительной, легкой, пищевой, сельскохозяйственной и других отраслей промышленности и народного хозяйства.

Рабочим телом в ГИМ является жидкость.

К основным и наиболее распространенным параметрам, характеризующим состояние жидкости, относятся давление, температура и плотность.

Основными параметрами самих ГИМ являются:

- рабочий объем;
- максимальная величина перемещения (угла поворота) выходного штока (вала);
- максимальная скорость перемещения выходного штока (вращения выходного вала);
- номинальное давление жидкости;
- перестановочное усилие или вращающий момент, развиваемые при номинальном давлении жидкости;
- момент инерции вращающихся частей;
- масса (вес) без жидкости;
- общий коэффициент полезного действия;
- объемный коэффициент полезного действия.

Чаще всего ГИМ входят в состав гидравлических исполнительных устройств (ГИУ), включающих в себя ГИМ и регулирующий орган (РегО). При этом выходной шток (вал) ГИМ соединяют с регулирующим органом (РегО) непосредственно или через механическую систему передачи перемещений и усилий. В некоторых случаях ГИМ соединяют непосредственно с рабочим органом (Рабо).

В качестве примеров РегО можно привести:

- регулирующие клапаны, задвижки, шиберы, поворотные заслонки;
- электрические автотрансформаторы, переменные активные сопротивления (реостаты);
- механизм для изменения расстояния между неподвижными и подвижными ножами измельчителя корне- и клубнеплодов и др.

Главным назначением РегО чаще всего является изменение интенсивности потока энергии или вещества, подводимых к объекту правления.

Примерами Рабо можно считать:

- отвал бульдозера или ковш экскаватора, используемые для выполнения работы при перемещении сыпучих материалов (земли, песка и др.);
- неподвижные и подвижные ножи устройства для измельчения корне- и клубнеплодов в сельскохозяйственном производстве и т.п.

Главным назначением РаБО чаще всего является выполнение работы (технологической операции), для осуществления которой предназначено устройство, включающее в себя этот рабочий орган.

### 3.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАБОТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Гидравлические исполнительные механизмы состоят из двух основных частей:

- 1) гидропривод (гидродвигатель);
- 2) управляющее устройство либо с дроссельным, либо с объемным (гидростатическим), либо со струйным управлением.

ГИМ с дроссельным управлением работают при постоянном давлении рабочей жидкости. При этом в качестве управляющих устройств (дросселей) обычно используют золотниковые пары. Значительно реже (преимущественно в мало-мощных ГИМ) применяют дроссели на основе струйной трубки.

#### 3.2.1. КОНСТРУКЦИИ ГИДРОПРИВОДОВ (ГИДРОДВИГАТЕЛЕЙ)

По виду движения выходного штока (вала) гидроприводы подразделяются на два основных типа:

- гидроприводы с возвратно-поступательным движением поршня (поршневые двигатели);
- гидроприводы с возвратно-поворотным движением выходного вала, соединенного либо с поршнем (мембраной, сильфоном), либо с поворотной лопастью;
- гидродвигатели вращательного движения (гидромоторы), применяемые в ГИМ с объемным регулированием и рассмотренные ниже в параграфе 3.3.

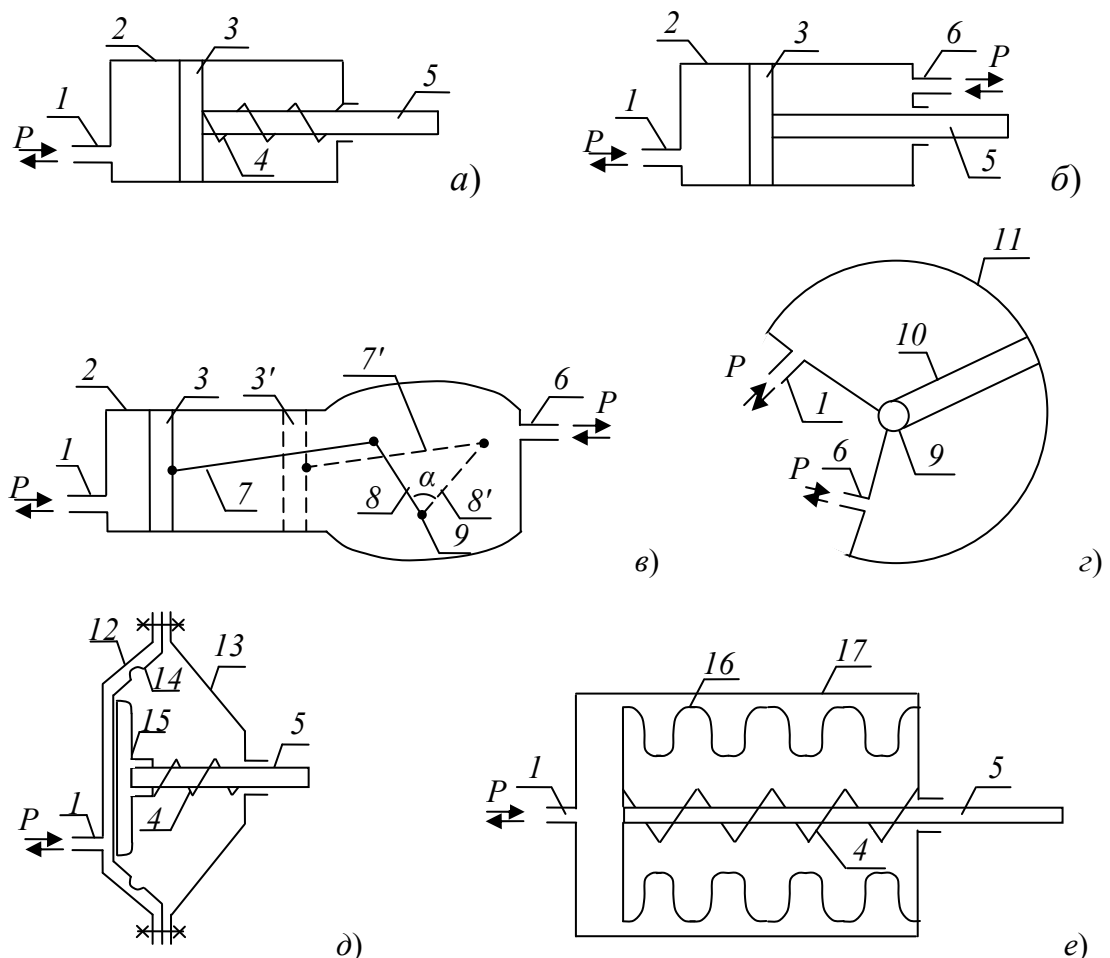
Основные конструктивные схемы поршневых, лопастных, мембранных и сильфонных гидроприводов показаны на рис. 3.1.

В гидроприводе простого действия (рис. 3.1, *a*) движение поршня 3 и штока 5 вправо осуществляется за счет силы, создаваемой давлением  $P$  жидкости, подводимой в левую полость цилиндра 2 через штуцер 1. Обратное движение поршня 3 влево происходит за счет усилия пружины 4 после снятия давления, подводимого через штуцер 1. При этом жидкость из полости силового цилиндра 2

отводится через штуцер *1*. При вертикальном расположении цилиндра *2* обратное движение поршня *3* (после снятия давления *P*) может осуществляться за счет силы веса рабочего органа, для подъема и опускания которого используется гидропривод простого действия.

В гидроприводах двойного действия (рис. 3.1, *б, в*) движение поршня *3* в ту или другую сторону осуществляется за счет сил, создаваемых давлением жидкости, подводимой через штуцеры *1* или *б*.

Показанный на рис. 3.1, *в* гидропривод с кривошипно-шатунным механизмом обеспечивает преобразование линейного перемещения поршня *3* в поворот выходного вала *9* гидравлического исполнительного механизма на угол  $\alpha$ , обычно не более 90 – 120 угловых градусов.



**Рис. 3.1. Схемы гидроприводов:**

- а* – поршневой простого действия; *б* – поршневой двойного действия с линейным перемещением штока; *в* – поршневой двойного действия с кривошипно-шатунным механизмом;
- г* – лопастной двойного действия с поворотной лопастью;
- д* – диафрагменный простого действия; *е* – сильфонный простого действия



Крайние левые положения поршня 3, шатуна 7 и кривошипа 8 на рис. 3.1, в показаны сплошными линиями, а крайние правые положения поршня 3', шатуна 7' и кривошипа 8' – показаны пунктирными линиями.

В гидроприводах двойного действия с поворотной лопастью (рис. 3.1, з), применяемых при относительно низких давлениях рабочих жидкостей, угол поворота выходного вала 9 обычно не превышает 270 – 300 угловых градусов. При подаче давления  $P$  через штуцер 1 в верхнюю полость камеры 11 лопасть 10 и выходной вал 9 поворачиваются по часовой стрелке, вытесняя жидкость из нижней полости через штуцер 6. При подаче давления через штуцер 6 в нижнюю полость камеры 11 происходит поворот лопасти 10 и выходного вала 9 в обратном направлении. Недостатком этого варианта гидропривода является сложность обеспечения плотного прилегания лопасти 10 к цилиндрической и торцевым поверхностям камеры 11, что приводит к снижению объемного коэффициента полезного действия таких ГИМ.

Диаметры гидроцилиндров и ходы штоков (углы поворота выходных валов) ГИМ общепромышленного назначения относительно невелики. Гидроцилиндры большого диаметра (более 150 мм) и гидроцилиндры с большим ходом поршня (до 3500 мм) являются, как правило, устройствами не общепромышленного, а специального назначения и обычно проектируются и разрабатываются одновременно с автоматизируемым агрегатом и встраиваются в него в качестве неотъемлемой его части.

В устройствах для фиксирования (зажимания, удерживания) деталей с ограниченной величиной перемещения применяют мембранные и сильфонные гидроприводы одностороннего действия.

Мембранный гидропривод (рис. 3.1, д) представляет собой корпус, состоящий из двух деталей 12 и 13, между которыми закреплена диафрагма 14, изготовленная из резины, прорезиненной ткани или армированной тканью полимерного материала. Значительная часть мембраны прикреплена к диску 15. При подаче давления  $P$  через штуцер 1 мембрана воздействует на диск 15, преодолевает силу пружины 4 и перемещает шток 5 вправо. После снятия давления  $P$  жидкость вытесняется из левой полости под действием пружины 4. Величина хода штока 5 обычно не превышает 15 – 25% внешнего диаметра диафрагмы 14.

Сильфонный гидропривод (рис. 3.1, *е*) одностороннего действия представляет собой сильфон *16* (размещенный в корпусе *17*), снабженный штоком *5*. При подаче давления  $P$  в штуцер *1* сильфон *16* сжимается и перемещает шток *5* вправо. При снятии давления за счет упругости (пружинных свойств) сильфона *16* жидкость вытесняется через штуцер *1*, а шток *5* перемещается влево. При необходимости сильфон может быть снабжен дополнительной пружиной *4*. Чаще всего дополнительную пружину *4* размещают непосредственно на штоке *5* по аналогии с тем, как это показано на рис. 3.1, *а, д*.

Мембранные и сильфонные ГИМ при необходимости могут быть выполнены в виде устройств двустороннего действия.

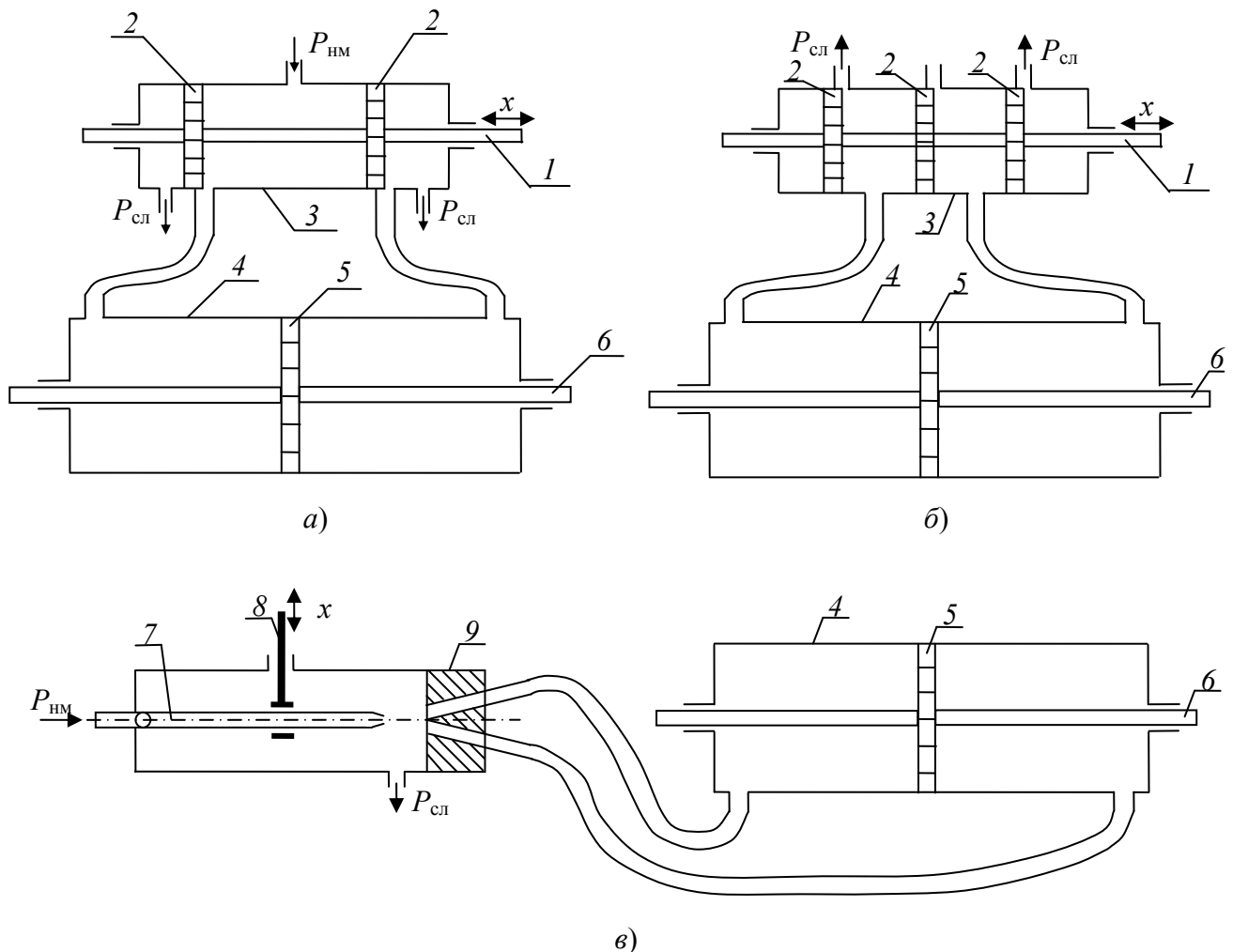
### 3.2.2. УПРАВЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

ГИМ с дроссельным регулированием работают при постоянном давлении рабочей жидкости. В качестве управляющих устройств чаще всего применяются золотниковые пары, реже (преимущественно в маломощных ГИМ) используют механизмы со струйной трубкой. В зависимости от числа регулирующих дросселей золотниковые управляющие устройства ГИМ подразделяют на двух- и трехпоршеньковые.

Перемещение поршня *5* и штока *б* каждого из представленных на рис. 3.2, *а, б* гидроцилиндров *4* происходит за счет изменения площади поперечного сечения окон золотников, определяемых смещением штоков *1* (с закрепленным на них поршеньками *2*) внутри цилиндрической камеры *3*.

При нейтральном положении штока *1* с поршеньками *2* (в корпусе *3* золотника) каналы для подвода давления  $P_{\text{нм}}$  (из напорной магистрали) закрыты, при этом жидкость не поступает от насоса ни в одну из полостей гидроцилиндра *4* и его поршень *5* и шток *б* остаются неподвижными. При смещении штока *1* и поршеньков *2* влево (рис. 3.2, *а*) рабочая жидкость по каналам и трубопроводам поступает в левую полость гидроцилиндра *4* и его поршень *5* и шток *б* перемещаются вправо. Если же штоки *1* и поршеньки *2* в корпусе *3* золотников (рис. 3.2, *а*) сместить вправо от нейтрального положения, то рабочая жидкость будет посту-

пять в правую полость гидроцилиндра 4 и его шток 6 начнут перемещаться влево (рис. 3.2, а, б), и из левых полостей рабочая жидкость с давлением  $P_{\text{сл}}$  пойдет на слив в гидробак.



**Рис. 3.2. Схемы управляющих устройств ГИМ с дроссельным управлением:**

*а* – золотниковое с двумя регулируемыми поршеньками;

*б* – золотниковое с тремя регулируемыми поршеньками; *в* – со струйной трубкой

Аналогично работает система управления на основе золотника с тремя поршеньками, представленная на рис. 3.2, б.

Схема ГИМ с управляющим устройством на основе струйной трубки *б* приведена на рис. 3.2, в. При симметричном расположении конической насадки струйной трубки 7 относительно двух прямых каналов в стенке 9, давление рабочей жидкости в каждом канале одинаковое и шток 5 гидроцилиндра 4 неподвижен. При перемещении штока 8 происходит поворот струйной трубки *б* вверх или вниз. Если струйная трубка *б* повернулась против часовой стрелки (ее коническая

насадка поднялась), то давление в верхнем канале стенки 9 повысится, а давление в нижнем канале – понизится. В результате поршень 5 и шток 6 гидроцилиндра 4 начнет перемещаться вправо. Аналогично, при повороте струйной трубки 6 по часовой стрелке давление в нижнем канале стенки 9 повысится, а в верхнем канале – понизится, что приведет к движению поршня 5 и штока 6 влево.

Недостатком управляющих устройств со струйной трубкой является постоянный расход рабочей жидкости через коническую насадку трубки. Поэтому КПД ГИМ со струйной трубкой гораздо ниже, чем у ГИМ с золотниковыми (дроссельными) управляющими устройствами. Применение ГИМ со струйной трубкой целесообразно в сравнительно маломощных системах. Наиболее часто такие механизмы со струйной трубкой используют в качестве управляющих устройств более мощных ГИМ с золотниковым управлением.

### 3.3. ОБЪЕМНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ [1]

Объемная гидropередача (гидропривод) с вращательным движением выходного звена гидродвигателя (часто называемая гидравлической трансмиссией) состоит из объемных гидронасоса и гидромотора регулируемого или нерегулируемого типов, соединенных между собой трубопроводами.

В объемных гидropередачах энергия давления рабочей жидкости, подаваемой гидронасосом, преобразовывается с помощью гидромотора в механическую работу на выходном его валу.

Действие объемной гидropередачи можно сравнить (рис. 3.3) с работой шариковой связи ведущего и ведомого валов, в которой ведомая звездочка *b* (соответствующая гидромотору) приводится во вращение шариками *c*, вытесняемыми по шарикоприводу ведущей звездочкой *a* (соответствующей гидронасосу).

Ниже рассмотрены основные сведения сначала об устройстве и работе гидронасосов и гидромоторов, а затем и о функционировании объемных гидравлических передач вращательного движения.

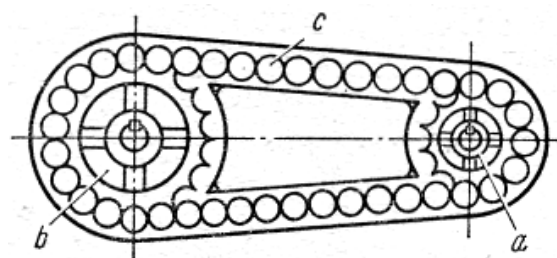


Рис. 3.3. Схема шариковой связи для передачи энергии вращения с ведущего вала на ведомый

### 3.3.1. ГИДРОМОТОРЫ И ГИДРОНАСОСЫ

Гидромоторы – это устройства, предназначенные для преобразования энергии жидкости в механическую энергию вращения выходного вала с последующим воздействием на рабочий орган, выполняющий определенные технологические функции в составе машин и агрегатов, применяемых в газовой и нефтяной отраслях, авиации и космической индустрии, автомобильном транспорте и автокранах, строительной технике и коммунальных машинах, а также в железнодорожной, лесотехнической, сельскохозяйственной и других отраслях.

В составе средств автоматизации в мехатронных и робототехнических системах применяют в основном следующие виды гидромоторов (гидродвигателей с вращательным движением выходного вала), а именно:

- роторные радиально-поршневые;
- роторные аксиально-поршневые;
- шестеренные;
- лопастные (шиберные, пластинчатые).

#### 3.3.1.1. Роторные радиально-поршневые гидромашины [1]

Роторная радиально-поршневая гидромашина представляет собой гидромашину (насос или гидромотор), у которой оси поршней или плунжеров перпендикулярны оси вращения ротора (или составляют с ней углы более  $45^\circ$ ).

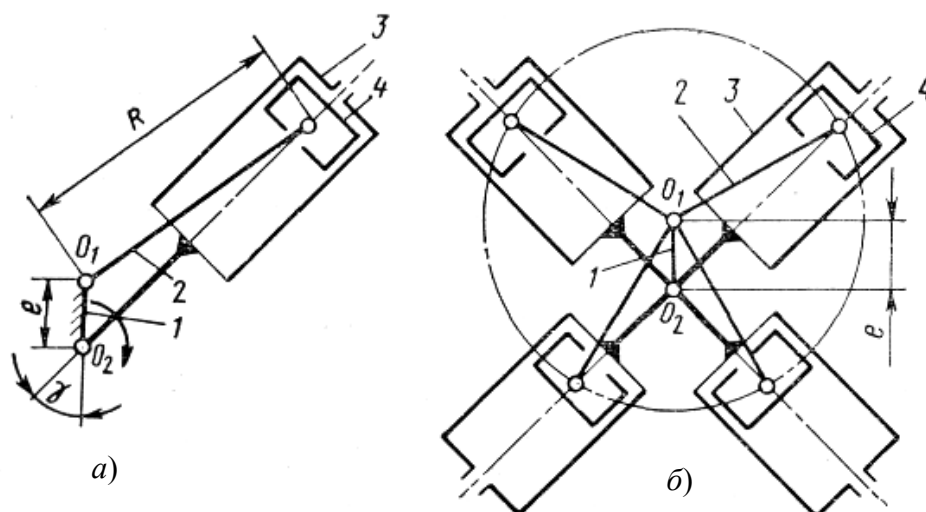


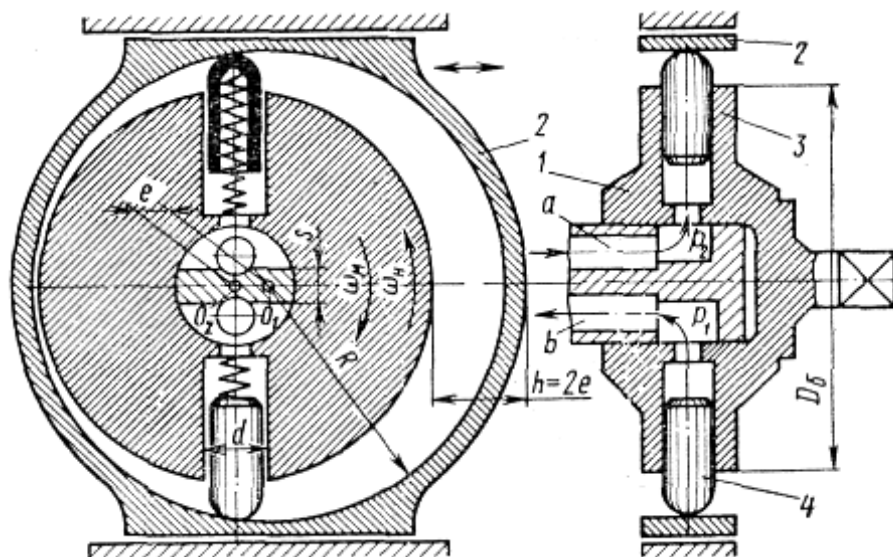
Рис. 3.4. Кинематические схемы роторных радиально-поршневых гидромашин

В роторных радиально-поршневых насосах жидкость вытесняется из рабочих камер (цилиндров) в процессе вращательно-поступательного движения вытеснителей (поршней, плунжеров). Кинематической основой этого насоса является известный кривошипно-шатунный механизм, преобразованный так, что его неподвижным звеном является кривошип  $1$  (рис. 3.4, *а*), цилиндр же  $3$  вращается (приводится) с постоянной угловой скоростью вокруг оси  $O_2$ , а шатун  $2$  вращается с переменной скоростью вокруг оси  $O_1$ . Расстояние  $e$  между этими осями (соответствующее размеру  $r$  неподвижного кривошипа  $1$ ) называется эксцентриситетом.

Поскольку поршень (ползун)  $4$  этого кривошипно-шатунного механизма связан с шатуном  $2$ , вращающимся вокруг оси  $O_1$ , он будет при вращении цилиндра  $3$  вокруг оси  $O_2$  совершать в нем возвратно-поступательные перемещения с ходом  $h = 2e$ , при которых камеры (полости) цилиндров будут последовательно (через каждые  $180^\circ$  поворота) увеличиваться и уменьшаться. Следовательно, и в этой схеме движение поршня в сторону увеличения камеры может быть использовано для засасывания жидкости в цилиндр, а в сторону уменьшения камеры – для вытеснения ее из цилиндра.

Взяв не один, а несколько звездообразно расположенных цилиндров  $3$ , оси которых пересекаются в общем центре вращения  $O_2$ , а шатуны  $2$  поршней  $4$  шарнирно связаны с осью  $O_2$ , получим кинематическую схему многопоршневого насоса с радиальным расположением цилиндров (рис. 3.4, *б*). Поскольку цилиндры  $3$  в этой схеме вращаются вокруг неподвижной оси  $O_2$ , представляется возможным использовать ее в качестве распределительной цапфы (золотника), в которой для этого выполняются каналы всасывания  $a$  и нагнетания  $b$  (рис. 3.5). Цилиндры  $3$  последней схемы посажены своим основанием на распределительную цапфу и отверстиями в своих донышках соединяются с осевыми сверлениями  $a$  и  $b$ , через которые отводится и подводится к цилиндрам жидкость.

Кинематика механизма (рис. 3.5) сохранится, если ведение поршней здесь осуществлено с помощью кольца  $2$ , радиус которого равен радиусу  $R$  шатуна прежней схемы (см. также штрихпунктирную окружность на рис. 3.4, *б*). Для этого поршни связываются тем или иным способом (с помощью пружин, давления жидкости подкачивающих насосов и пр.) со статорным кольцом  $2$ , ось которого смещена относительно оси вращения цилиндрического блока  $1$ .

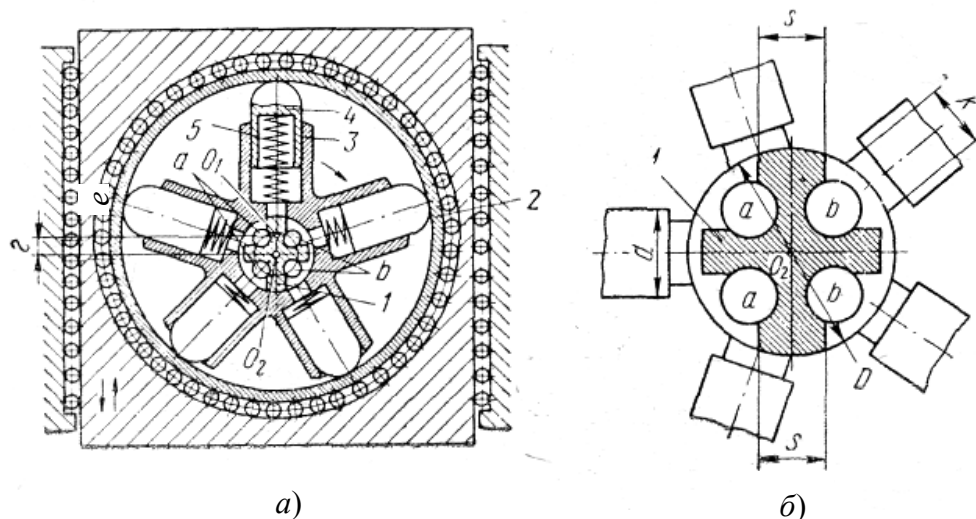


**Рис. 3.5. Принципиальная схема роторно-поршневого насоса (гидромотора) радиального типа [1]**

Из изложенного выше следует, что радиально-поршневой насос, схема которого представлена на рис. 3.5, построен на базе общеизвестного кривошипно-шатунного механизма, в соответствии с чем известные для кривошипно-шатунного механизма кинематические зависимости [1] будут справедливы и для насоса данной схемы.

Конструктивная схема радиального насоса этого типа изображена на рис. 3.6. Насос имеет свободно посаженный на цапфу 1 (диаметр  $D$ ) цилиндрический блок 3 (рис. 3.6) со звездообразным расположением нескольких (5 – 9) цилиндров (диаметр  $d$ ), смещенных один относительно другого на угол  $360/z$ , где  $z$  – число цилиндров. Поршни 4 прижимаются к статорному кольцу 2 под действием центробежных сил и усилий пружин 5. Эти насосы называют часто звездообразными, понимая под этим насосы, у которых рабочие органы расположены на нескольких пересекающихся осях.

Оси цилиндров блока этого насоса расположены в общей плоскости и пересекаются в центре  $O_2$  вращения блока. Распределение жидкости осуществляется через выполненные в цапфе 1 окна  $a$  и  $b$  (рис. 3.6, б), с которыми при вращении блока поочередно соединяются цилиндры через отверстия в их доньшках (размер  $k$ ). Распределительные окна через осевые каналы цапфы соединяются с всасывающей и нагнетающей магистралями.



**Рис. 3.6. Конструктивная схема многопоршневого радиально-поршневого насоса (гидромотора) [1]**

При ходе поршней 4 от центра блока 3 (величина хода поршней равна двойной величине эксцентриситета  $e$ ) жидкость будет засасываться поршнями через окно  $a$ , а при ходе к центру – нагнетаться через окно  $b$ . При переходе цилиндров через нейтральное положение (вертикальную ось) они перекрываются уплотнительной частью (перевальной перемычкой) распределительной цапфы, ширина  $s$  которой больше размера отверстия в доньшках цилиндров  $s > k$ .

При работе машины в качестве насоса поршни связываются с барабаном при помощи различных механических устройств или пружин, помещенных в цилиндры, а также при помощи сил давления жидкости вспомогательного насоса (насоса подкачки). В некоторых конструкциях радиальных насосов эта связь осуществляется с помощью одной лишь центробежной силы поршней. Поршни под действием указанной силы прижимаются к статорному кольцу 2, вступая с ним во фрикционное взаимодействие.

Для снижения сил трения поршней о статорное кольцо последнее выполняется обычно в виде обоймы роликового подшипника 2 (рис. 3.6, а). Поршни при своем движении увлекают эту обойму, благодаря чему трение скольжения головок поршней заменено здесь трением качения роликов. В результате кольцо будет следовать за ротором с угловой скоростью, практически равной угловой скорости ротора.

Для обеспечения надежного ведения поршней сила прижима их к статорному кольцу должна превышать суммарную силу противодействия, слагаемую из:



а) силы трения поршня в цилиндре; б) силы инерции поршня в возвратно-поступательном движении его в цилиндре; в) силы отрицательного давления на поршень, возникающей в зоне всасывания в результате образования вакуума под поршнем (расчет ведется исходя из наличия полного вакуума в цилиндре).

При работе гидромашины в качестве гидромотора поршни во время рабочего хода перемещаются от центра под действием рабочего давления жидкости, поступающей от источника питания (насоса), а во время нерабочего (холостого) хода – к центру, вследствие эксцентричного расположения ротора  $I$  относительно статора  $З$ .

Радиально-поршневые насосы и гидромоторы изготавливают мощностью до 3000 кВт и выше с расходом жидкости до 8000 л/мин. Насосы этого типа малых размеров выполняют для давлений до 100 МПа (1000 кгс/см<sup>2</sup>). Эти насосы выпускаются преимущественно в регулируемом варианте. Цилиндры обычно располагают в несколько (до шести) рядов, благодаря чему получают высокую подачу насоса или большой крутящий момент на валу гидромотора. В одном ряду обычно располагают от 5 до 13 цилиндров.

### **3.2.1.2. Роторные аксиально-поршневые гидромашины [1]**

Роторная аксиально-поршневая гидромашина – машина, у которой рабочие камеры вращаются относительно оси ротора, а оси поршней или плунжеров параллельны оси вращения или составляют с ней угол меньше 45°. Насосы и гидромоторы с аксиальным или близким к аксиальному расположением цилиндров, являются наиболее распространенными в гидравлических системах (гидроприводах). По числу разновидностей конструктивного исполнения они во много раз превосходят прочие типы гидромашин.

Эти насосы и гидромоторы получили широкое применение еще в конце XIX столетия на флоте многих стран (Россия, Англия, США, Япония), причем использовались они для выполнения наиболее ответственных функций, как например, управление кораблем и его вооружением.

Они обладают наилучшими из всех типов гидромашин габаритами и весовыми характеристиками, отличаются компактностью, высоким КПД, пригодны

для работы при высоких частотах вращения и давлениях, обладают сравнительно малой инерционностью, а также просты по конструкции.

Особо следует отметить их высокую энергоемкость на единицу веса (удельный вес). Вес нерегулируемых насосов (или гидромоторов равной мощности) меньше регулируемых в 2 раза. Весовое преимущество гидромоторов этого типа по сравнению с электродвигателем составляет от ~80 раз для малой и до ~12 раз для большой мощности.

Особенностью рассматриваемых машин является относительно малый момент инерции вращающихся частей, что имеет существенное значение при использовании их в качестве гидромоторов.

Маховые массы аксиально-поршневого гидромотора мощностью 150 кВт составляют менее 1/10 маховых масс электродвигателя такой же мощности. Маховой момент гидромотора мощностью 60 кВт при частоте вращения  $n = 1500$  об/мин в 62 раза меньше, чем маховой момент электродвигателя такой же мощности.

Важным параметром для многих случаев применения является также приемистость (быстродействие) насоса при регулировании подачи. Изменение подачи от нулевой до максимальной осуществляется в некоторых типах этих насосов за 0,04 с и от максимальной до нулевой – за 0,02 с.

Наиболее распространенное число цилиндров в аксиально-поршневых машинах равно 7 – 9, диаметры цилиндров гидромашин (насосов, гидромоторов) обычно находятся в пределах от 10 до 50 мм, а рабочие объемы машин – в пределах от 5 до 1000 см<sup>3</sup>. Максимальный угол между осями цилиндрического блока и наклонной шайбы обычно равен в насосах 20° и в гидромоторах 30°.

Частота вращения насосов средней мощности равна 1000 – 2000 об/мин; частота вращения гидромоторов может быть выше примерно в 1,5 раза, чем у насосов той же конструкции и мощности. Частота вращения подобных насосов в авиационных гидросистемах обычно равна 3000 – 4000 об/мин, однако в отдельных случаях применяют насосы со значительно большей частотой вращения. По данным иностранной печати изготавливаются насосы с максимальной частотой вращения 20 000 и 30 000 об/мин и минимальной 5 – 10 об/мин.

Для специальных целей созданы малогабаритные насосы на рабочий объем  $q = 0,7 \div 1$  см<sup>3</sup>/об (диаметр поршня  $d = 5 \div 6$  мм, ход  $h = 4$  мм, диаметр блока

$D = 20$  мм); подача такого миниатюрного насоса достигает (за счет большой  $n$ ) 20 л/мин при  $p = 20$  МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>).

Насосы и гидромоторы с аксиальным расположением цилиндров применяются при давлениях 21 – 35 МПа (210 – 350 кгс/см<sup>2</sup>) и реже при – более высоких давлениях, причем, насосы с подачей до 400 л/мин часто выпускаются на рабочие давления до 55 МПа (550 кгс/см<sup>2</sup>). Мощность уникальных насосов, выпускаемых для некоторых отраслей промышленности (для прокатных станков и пр.), достигает 4000 – 4500 л. с. (подача до 8700 л/мин) и более.

Насосы и гидромоторы этих типов имеют высокий объемный КПД, который для большинства моделей достигает при оптимальных режимах работы значений 0,97 – 0,98. Многие отечественные и зарубежные фирмы гарантируют для насосов с подачей 130 – 150 л/мин объемный КПД при давлении 35 МПа (350 кгс/см<sup>2</sup>) не менее 0,99. Общий КПД этих насосов составляет примерно 0,95.

Различают гидромашины (гидромоторы и насосы) с наклонным цилиндрическим блоком и машины с наклонным диском, понимая под первыми аксиально-поршневые гидромашины, у которых ось ведущего звена и ось вращения ротора пересекаются (см. рис. 3.7, а), и под вторыми – аксиально-поршневые гидромашины, у которых ось ведущего звена и ось вращения ротора совпадают, т.е. у таких гидромашин ведущее звено и ротор расположены на одной оси (см. рис. 3.7, б). Помимо указанного, существует много других конструктивных различий, однако они обычно не являются принципиальными и предельные характеристические возможности всех машин этого типа в большинстве случаев равноценны.

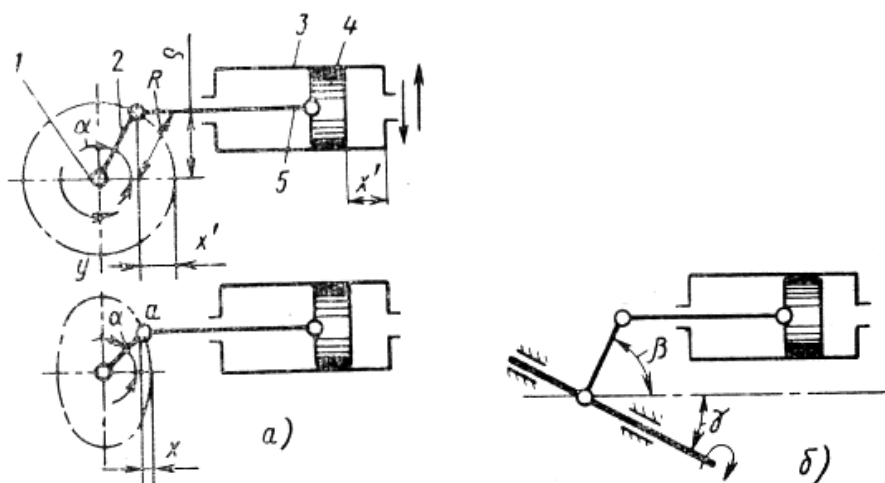


Рис. 3.7. Кинематическая схема аксиально-поршневого насоса

Кинематической основой аксиально-поршневых гидромашин является видоизмененный кривошипно-шатунный механизм (рис. 3.7, *a*), цилиндр 3 в котором при повороте кривошипа 2 вокруг оси 1 совершает вместе со штоком 5 перемещения в вертикальной плоскости (в плоскости чертежа), двигаясь параллельно самому себе и сохраняя осевое положение штока. Перемещение поршня 4 при повороте кривошипа 2 на угол  $\alpha = \omega t$  будет

$$x' = R - R \cos \alpha = R (1 - \cos \alpha),$$

где  $R$  – длина кривошипа.

Очевидно, что полное перемещение (ход)  $h'$  поршня в цилиндре при повороте кривошипа на угол  $\alpha = 180^\circ$  составит  $h' = 2R$ . На это же расстояние переместится цилиндр вместе с поршнем в плоскости чертежа.

Схема принципиально не изменится, если плоскость вращения кривошипа повернуть (наклонить) вокруг вертикальной оси  $y$  относительно прежнего положения на некоторый угол  $\beta$  меньший  $90^\circ$  (рис. 3.7, *б*). В этом случае схема превратится в пространственную, а следовательно, цилиндр для сохранения прежней кинематики поршня (для обеспечения осевого положения штока) должен перемещаться в пространстве по эллипсу, представляющему собой след проекции центра шарнира, связывающего кривошип 2 со штоком 5, на плоскость, перпендикулярную к оси цилиндра.

При этом перемещение поршня

$$x = x' \cos \beta = R (1 - \cos \alpha) \cos \beta, \quad (3.1)$$

где  $\beta$  – угол наклона плоскости вращения кривошипа.

Ввиду того, что перемещение цилиндра по подобной траектории практически неосуществимо, эту траекторию заменяют окружностью, описанной радиусом  $R$ , что вносит в расчет по данной формуле некоторую неточность (нарушается, вследствие возникновения колебаний штока 5, синусоидальный закон перемещения поршня).

Взяв вместо одного цилиндра несколько и разместив их равномерно по кругу с расположением осей параллельно оси блока цилиндров 2, а также заменив кривошип диском 5 (рис. 3.8, *a*), ось которого наклонена относительно оси бло-

ка 2 на угол  $\gamma = 90^\circ - \beta$ , получим принципиальную схему многопоршневой машины (насоса или мотора) пространственного типа, вытеснители которого выполняются либо в виде поршней, связанных с наклонным диском с помощью штоков 4 (рис. 3.8, а), либо в виде свободно посаженных плунжеров 2 со сферической головкой, которые прижимаются к наклонному диску 3 (рис. 3.8, б) с помощью пружин 1 или давления подпиточных насосов.

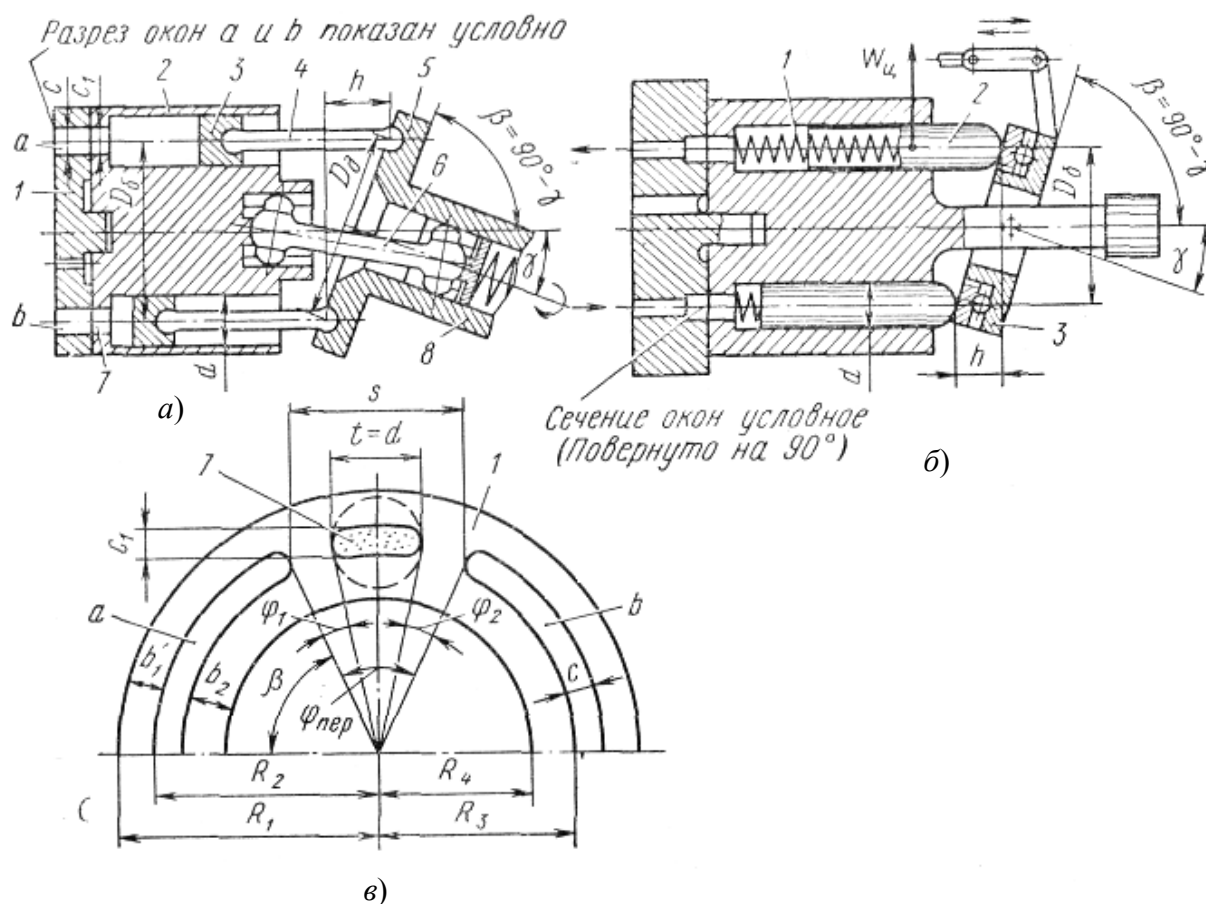


Рис. 3.8. Схемы аксиально-поршневых насосов [1]

Первые машины получили название аксиально-поршневых гидромашин с наклонной люлькой или наклонным цилиндрическим блоком (рис. 3.8, а), вторые – аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском (рис. 3.8, б). К этим основным двум типам можно отнести практически все существующие конструкции аксиально-поршневых гидромашин.

Конструктивно в аксиально-поршневой машине с наклонной люлькой оси приводного вала и блока цилиндров расположены под углом  $\gamma$  друг к другу, а в машинах с наклонным диском эти оси составляют одну линию.

**В машинах первого типа** (рис. 3.8, *a*) поршни соединяются с приводным наклонным диском с помощью шарниров (штоков) 4. Осевое усилие поршней, воспринимаемое от приводной наклонной шайбы 5, преобразуется, вследствие наклонного ее расположения, в крутящий момент, который затем через карданные шарниры 6 передается на центральный вал. Машины этого типа называются также машинами с передачей крутящего момента на наклонную шайбу.

Крутящий момент в таких машинах снимается непосредственно в месте его возникновения, т.е. – с приводной наклонной шайбы 5 на поршни 3 (как показано в [1]) этот момент не передается. Через поршни в этой схеме передается на блок цилиндров 2 лишь момент от сил трения и инерции (ускорения или замедления). Поэтому поршни 3 скользят в цилиндрах здесь практически без поперечных нагрузок, и их функции в этом случае сводятся к герметизации цилиндров.

Благодаря этому фактически устраняется износ поршней и цилиндров и обеспечивается высокий механический КПД машины, а также хороший пусковой момент при работе машины в режиме гидромотора. Однако угловое расположение приводного диска и блока цилиндров и соответствующее ему распределение действующих сил в приводном механизме требует применения мощных опор и подшипников качения.

Конструктивно всякая машина этого типа (рис. 3.8, *a*) имеет многоцилиндровый блок (барабан) 2, поршни 3 которого связываются при помощи шатунов 4 или иных средств с наклонным диском (шайбой) 5, выполняющим в этой схеме роль кривошипа ранее рассмотренной принципиальной схемы (см. рис. 3.7). Угол  $\gamma$  наклона этого диска относительно оси цилиндрического блока определяет для данного диаметра блока величину хода  $h$  поршня, а следовательно и расчетную (геометрическую) подачу насоса.

Силовая и кинематическая связь цилиндрического блока 2 с приводным валом 8 осуществляется с помощью различных механических средств, обеспечивающих приближенную синхронность (равенство) угловых скоростей цилиндрического блока и вала. Наиболее распространена связь с помощью двойного универсального кардана 6, который обеспечивает при соответствующем выполнении практическую синхронность угловых скоростей ведущего и ведомого (цилиндрический блок) валов.

**В машинах второго типа** (рис. 3.8, б) поршни (плунжеры) 2 непосредственно опираются на наклонную шайбу 3 через сферические головки или башмаки, а развиваемое ими при этом усилие вращения передается в результате скольжения поршней по наклонной шайбе на блок цилиндров. Крутящий же момент в этой машине передается через поршни непосредственно на цилиндрический блок и далее на центральный вал. В подобной схеме передачи момента поршни работают на изгиб и должны быть по прочности рассчитаны на передаваемый ими полезный момент и момент потерь, т.е. рассчитаны на полный момент [1]. В частности, длина заделки поршней в цилиндрах должна быть такой, чтобы было устранено защемление их и обеспечено допустимое напряжение сжатия материала.

Общим для обеих конструктивных разновидностей рассматриваемых машин является преобладающее применение торцового распределения рабочей жидкости. Поскольку цилиндрический блок 2 у рассматриваемого насоса (рис. 3.8, а) вращается (цилиндры перемещаются относительно корпуса), упрощается распределение жидкости, которое обычно выполняется через серпообразные окна *a* и *b* (см. также рис. 3.8, в) в распределительном золотнике 1 и каналы (отверстия) 7 в доньшках цилиндров блока 2 (на рисунке канал 7 показан условно). При работе насоса торец цилиндрического блока скользит по поверхности распределительного золотника (рис. 3.8, в). При этом цилиндры попеременно соединяются с окнами *a* или *b* золотника и через них – с магистралями всасывания и нагнетания. Поверхности торцов распределителя выполняются плоскими (рис. 3.8) или сферическими. Преимуществом последнего типа является то, что он не требует точного совпадения осей скользящих поверхностей, а допускает наличие некоторой несоосности (пересечения этих осей), чего не допускает плоский распределитель. Однако плоский распределитель обладает существенным преимуществом, заключающимся в отсутствии необходимости индивидуальной подгонки поверхностей скольжения.

В нейтральных (мертвых) положениях цилиндров (в верхнем и нижнем) отверстия 7 в доньшках цилиндров (рис. 3.8, в) перекрываются нижней и верхней перевальными (разделительными) перемычками, расположенными между распределительными окнами *a* и *b*; ширина *s* перемычек несколько превышает размер отверстий 7 ( $t < s$ ).

Применение насосов с наклонной люлькой (см. рис. 3.8, *а*) предпочтительнее в открытом контуре и при высокой частоте вращения. Насосы с наклонной шайбой (см. рис. 3.6, *б*) имеют преимущества при очень высоких давлениях и быстрых процессах переключения, которые здесь осуществимы благодаря малой массе перемещающихся при этом деталей узла регулирования.

### 3.3.1.3. Шестеренные гидронасосы и гидромоторы [5]

Шестеренные гидромашины отличаются простотой конструкции, надежностью, малой массой и компактностью. Поэтому они широко применяются в гидроприводах сельскохозяйственных, дорожно-строительных, коммунальных и других самоходных машинах при давлении рабочей жидкости 15 – 20 МПа и частоте вращения вала 1800 – 2400 об/мин.

Наиболее распространенными являются гидронасосы и гидромоторы с шестернями внешнего зацепления. Они состоят (рис. 3.9, *а*) из пары сцепленных друг с другом цилиндрических шестерен 1, 2, выполненной заодно с валами и помещенных в плотно обхватывающий их корпус 3, имеющий каналы 4, 5 в местах входа в зацепление и выхода из него.

При вращении шестерен рабочая жидкость, заключенная во впадинах зубьев, переносится через камеру нагнетания из канала 4 в канал 5. Распределение давления перекачиваемой жидкости внутри шестеренного насоса проиллюстрировано на рис. 3.9, *б*.

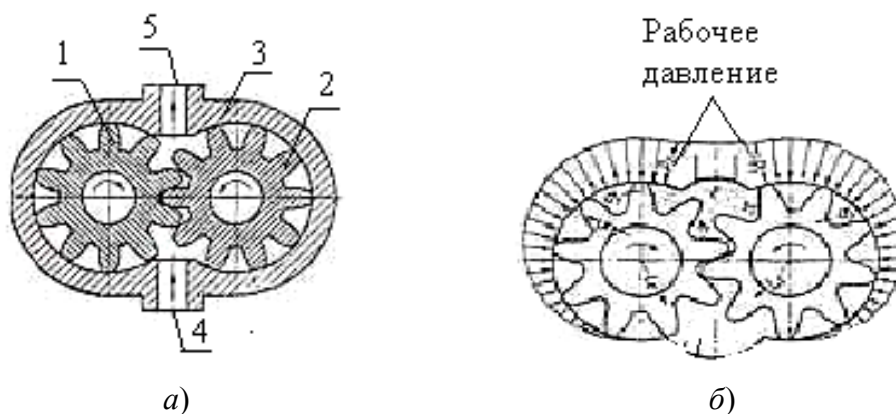


Рис. 3.9. Схема шестеренной гидромашины [5]:

*а* – конструктивная схема; *б* – распределение давления в шестеренном насосе



Конструкция шестеренных гидромоторов аналогична конструкции шестеренных гидронасосов. Рабочая жидкость, подведенная под давлением к шестеренному гидромотору, действует на неуравновешенные зубья шестерен и создает крутящий момент. Шестеренные гидромоторы работают с частотой вращения 100 – 5000 об/мин.

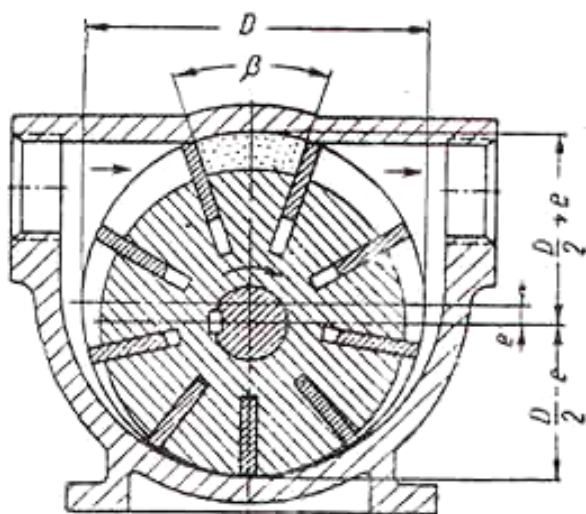
### 3.3.1.4. Пластинчатые гидронасосы и гидромоторы [5]

Пластинчатые гидронасосы и гидромоторы часто называют лопастными или шиберными. Они имеют наиболее простую конструкцию из существующих типов гидромашин.

По числу циклов работы за один оборот вала различают пластинчатые гидронасосы и гидромоторы однократного и многократного (двух-, трех-, четырехкратного и т.д.) действия.

**Гидронасос однократного действия** выполняется как регулируемым (за счет изменения эксцентриситета), так и нерегулируемым, а гидронасосы многократного действия – нерегулируемыми.

**Гидронасос многократного действия** имеет преимущество – уравновешенность радиальных сил давления жидкости на пластинчатый ротор, благодаря чему они пригодны для работы при более высоком, чем гидронасосы однократного действия, давлении рабочей жидкости (14,0 МПа и выше).



**Рис. 3.10. Схема пластинчатой гидромашинны**

Схема простейшего из пластинчатых гидронасосов приведена на рис. 3.10, где  $e$  – эксцентриситет насоса. В пластинчатых гидронасосах применяют положительное перекрытие, при котором рабочая камера в ее среднем положении размещается на перевальной (разделительной) перемычке, будучи отсеченной (изолированной) как от полости всасывания, так и от полости нагнетания.

Для избежания компрессии рабочей жидкости в камере, положительное перекрытие должно быть по возможности малым, однако таким, чтобы было обеспечено разделение полостей всасывания и нагнетания.

Минимальное значение этого перекрытия соответствует соотношению размеров перемычки и раствора концов пластин, при котором кромки окон питания касались бы внутренних сторон пластин (соответствует углу  $\beta$  расположения пластин в роторе).

Радиальное движение пластин и плотность их контакта со статором осуществляется с помощью давления рабочей жидкости, подводимой в прорези под пластины, или при помощи пружин.

Пластинчатые гидронасосы обычно содержат 8 – 12 пластин. При увеличении числа пластин уменьшается действующая на них нагрузка и повышается равномерность потока нагнетаемой жидкости. При уменьшении числа пластин (меньше восьми) поток становится неравномерным.

Пластинчатые гидромашины применяют также для работы в качестве гидромоторов. Наиболее часто они применяются в качестве ротаторов на гидравлических кранах-манипуляторах. В пластинчатых гидромоторах без принудительного радиального движения пластин в роторе необходимо предусмотреть механизм прижима пластин к статору при пуске мотора.

Гидромоторы однократного (одинарного) действия выпускаются реверсивными как в регулируемом, так и нерегулируемом исполнении, а моторы двукратного действия – нерегулируемыми в реверсивном и нереверсивном исполнениях.

### 3.3.2. ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОПРИВОДОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основная функция гидропривода, как и механической передачи, – преобразование механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки (преобразование вида движения выходного звена двигателя, его параметров, а также регулирование, защита от перегрузок и др.). Другая функция гидропривода – это передача мощности от приводного двигателя к рабочим органам машины (например, в одноковшовом экскаваторе – передача мощно-

сти от двигателя внутреннего сгорания к ковшу или к гидродвигателям привода стрелы, к гидродвигателям поворота башни и т.д.).

В общих чертах, передача мощности в гидроприводе происходит следующим образом:

1) приводной двигатель передает вращающий момент на вал насоса, который сообщает энергию рабочей жидкости;

2) рабочая жидкость по гидролиниям через регулиующую аппаратуру поступает в гидродвигатель, где гидравлическая энергия преобразуется в механическую;

3) после этого рабочая жидкость по гидролиниям возвращается либо в бак, либо непосредственно к насосу.

### 3.3.2.1. Классификация гидроприводов

Гидроприводы могут быть двух типов: гидродинамические и объемные. В гидродинамических приводах используется в основном кинетическая энергия потока жидкости (и, соответственно, скорости движения жидкостей в гидродинамических приводах велики по сравнению со скоростями движения в объемном гидроприводе). В объемных гидроприводах используется потенциальная энергия давления рабочей жидкости (в объемных гидроприводах скорости движения жидкостей невелики – порядка 0,5 – 6 м/с).

**Объемный гидропривод** – это гидропривод, в котором используются объемные гидромашины (насосы и гидромоторы). Объемной называется гидромашина, рабочий процесс которой основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении ее из рабочей камеры. К объемным машинам относят, например, поршневые насосы, аксиально-поршневые, радиально-поршневые, шестеренные гидромашины и др. Одна из особенностей, отличающая объемный гидропривод от гидродинамического, – большие давления в гидросистемах. Так, номинальные давления в гидросистемах экскаваторов могут достигать 32 МПа, а в некоторых случаях рабочее давление может быть более 300 МПа, в то время как гидродинамические машины работают обычно при давлениях, не превышающих 1,5 – 2 МПа. Объемный гидропривод намного более компактен и меньше по массе, чем гидродинамический, и поэтому он получил наибольшее распространение.

В зависимости от конструкции и типа входящих в состав гидropередачи элементов объемные гидropриводы можно классифицировать по нескольким признакам.

**По характеру движения выходного звена гидродвигателя различают:**

1) гидropривод вращательного движения, когда в качестве гидродвигателя применяется гидромотор, у которого ведомое звено (вал или корпус) совершает неограниченное вращательное движение;

2) гидropривод поступательного движения у которого в качестве гидродвигателя применяется гидроцилиндр – двигатель с возвратно-поступательным движением ведомого звена (штока поршня, плунжера или корпуса);

3) гидropривод поворотного движения, когда в качестве гидродвигателя применен поворотный гидравлический исполнительный механизм, у которого ведомое звено (вал или корпус) совершает возвратно-поворотное движение на угол, меньший  $270^\circ$ .

**По возможности регулирования скорости выходного звена различают следующие виды гидropриводов.**

Если скорость выходного звена (гидроцилиндра, гидромотора) регулируется изменением частоты вращения двигателя, приводящего в работу насос, то гидropривод считается нерегулируемым.

Регулируемый гидropривод – это гидropривод, в котором в процессе его эксплуатации скорость выходного звена гидродвигателя можно изменять по требуемому закону. В свою очередь регулирование может быть:

- дроссельным;
- объемным;
- объемно-дроссельным.

Регулирование может быть: ручным или автоматическим.

В зависимости от задач регулирования гидropривод может быть:

- стабилизированным;
- программным;
- следящим (гидроусилители).

Саморегулируемый гидropривод автоматически изменяет подачу жидкости по фактической потребности гидросистемы в режиме реального времени.

### 3.3.2.2. Гидроприводы с разомкнутой и замкнутой системами циркуляции рабочей жидкости [6]

На рисунке 3.11 представлены схемы гидроприводов с разомкнутой и замкнутой системами циркуляции рабочей жидкости.

На схеме (рис. 3.11, *а*) всасывающая и сливная гидролинии сообщаются с баком (разомкнутая схема), а на схеме (рис. 3.11, *б*) бак используется только для вспомогательной гидросистемы (системы подпитки). На рисунке 3.11 использованы следующие обозначения: Н и Н1 – насосы; М – гидромотор; Р – гидрораспределитель; Б – гидробак; Н1 – насос системы подпитки; КП1, КП2, – предохранительные клапана; КО1 и КО2 – обратные клапана. Предохранительные клапана КП (на рис. 3.11, *а*), КП1 и КП2 (на рис. 3.11, *б*) срабатывают в тот момент, когда нагрузка на валу гидромотора слишком велика, и давление в гидросистеме превышает допустимую величину. Обратные клапана КО1 и КО2 срабатывают тогда, когда давление слишком мало, и возникает опасность кавитации.

По схеме циркуляции рабочей жидкости различают (рис. 3.11) два вида гидропривода.

1. **Гидропривод с разомкнутой системой циркуляции**, в котором (рис. 3.11, *а*) рабочая жидкость постоянно сообщается с гидробаком или атмосферой.

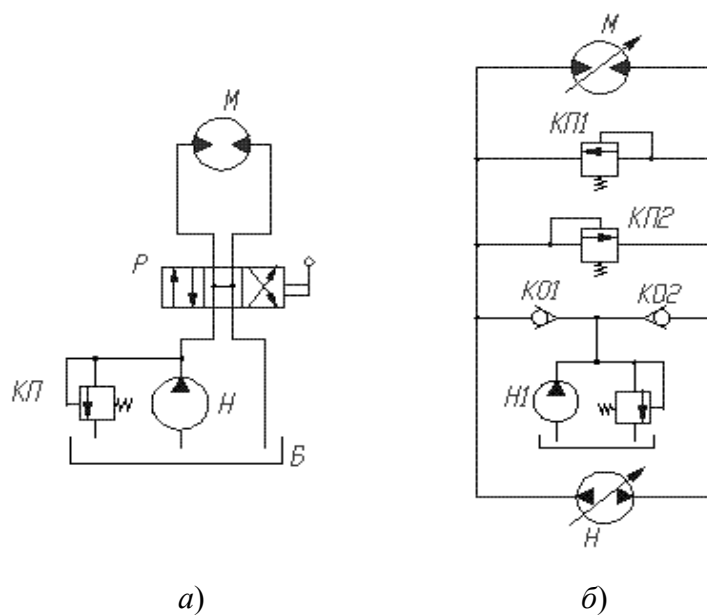


Рис. 3.11. Гидросистемы с разомкнутой схемой (*а*) и с замкнутой схемой циркуляции рабочей жидкости (*б*)

Достоинства такой схемы – хорошие условия для охлаждения и очистки рабочей жидкости. Однако такие гидроприводы громоздки и имеют большую массу, а частота вращения ротора насоса ограничивается допускаемыми (из условий бескавитационной работы насоса) скоростями движения рабочей жидкости во всасывающем трубопроводе.

2. **Гидропривод с замкнутой схемой циркуляции**, в котором (рис. 3.11, б) рабочая жидкость от гидродвигателя возвращается во всасывающую гидролинию насоса.

Гидропривод с замкнутой циркуляцией рабочей жидкости компактен, имеет небольшую массу и допускает большую частоту вращения ротора насоса без опасности возникновения кавитации, поскольку в такой системе во всасывающей линии давление всегда превышает атмосферное. К недостаткам следует отнести плохие условия для охлаждения рабочей жидкости, а также необходимость спускать из гидросистемы рабочую жидкость при замене или ремонте гидроаппаратуры.

### **3.3.2.3. Виды объемных гидроприводов по источнику подачи рабочей жидкости**

По источнику подачи рабочей жидкости различают три вида объемных гидроприводов.

**Насосный гидропривод.** В насосном гидроприводе, получившем наибольшее распространение в технике, механическая энергия преобразуется насосом в гидравлическую, носитель энергии – рабочая жидкость, нагнетается через напорную магистраль к гидродвигателю, где энергия потока жидкости преобразуется в механическую. Рабочая жидкость, отдав свою энергию гидродвигателю, возвращается либо обратно к насосу (замкнутая схема гидропривода), либо в бак (разомкнутая или открытая схема гидропривода). В общем случае в состав насосного гидропривода входят гидропередача, гидроаппараты, кондиционеры рабочей жидкости, гидроемкости и гидролинии.

Наибольшее применение в гидроприводе получили аксиально-поршневые, радиально-поршневые, пластинчатые и шестеренные насосы.

**Магистральный гидропривод.** В магистральном гидроприводе рабочая жидкость нагнетается насосными станциями в напорную магистраль, к которой

подключаются потребители гидравлической энергии. В отличие от насосного гидропривода, в котором, как правило, имеется один (реже 2–3) генератора гидравлической энергии (насоса), в магистральном гидроприводе таких генераторов может быть большое количество, и потребителей гидравлической энергии также может быть достаточно много.

**Аккумуляторный гидропривод.** В аккумуляторном гидроприводе жидкость подается в гидролинию от заранее заряженного гидроаккумулятора. Этот тип гидропривода используется в основном в машинах и механизмах с кратковременными режимами работы.

По типу приводящего двигателя гидроприводы бывают с электроприводом, приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), турбин и т.д.

#### **3.3.2.4. Дополнительные элементы структуры гидропривода**

Обязательными элементами гидропривода являются насос и гидродвигатель. Насос является источником гидравлической энергии, а гидродвигатель – ее потребителем, т.е. преобразует гидравлическую энергию в механическую. Управление движением выходных звеньев гидродвигателей осуществляется либо с помощью регулирующей аппаратуры – дросселей, гидрораспределителей и др., либо путем изменения параметров самого гидродвигателя и/или насоса.

Обязательными составными частями гидропривода являются гидролинии, по которым жидкость перемещается в гидросистеме.

Критически важной для гидропривода (в первую очередь объемного) является очистка рабочей жидкости от содержащихся в ней (и постоянно образующихся в процессе работы) абразивных частиц. Поэтому системы гидропривода обязательно содержат фильтрующие устройства (например, масляные фильтры), хотя принципиально гидропривод некоторое время может работать и без них.

Поскольку рабочие параметры гидропривода существенно зависят от температуры рабочей жидкости, то в гидросистемах в некоторых случаях, но не всегда, устанавливают системы регулирования температуры (подогревающие и/или охлаждающие устройства).

### **3.3.2.5. Области применения объемных гидроприводов**

Объемный гидропривод применяется в горных и строительно-дорожных машинах. В настоящее время более 50% общего парка мобильных строительно-дорожных машин (бульдозеров, экскаваторов, автогрейдеров и др.) является гидрофицированной. Это существенно отличается от ситуации 1930 – 40-х гг., когда в этой области применялись в основном механические передачи.

В станкостроении гидропривод также широко применяется, однако в этой области он испытывает высокую конкуренцию со стороны других видов привода [1].

Широкое распространение получил гидропривод в авиации. Насыщенность современных самолетов системами гидропривода такова, что общая длина трубопроводов современного пассажирского авиалайнера может достигать нескольких километров.

В автомобильной промышленности самое широкое применение нашли гидроусилители руля, существенно повышающие удобство управления автомобилем. Эти устройства являются разновидностью следящих гидроприводов. Гидроусилители применяют и во многих других областях техники (авиации, тракторостроении, промышленном оборудовании и др.).

В некоторых танках, например, в японском танке Тип 10, применялась гидростатическая трансмиссия, представляющая собой, по сути, систему объемного гидропривода движителей. Такого же типа трансмиссия устанавливается и в некоторых современных бульдозерах.

В целом, границы области применения гидропривода определяются его преимуществами и недостатками.

### **3.3.2.6. Преимущества и недостатки гидроприводов**

К основным преимуществам гидропривода относятся:

- 1) возможность универсального преобразования механической характеристики приводного двигателя в соответствии с требованиями нагрузки;
- 2) простота управления и автоматизации;
- 3) простота предохранения приводного двигателя и исполнительных органов машин от перегрузок; например, если усилие на штоке гидроцилиндра стано-



вится слишком большим (такое возможно, в частности, когда шток, соединенный с рабочим органом, встречает препятствие на своем пути), то давление в гидросистеме достигает больших значений – тогда срабатывает предохранительный клапан в гидросистеме, и после этого жидкость идет на слив в бак, и давление уменьшается;

4) надежность эксплуатации;

5) широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости выходного звена; например, диапазон регулирования частоты вращения гидромотора может составлять от 2500 об/мин до 30 – 40 об/мин, а в некоторых случаях, у гидромоторов специального исполнения, доходит до 1 – 4 об/мин, что для электромоторов трудно реализуемо;

6) большая передаваемая мощность на единицу массы привода; в частности, масса гидравлических машин примерно в 10 – 15 раз меньше массы электрических машин такой же мощности;

7) самосмазываемость трущихся поверхностей при применении минеральных и синтетических масел в качестве рабочих жидкостей; нужно отметить, что при техническом обслуживании, например, мобильных строительно-дорожных машин на смазку уходит до 50% всего времени обслуживания машины, поэтому самосмазываемость гидропривода является серьезным преимуществом;

8) возможность получения больших сил и мощностей при малых размерах и весе передаточного механизма;

9) простота осуществления различных видов движения – поступательного, вращательного, поворотного;

10) возможность частых и быстрых переключений при возвратно-поступательных и вращательных прямых и реверсивных движениях;

11) возможность равномерного распределения усилий при одновременной передаче на несколько приводов;

12) упрощенность компоновки основных узлов гидропривода внутри машин и агрегатов, в сравнении с другими видами приводов.

К недостаткам гидропривода относятся:

1) утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры, особенно при высоких значениях давления в гидросистеме, что требует высокой точности изготовления деталей гидрооборудования;

2) нагрев рабочей жидкости при работе, что приводит к уменьшению вязкости рабочей жидкости и увеличению утечек, поэтому в ряде случаев необходимо применение специальных охлаждающих устройств и средств тепловой защиты; более низкий КПД чем у сопоставимых механических передач;

3) необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости, поскольку наличие большого количества абразивных частиц в рабочей жидкости приводит к быстрому износу деталей гидрооборудования, увеличению зазоров и утечек через них, и, как следствие, к снижению объемного КПД;

4) необходимость защиты гидросистемы от проникновения в нее воздуха, наличие которого приводит к нестабильной работе гидропривода, большим гидравлическим потерям и нагреву рабочей жидкости;

5) пожароопасность в случае применения горючих рабочих жидкостей, что налагает ограничения, например, на применение гидропривода в горячих цехах;

6) зависимость вязкости рабочей жидкости, а значит и рабочих параметров гидропривода, от температуры окружающей среды; в сравнении с пневмо- и электроприводом – невозможность эффективной передачи гидравлической энергии на большие расстояния вследствие больших потерь напора в гидролиниях на единицу длины.

## 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ

Одной из основных задач мехатронных и робототехнических систем является реализация заданного закона управляемого движения манипулятора или звена мехатронного модуля. Для передачи движения от двигателя к рабочему органу или к регулируемому органу исполнительного устройства (как правило, с преобразованием скорости и изменением вращающего момента) используют различные преобразователи движения (передачи).

Основные функции передач: изменение скорости, изменение направления движения, преобразования вида движения (вращательного в поступательное и наоборот, равномерное в прерывистое), приведение в движение одним двигателем нескольких механизмов. По типу связей все передачи можно разделить на передачи гибкой связью – ременные, цепные, тросовые и передачи непосредственным контактом – реечные, зубчатые, червячные, фрикционные. В механической передаче звенья, передающие вращающий момент, называются *ведущими*, а воспринимающие – *ведомыми*. Параметры передачи **П** (рис. 4.1), относящиеся к ведущим звеньям, обозначаются с индексом **1**, а к ведомому – с индексом **2**.

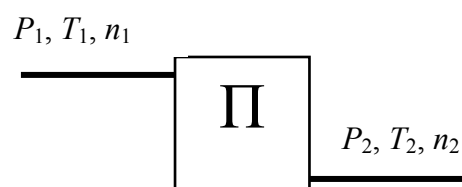
К основным характеристикам механических передач относят:

- мощность на выходном валу  $P_2$ ;
- быстроходность – угловая скорость выходного вала  $\omega_2$  или его частота вращения  $n_2$ ;
- передаточное число  $u$  – отношение угловых скоростей или частот вращения валов в направлении силового потока

$$u = \omega_1/\omega_2 = n_1/n_2.$$

Передачу, понижающую угловую скорость (частоту вращения)  $u > 1$  называют *редуктором*, повышающую  $u < 1$  – *мультипликатором*.

Приведен краткий обзор применяемых преобразователей движения.



**Рис. 4.1. Основные параметры механической передачи:**

$P_i$  – мощность вала редуктора, кВт;  $T_i$  – вращающий момент вала, Н·м;  $n_i$  – частота вращения вала, об/мин;  $i = 1, 2$

## 4.1. РЕДУКТОРЫ

Слово «редуктор» имеет латинские корни и обозначает механизм, входящий в приводы машин и работающий для снижения угловых скоростей ведомого вала с целью увеличения крутящего момента. Дословно в переводе с латыни *reductor* – отводящий назад, приводящий обратно. Основные характеристики редуктора – КПД, передаточное отношение, передаваемая мощность, максимальные угловые скорости валов, количество ведущих и ведомых валов, тип и количество передач и ступеней.

Редуктор, чаще всего, состоит из корпуса (чугун, сталь и алюминий), в котором размещены валы, зубчатые или червячные колеса, подшипники и пр. Иногда в корпусе редуктора располагаются механизмы для смазывания зацеплений и подшипников и механизмы для охлаждения. Значительное смазывание обеспечивает малый износ и повышает КПД редукторной передачи. Корпус защищает от повреждений внутренние механизмы и обеспечивает безопасность персонала.

Классификация редукторов [ГОСТ 29067–91. Редукторы и мотор-редукторы. Классификация].

Редукторы классифицируются по следующим признакам.

1. Вид применяемых зубчатых передач в кинематической схеме, число ступеней и взаимное расположение геометрических осей входного и выходного валов (табл. 4.1).

**Таблица 4.1**

Редуктор	Число ступеней	Виды передач	Взаимное расположение осей входного и выходного валов
1. Цилиндрический	Одноступенчатый	Одна или несколько цилиндрических передач	Параллельное
	Двухступенчатый; трехступенчатый		Параллельное или соосное
	Четырехступенчатый		Параллельное
2. Конический	Одноступенчатый	Одна коническая передача	Пересекающееся

Редуктор	Число ступеней	Виды передач	Взаимное расположение осей входного и выходного валов
3. Коническо-цилиндрический	Двухступенчатый; трехступенчатый; четырехступенчатый	Одна коническая передача и одна или несколько цилиндрических передач	Пересекающееся или скрещивающееся
4. Червячный	Одноступенчатый; двухступенчатый	Одна или две червячные передачи	Скрещивающееся Параллельное
5. Цилиндрическо-червячный или червячно-цилиндрический	Двухступенчатый; трехступенчатый	Одна или две цилиндрические передачи и одна червячная передача	Скрещивающееся
6. Планетарный	Одноступенчатый; двухступенчатый; трехступенчатый	Каждая ступень состоит из двух центральных зубчатых колес и сателлитов	Соосное
7. Цилиндрическо-планетарный	Двухступенчатый; трехступенчатый; четырехступенчатый	Комбинация из одной или нескольких цилиндрических и планетарных передач	Параллельное или соосное
8. Коническо-планетарный	Двухступенчатый; трехступенчатый; четырехступенчатый	Комбинация из одной конической и планетарных передач	Пересекающееся
9. Червячно-планетарный	Двухступенчатый; трехступенчатый; четырехступенчатый	Комбинация из одной червячной и планетарных передач	Скрещивающееся
10. Волновой	Одноступенчатый	Одна волновая передача	Соосное

2. В зависимости от расположения осей входного и выходного валов в пространстве (табл. 4.2).

**Таблица 4.2**

Редуктор	Расположение осей входного и выходного валов в пространстве
1. С параллельными осями входного и выходного валов	1. Горизонтальное: оси расположены в горизонтальной плоскости; оси расположены в вертикальной плоскости (с входным валом над или под выходным валом); оси расположены в наклонной плоскости
	2. Вертикальное
2. С совпадающими осями входного и выходного валов (соосный)	1. Горизонтальное
	2. Вертикальное
3. С пересекающимися осями входного и выходного валов	1. Горизонтальное
	2. Горизонтальная ось входного вала и вертикальная ось выходного вала
	3. Вертикальная ось входного вала и горизонтальная ось выходного вала
4. Со скрещивающимися осями входного и выходного валов	1. Горизонтальное (с входным валом над или под выходным валом)
	2. Горизонтальная ось входного вала и вертикальная ось выходного вала
	3. Вертикальная ось входного вала и горизонтальная ось выходного вала

3. В зависимости от способа крепления.

4. По взаимному расположению осей входного и выходного валов относительно плоскости основания и друг друга и числу входных и выходных концов валов.

#### 4.1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

Зубчатая передача это трехзвенный механизм, в котором два подвижных звена являются зубчатыми колесами, образующими с неподвижным звеном вращательную или поступательную пару [ГОСТ 16530–83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения].

Зубчатая передача предназначена для передачи вращательного движения между валами и преобразования движения с изменением угловых скоростей и моментов посредством зубчатого зацепления, а также для преобразования вращательного движения в поступательное (или наоборот, см. рис. 4.2, з).

Это наиболее распространенный вид передач в современном машиностроении. Они очень надежны в работе, обеспечивают постоянство передаточного числа, компактны, имеют высокий КПД, просты в эксплуатации, долговечны. К недостаткам можно отнести сложность изготовления, высокие требования к точности монтажа и изготовления, значительный шум во время работы на высоких скоростях.

Виды зубчатых передач представлены на рис. 4.2.

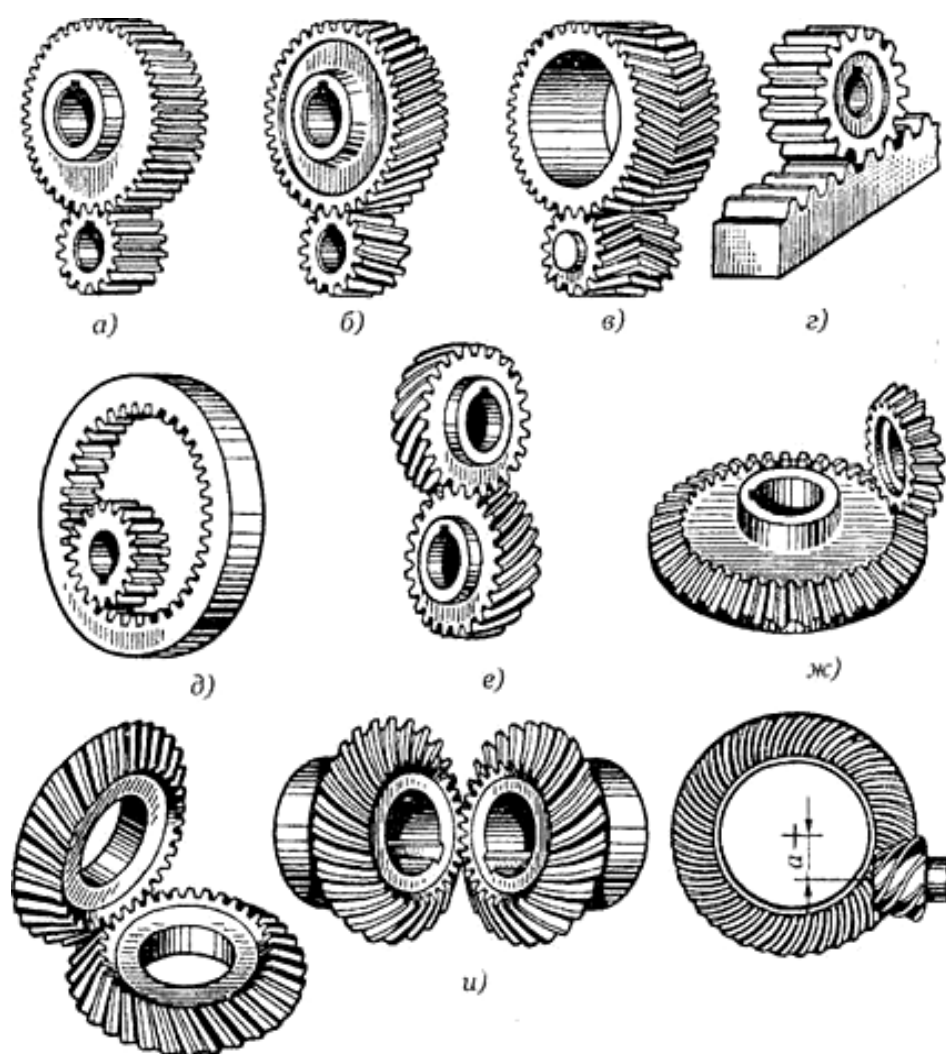
Зубчатые передачи и колеса классифицируют по следующим признакам:

- по взаимному расположению осей колес – с параллельными осями (цилиндрические, рис. 4.2, а – д), с пересекающимися осями (конические, рис. 4.2, ж – и), со скрещивающимися осями (винтовые, рис. 4.2, е, к);
- по расположению зубьев относительно образующих колес – прямозубые, косозубые, шевронные и с криволинейным зубом;
- по конструктивному оформлению – открытые и закрытые;
- по окружной скорости – тихоходные (до 3 м/с), для средних скоростей (3 – 15 м/с), быстроходные (выше 15 м/с);
- по числу ступеней – одно- и многоступенчатые;
- по расположению зубьев в передаче и колесах – внешнее, внутреннее (рис. 4.2, д) и реечное зацепление (рис. 4.2, з);
- по форме профиля зуба – с эвольвентными, круговыми;
- по точности зацепления. Стандартом предусмотрено 12 степеней точности. Практически передачи общего машиностроения изготавливают от шестой до

десятой степени точности. Передачи, изготовленные по шестой степени точности, используют для наиболее ответственных случаев.

Из перечисленных выше зубчатых передач наибольшее распространение получили *цилиндрические прямозубые* и *косозубые* передачи, как наиболее простые в изготовлении и эксплуатации.

Преимущественное распространение получили передачи с зубьями эвольвентного профиля, которые изготавливаются массовым методом обкатки на зубофрезерных или зубодолбежных станках. Достоинство эвольвентного зацепления состоит в том, что оно мало чувствительно к колебанию межцентрового расстояния.

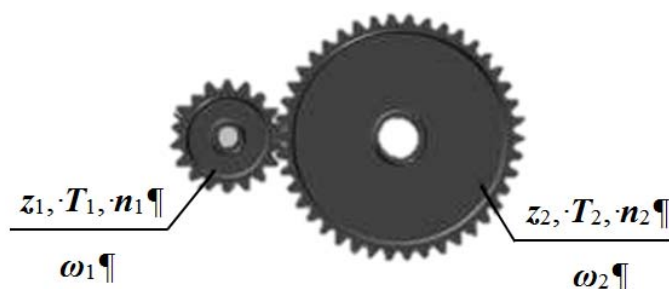


**Рис. 4.2. Виды зубчатых передач:**

*a, б, в* – цилиндрические зубчатые передачи с внешним зацеплением; *г* – реечная передача;  
*д* – цилиндрическая передача с внутренним зацеплением; *е* – зубчатая винтовая передача;  
*ж, з, и* – конические зубчатые передачи; *к* – гипоидная передача



**Основные кинематические и геометрические параметры цилиндрической прямозубой зубчатой передачи.** Обозначения параметров зубчатых передач на рис. 4.3 приведены по [ГОСТ 16530–83, ГОСТ 16531–83].



**Рис. 4.3. Обозначения параметров зубчатой передачи:**

параметры с индексом «1» относятся к шестерне; параметры с индексом «2» относятся к колесу.  $z$  – число зубьев зубчатого колеса;  $T$  – вращающий момент на зубчатом колесе, Н·м;  $n$  – частота вращения зубчатого колеса, об/мин;  $\omega$  – угловая скорость зубчатого колеса,  $\text{с}^{-1}$

Передаточным отношением  $i$  зубчатой передачи называют отношение угловой скорости ведущего зубчатого колеса к угловой скорости ведомого зубчатого колеса [ГОСТ 16530]

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Окружной (осевой, нормальный) модуль зубьев  $m_t$  ( $m_x$ ,  $m_n$ ) – линейная величина в  $\pi$  раз меньше окружного (осевого, нормального) шага  $p_t$  ( $p_x$ ,  $p_n$ ) зубьев

$$m = \frac{p}{\pi}.$$

Модули эвольвентных зубчатых колес стандартизированы.

На рисунке 4.4 представлены геометрические параметры зубчатой передачи. Для прямозубых цилиндрических колес, изготовленных без смещения, делительный диаметр равен произведению

$$d = mz.$$

Диаметр вершин и впадин:

$$d_\alpha = d + 2m, \quad d_f = d - 2,5m.$$

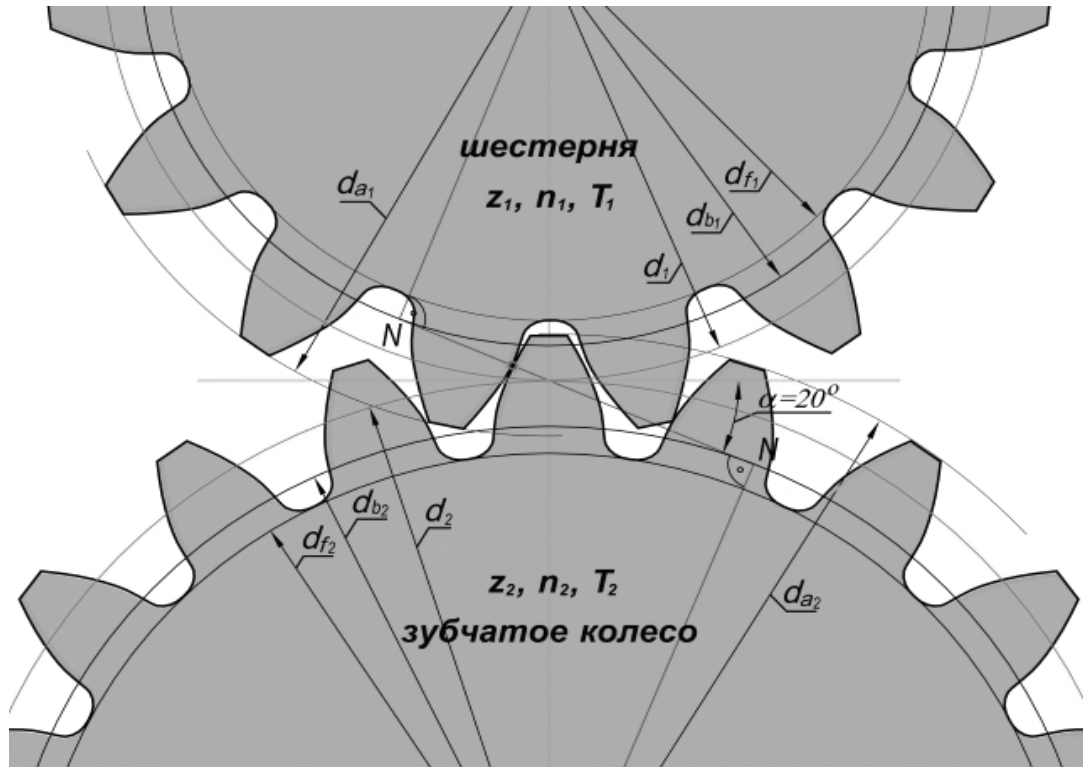


Рис. 4.4. Геометрические параметры зубчатой передачи

$d_b = d \cos \alpha$  – диаметр основной окружности.

$\alpha = 20^\circ$  – угол зацепления.

$h_a = m$  – высота головки зуба.

$h_f = 1,25m$  – высота ножки зуба.

$h = h_a + h_f = 2,25m$  – высота зуба.

Ширина зубчатого колеса и шестерни

$$b_2 = \psi_\alpha a,$$

где  $\psi_\alpha$  – коэффициент ширины, который выбирают в зависимости от расположения зубчатых колес относительно опор и твердости рабочих поверхностей зубьев.

Ширина шестерни

$$b_1 = 1,12b_2.$$

Межосевое расстояние определяют полусуммой делительных диаметров зубчатых колес

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(z_1 + z_2)}{2}.$$

## 4.1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРВЯЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ

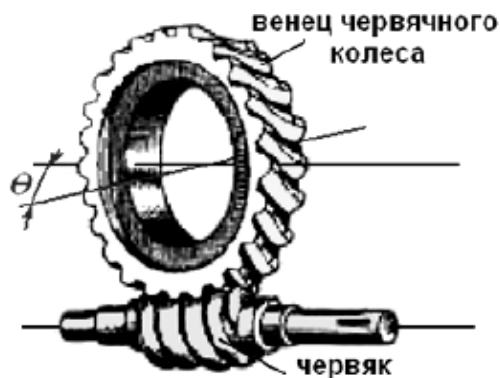


Рис. 4.5. Червячная передача

Червячные передачи относятся к передачам зацепления, движение в которой осуществляется по принципу винтовой пары. Применяются для передачи вращающего движения между валами, оси которых расположены под углом  $\theta = 90^\circ$  относительно друг друга. Схематичное представление червячной передачи представлено на рис. 4.5.

Шестерня червячной передачи называется червяком. Выполняется в виде короткого винта с трапецеидальной нарезкой. Колесо червячной передачи называется червячным колесом.

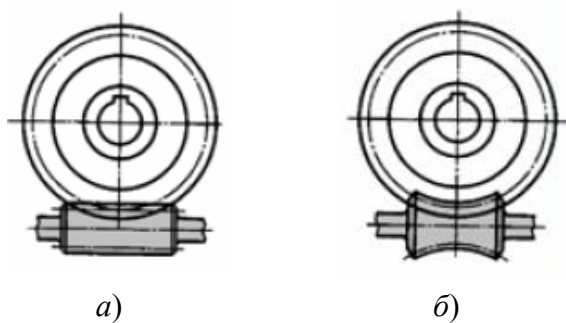


Рис. 4.6. Червячная передача:

*a* – с цилиндрическим червяком;

*б* – с глобоидным червяком

В зависимости от формы внешней поверхности червяка:

**Классификация червячных передач.** В зависимости от формы внешней поверхности червяка:

– с цилиндрическим червяком (рис. 4.6, *a*);

– с глобоидным червяком (рис. 4.6, *б*);

В зависимости от направления линии витка червяка:

– с правым направлением линии витка;

– с левым направлением линии витка.

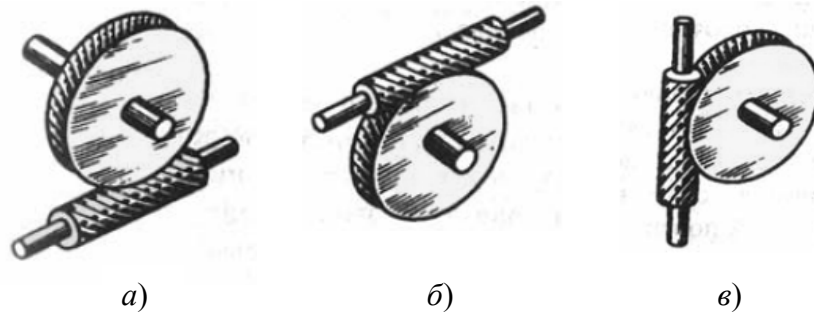
В зависимости от расположения червяка относительно колеса (рис. 4.7):

– с нижним расположением червяка;

– с верхним расположением червяка;

– с боковым расположением червяка.

Червячную передачу с нижним расположением червяка применяют для передачи вращения при значениях окружной скорости не более 5 м/с. Если окружная скорость более 5 м/с, то используют передачу с верхним расположением червяка.

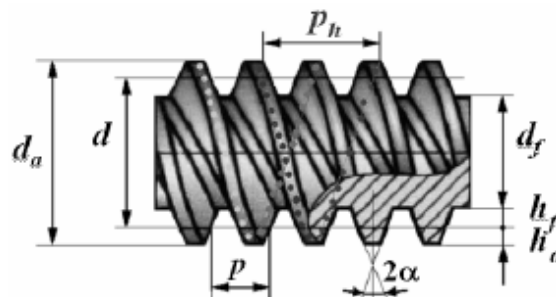


**Рис. 4.7. Червячная передача:**

*а* – с нижним расположением червяка; *б* – с верхним расположением червяка;  
*в* – с боковым расположением червяка

**Основные геометрические параметры червячной передачи.** Геометрические размеры червяка и колеса определяются по формулам, аналогичным для зубчатых колес.

Расчет геометрических параметров червячной передачи проводят в соответствии с [ГОСТ 19650–97. Передачи червячные цилиндрические. Расчет геометрических параметров].



**Рис. 4.8. Геометрические параметры червяка**

Делительный диаметр  $d$ , т.е. диаметр такого цилиндра червяка, на котором толщина витка равна ширине впадины  $d = mq$ , где  $q$  – коэффициент диаметра червяка (число модулей в делительном диаметре червяка);

- |                                                                     |                                                |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| $h_a$ – высота головки витка червяка и зуба колеса                  | $h_a = m$ ;                                    |
| $h_f$ – высота ножки витка червяка и зуба колеса                    | $h_f = 1,2m$ ;                                 |
| $d_f$ – диаметр впадин витков                                       | $d_f = d - 2h_f = d - 2,4m$ ;                  |
| $d_a$ – диаметр вершин витков                                       | $d_a = d + 2h_a = d + 2m$ ;                    |
| $2\alpha$ – угол профиля витка в осевом сечении                     | $\alpha = 20^\circ \cdot 2\alpha = 40^\circ$ ; |
| $p$ – расчетный шаг червяка                                         | $p = \pi m$ ;                                  |
| $p_h$ – ход витка $p_h = p z_1$ , где $z_1$ – число витков червяка; |                                                |
| количество витков червяка предусмотрены стандартом:                 | $z_1 = 1, 2, 4, \dots$                         |

На рисунке 4.9 приведены обозначения геометрических параметров червячного колеса.

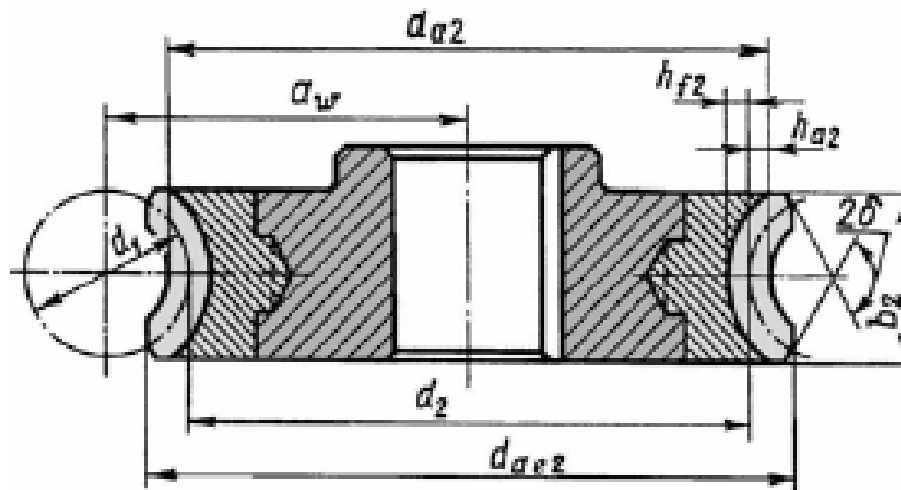


Рис. 4.9. Геометрические параметры червячного колеса

Геометрические параметры зубчатого венца червячного колеса определяется в среднем сечении по формулам, подобным формулам для цилиндрического зубчатого колеса:

делительный диаметр	$d_z = m_{z2};$
диаметр вершин зубьев	$d_{a2} = d_2 + 2m;$
диаметр впадин зубьев	$d_{f2} = d_2 - 2,4m;$
ширина венца	$b_2 = 0,355a_w;$
наибольший диаметр червячного колеса	$d_{ae2} \leq (d_{a2} + 6m)/(z_1 + 2);$
передаточное число зубчатой передачи	$u = \omega_1/\omega_2 = n_1/n_2 = z_2/z_1;$
$n_1, n_2$ – частоты вращения червяка и колеса;	
$z_1$ – число витков червяка;	
$z_2$ – число зубьев колеса.	

К достоинствам червячной передачи относят компактность механизма передачи, сравнительно небольшую массу конструкции, возможность получения довольно высоких значений передаточного числа в одной ступени ( $u_{\max} = 80$ ), плавность и бесшумность работы, а также возможность получения самотормозящей передачи, т.е. допускающей движение только от червяка к колесу.

К недостаткам относят низкий КПД, необходимость применения для венцов червячных колес дорогих антифрикционных материалов, повышенное изнашивание механизма из-за высоких скоростей скольжения.

### 4.1.3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ

Планетарные передачи относятся к передачам зацепления, в которой зубчатые колеса закреплены на подвижных осях. Такие колеса называются сателлитами. Их количество обычно варьируется от 3 до 6, но встречаются передачи и с большим числом сателлитов. Наибольшее распространение получили прямозубые передачи с числом сателлитов  $C = 3$ . В передачах применяют не только цилиндрические, но и конические колеса. Движение сателлитов в передаче напоминает движение планет, отсюда название передачи «планетарная». Оси сателлитов закреплены в устройстве, которое называется «водило», и вращаются вместе с ним вокруг центральной оси. Планетарную передачу применяют как редуктор с постоянным передаточным числом, как коробку скоростей, передаточное число в которой изменяется путем поочередного торможения различных звеньев (водила или одного из колес), как дифференциальный механизм. Имеется большое количество различных типов планетарных передач, но одноступенчатая планетарная передача получила самое широкое распространение. Она применяется как для больших, так и малых мощностей в силовых и кинематических приводах, т.е. не имеет ограничений по применению. КПД передачи довольно высокое и составляет  $\eta = 0,95 - 0,97$ .

**Принцип работы одноступенчатой планетарной передачи.** Планетарная передача (рис. 4.10) состоит из неподвижного центрального колеса 1 с наружными зубьями, трех сателлитов 2, неподвижного центрального колеса 3 с внутренними зубьями и водила  $H$ , на котором укреплены оси сателлитов.

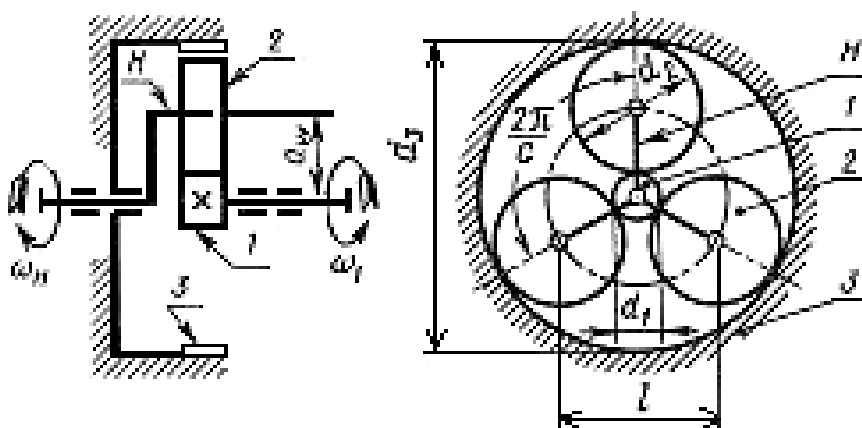


Рис. 4.10. Одноступенчатая планетарная передача

Сателлиты обкатываются по центральным колесам и вращаются вокруг своих осей. Водило, вместе с сателлитами, вращается вокруг центральной оси. При неподвижном центральном колесе 3 движение может передаваться от центрального колеса 1 к водилу  $H$  или от водила к колесу 1. В случае неподвижного водила движение может передаваться от колеса 1 к колесу 3 или от колеса 3 к колесу 1. Планетарную передачу, в которой одно из центральных колес неподвижно, называют простейшей. В отличие от простейшей планетарную передачу, в которой все зубчатые колеса и водило подвижны (свободны), называют дифференциальной. В дифференциальной передаче одно движение можно раскладывать на два или два движения сложить в одно. Например, движение колеса 3 можно передавать одновременно колесу 1 и водилу  $H$  или от колес 1 и 3 водилу  $H$ .

**Определение передаточного отношения** [по книге Гузенков П. Г. Детали машин. Учеб. для вузов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1986. – 359 с.: ил.]

Передаточное отношение планетарного редуктора определяют следующим образом. Допустим, что все звенья передачи (1, 2, 3 и  $H$ , рис. 4.10) жестко скреплены между собой. Сообщим этой жесткой системе переносное вращательное движение вокруг центральной оси с угловой скоростью  $\omega_H$ , равной скорости водила  $\omega_H$ , но обратной по знаку. При этом скорость относительного движения сцепляющихся зубчатых колес и соответственно передаточное отношение их не изменятся. При таком движении результирующая угловая скорость водила равна 0, т.е. водило окажется остановленным. Результирующие относительные угловые скорости зубчатых колес 1 и 3  $\omega'_1 = \omega_1 - \omega_H$  и  $\omega'_3 = \omega_3 - \omega_H$ . При  $\omega_H = 0$ , т.е. при неподвижном водиле  $H$ , планетарная передача превращается в простую зубчатую передачу, в которой геометрические оси всех зубчатых колес неподвижны. Тогда передаточное отношение  $i'$  (сателлиты не учитываются, так как они являются паразитными колесами) определяется как

$$i' = \omega'_1 / \omega'_3 = (\omega_1 - \omega_H) / (\omega_3 - \omega_H).$$

Передаточное отношение  $i'$  считается положительным при одинаковых направлениях вращения обоих зубчатых колес и отрицательным при противоположных направлениях вращения. Для рассматриваемой передачи  $i'$  имеет отрицательное значение:

$$i' = (\omega_1 - \omega_H)/(\omega_3 - \omega_H) = -(z_3/z_1),$$

где  $z_1$  и  $z_3$  – соответственно числа зубьев зубчатых колес 1 и 3.

Так как колесо 3 закреплено неподвижно, то  $\omega_3 = 0$ , а угловая скорость водила

$$\omega_H = \omega_1/[1 + (z_3/z_1)].$$

Передаточное отношение данной планетарной передачи  $i = \omega_1/\omega_H$ , или в окончательном виде  $i = 1 + z_3/z_1$ .

Так же определяют передаточное отношение других видов планетарных передач и планетарных редукторов.

**Конструктивные особенности планетарных передач.** Вследствие неизбежной неточности изготовления и сборки зубчатых колес планетарной передачи нагрузка между сателлитами распределяется неравномерно. Для выравнивания нагрузки по потокам одно из центральных колес делают самоустанавливающимся, т.е. не имеющим радиальных опор. Водила планетарных передач должны быть прочными и жесткими при малой массе. Их изготавливают литыми из высокопрочного чугуна. Подбор чисел зубьев планетарной передачи основывается на трех условиях:

- 1) условие соосности, по которому межосевые расстояния зубчатых пар с внешним и внутренним зацеплением должны быть равны;
- 2) условие сборки – во всех зацеплениях центральных колес с сателлитами зубья также должны входить в зацепление, иначе собрать передачу будет невозможно;
- 3) условие соседства – сателлиты при вращении не должны задевать друг друга зубьями.

К достоинствам планетарных передач относят малые габариты и массу механизма за счет распределения мощности по числу сателлитов, малую нагрузку на опоры (силы в передаче взаимно уравновешивают друг друга за счет симметричного расположения сателлитов), низкий уровень шума работающей передачи.

К недостаткам относится резкое снижение КПД передачи с увеличением передаточного числа (увеличение количества трущихся поверхностей) и повышенные требования к точности изготовления и монтажа механизма.



#### 4.1.4. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ

Волновые передачи основаны на принципе передачи вращательного движения за счет бегущей волновой деформации одного из зубчатых колес.

Данный тип передачи был запатентован американским инженером Массером в 1959 г.

Волновые передачи имеют меньшие массу и габариты, большую кинематическую точность, меньший мертвый ход, высокую вибропрочность за счет демпфирования (рассеяния энергии) колебаний, создают меньший шум.

При необходимости такие передачи позволяют передавать движение в герметичное пространство без применения уплотняющих сальников, что особенно ценно для авиационной, космической и подводной техники, а также для машин химической промышленности.

Кинематически эти передачи представляют собой разновидность планетарной передачи с одним гибким зубчатым колесом. На рисунке 4.11 изображены основные элементы волновой передачи: неподвижное колесо  $1$  с внутренними зубьями, вращающееся упругое колесо  $2$  с наружными зубьями и водило  $h$ . Неподвижное колесо закрепляется в корпусе и выполняется в виде обычного зубчатого колеса с внутренним зацеплением. Гибкое зубчатое колесо имеет форму стакана с легко деформирующейся тонкой стенкой: в утолщенной части (левой) нарезаются зубья, правая часть имеет форму вала. Водило состоит из овального кулачка и специального подшипника.

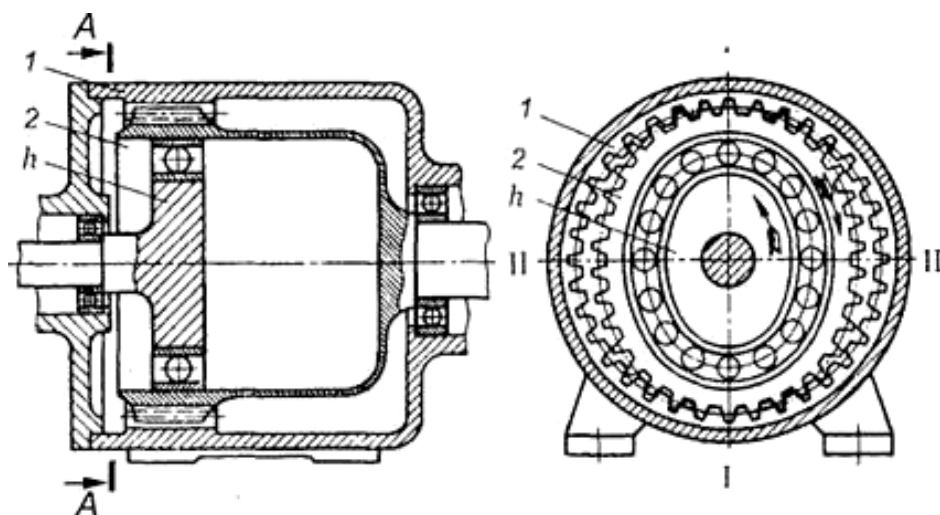


Рис. 4.11. Волновая передача

Гибкое колесо деформируется так, что по оси овала I–I зубья зацепляются на полную рабочую высоту; по оси II–II зубья не зацепляются.

Передача движения осуществляется за счет деформирования зубчатого венца гибкого колеса. При вращении водила волна деформации бежит по окружности гибкого зубчатого венца; при этом венец обкатывается по неподвижному жесткому колесу в обратном направлении, вращая стакан и вал. Поэтому передача и называется волновой, а водило – волновым генератором.

Существует большое количество конструкций волновых механизмов. Обычно эти механизмы преобразуют входное вращательное движение в выходное вращательное или поступательное. Волновые механизмы можно рассматривать как одну из разновидностей многопоточных планетарных механизмов, так как они обладают многозонным, а в случае зубчатого механизма, и многопарным контактом выходного звена с гибким колесом. Многозонный контакт обеспечивается за счет формы генератора волн (кулачок чаще с двумя, редко с тремя выступами), многопарный – за счет податливости зубчатого венца гибкого колеса. Такое сочетание позволяет волновым механизмам передавать значительные нагрузки при малых габаритах. Податливость зубчатого венца обеспечивает достаточно равномерное распределение нагрузки по зубьям, находящимся в зоне зацепления. При номинальных нагрузках процент зубьев находящихся в зацеплении составляет 15 – 25% от общего их числа. Поэтому в волновых передачах применяется мелко-модульное зацепление, а числа зубьев колес лежат в пределах от 100 до 600. Зона зацепления в волновой зубчатой передаче совпадает с вершиной волны деформации. По числу зон или волн передачи делятся на одноволновые, двухволновые и так далее. При вращении водила овальной формы образуются две волны. Такую передачу называют двухволновой. Бывают трехволновые передачи. Передачи с числом волн более трех применяются редко.

Причинами выхода из строя механизма волновой передачи могут быть:

- разрушение подшипника генератора волн от нагрузки в зацеплении;
- проскакивание генератора волн при больших вращающих моментах, когда зубья на входе в зацепление упираются друг в друга вершинами;
- поломка гибкого колеса от трещин усталости (особенно при  $u < 80$ );

- износ зубьев на концах;
- пластические деформации боковых поверхностей зубьев при перегрузках.

Волновые передачи можно применять в качестве редукторов, дифференциалов и вариаторов скорости.

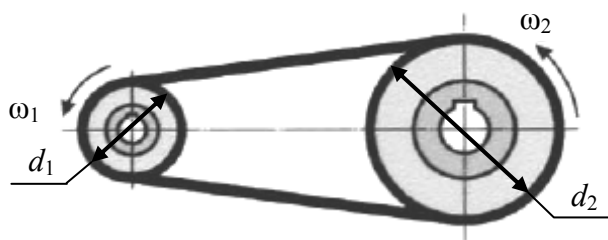
К достоинствам волновых передач относят возможность реализации в одной ступени при двухволновом генераторе волн больших передаточных отношений в диапазоне от 40 до 300, высокую нагрузочную способность при относительно малых габаритах и массе механизма, малый мертвый ход и высокую кинематическую точность.

К недостаткам относится дорогостоящее и трудоемкое изготовление гибкого колеса и волнового генератора, использование этих передач только при сравнительно невысокой угловой скорости вала генератора.

#### 4.1.5. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕМЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Ременная передача относится к передачам трением с гибкой связью. Состоит из ведущего и ведомого шкивов, огибаемых ремнем (рис. 4.12). Нагрузка передается силами трения, возникающими между шкивом и ремнем. Для обеспечения необходимой силы трения ремень должен быть натянут.

Ременные передачи применяют в большинстве случаев для передачи движения от электродвигателя, когда по конструктивным соображениям межосевое расстояние  $a$  должно быть достаточно большим, а передаточное число  $u$  не строго постоянным (в приводах станков, транспортеров, дорожных и строительных машин и т.п.).



**Рис. 4.12. Ременная передача:**

$d_1, d_2$  – диаметры шкивов;

$\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости вращения шкивов

Мощность, передаваемая ременной передачей, обычно достигает величин до 50 кВт и в редких случаях достигает 1500 кВт. Скорость ремня в пределах 5 – 50 м/с, а в сверхскоростных передачах может достигать до 100 м/с.

Ограничение мощности и нижнего предела скорости вызвано большими габаритами передачи. В сочетании с другими передачами ременную передачу применяют на быстроходных ступенях привода.

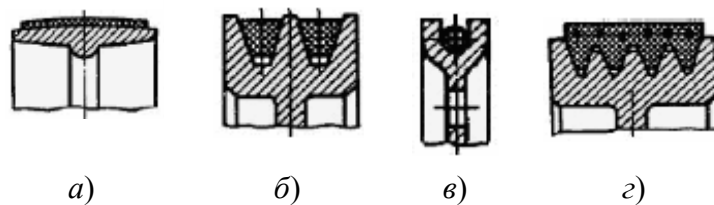


Рис. 4.13. Формы поперечного сечения ремня

**Классификация ременных передач.** В зависимости от формы поперечного сечения ремня передачи (рис. 4.13) бывают:

- 1) плоскоремные (рис. 4.13, а);
- 2) клиноремные (рис. 4.13, б);
- 3) круглоремные (рис. 4.13, в);
- 4) поликлиноремные (рис. 4.13, г).

В современном машиностроении наибольшее применение имеют клиновые и поликлиновые ремни. Передача с круглым ремнем имеет ограниченное применение (швейные машины, настольные станки, приборы).

По расположению валов в пространстве:

- 1) передачи с параллельными валами: открытые (рис. 4.14, а), перекрестные (рис. 4.14, б);
- 2) передачи со скрещивающимися валами – полуперекрестные (рис. 4.14, в);
- 3) передачи с пересекающимися осями валов – угловые (рис. 4.14, г).

К основным геометрическим параметрам ременных передач относятся (рис. 4.15):

- диаметры шкивов  $d_1$  и  $d_2$ ;

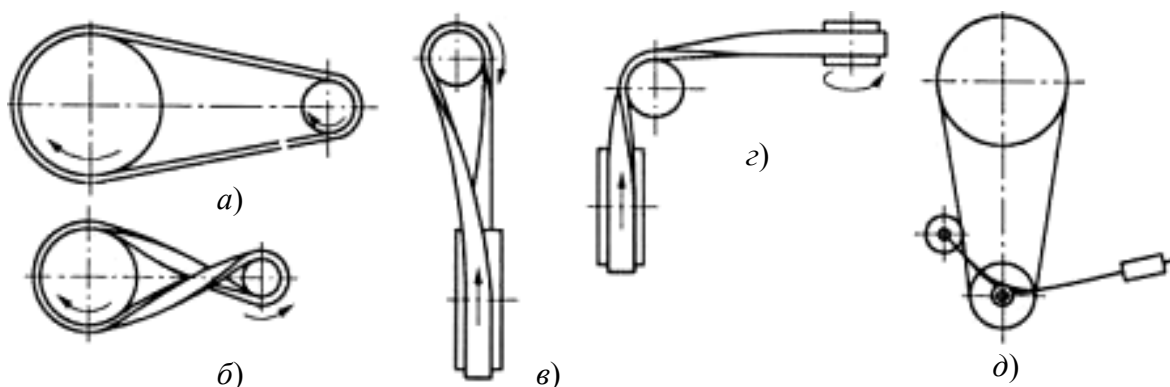


Рис. 4.14. Схемы расположения валов ременных передач

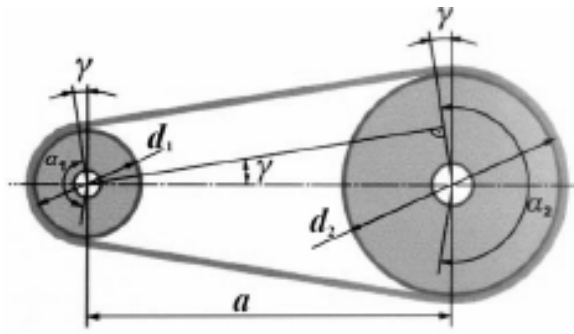


Рис. 4.15. Основные геометрические параметры ременной передачи

- межосевое расстояние  $a$ ;
- расчетная длина ремня  $L_p$ ;
- угол обхвата на малом шкиве  $\alpha_1$ .

Расчетную длину ремня находят как сумму длин дуг обхвата шкивов и прямолинейных участков ремня:

$$l = 2a + \frac{\pi}{2}(d_2 + d_1) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a}.$$

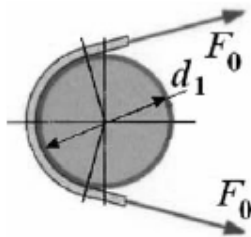
По найденному значению из стандартного ряда выбирают ближайшую большую расчетную длину ремня, после выбора длины ремня корректируют межосевое расстояние.

Угол обхвата ремнем малого шкива:

$$\alpha_1 = 180^\circ - 57^\circ (d_2 - d_1)/a;$$

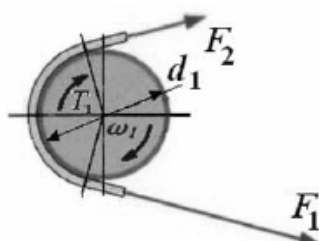
- для плоскоремennых передач  $\alpha_1 \geq 150^\circ$ ;
- для клиноремennых передач  $\alpha_1 \geq 120^\circ$ .

При меньших значениях угла обхвата возможно снижение КПД из-за частичного буксования ремня под нагрузкой.



Для создания трения между ремнем и шкивом необходимо предварительное натяжение ремня силой  $F_0$ . Чем больше  $F_0$ , тем выше тяговая способность передачи. В состоянии покоя или холостого хода на каждую ветвь ремня действует только сила предварительного натяжения  $F_0$ .

При передаче полезного вращающего момента  $T_1$  натяжение в ветвях ремня изменится. В ведущей ветви натяжение увеличивается до силы  $F_1$ , а в ведомом уменьшается до  $F_2$ .



В ременной передаче возникают два вида скольжения: упругое и буксование. Упругое скольжение неизбежно при нормальной работе передачи. В процессе работы напряжение ремня на ведущем шкиве падает, ремень укорачивается и отстает от шкива. Возникает упругое скольжение. На ведомом шкиве натяжение

ремня падает, и тоже возникает упругое скольжение. Упругое скольжение возникает в результате разности натяжений ведущей и ведомой ветви. По мере роста окружной силы  $F_t = \frac{2T}{d}$ , ремень начинает скользить по всей длине дуги обхвата, т.е. по всей поверхности касания ремня с ведущим шкивом, т.е. буксует. Ведомый шкив при этом останавливается, КПД падает до нуля. Упругое скольжение характеризуется коэффициентом скольжения  $\xi_t = \frac{v_1 - v_2}{v_1}$ , который представляет потерю скорости на шкивах, а, следовательно, непостоянство передаточного отношения. Поэтому передаточное число ременной передачи определяется по формуле:

$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d_2}{d_1(1 - \xi)}$$

Важнейшим элементом передачи, определяющим ее работоспособность является приводной ремень. К материалам ремней предъявляются следующие требования:

- прочность при переменных напряжениях;
- износостойкость;
- эластичность;
- надежность сцепления со шкивом;
- невысокая стоимость.

Наибольшее распространение получили прорезиненные ремни с несущими элементами из ткани (кордтканевые) или шнуров (кордшнуровые).

Кордшнуровые ремни обеспечивают более высокий КПД передачи, более гибки и долговечны.

Шкивы ременных передач изготавливаются из чугуна, стали, алюминиевых сплавов, пластмасс и т.д. Форма рабочей поверхности обода шкива определяется видом ремня. Для предупреждения спадания плоского ремня со шкивов ведомый шкив выполняется с выпуклым ободом. Диаметры шкивов ременных передач стандартизованы по ряду предпочтительных чисел  $R20$ . В быстроходных передачах необходима балансировка шкива.

**Критерии работоспособности ременных передач.** Основными критериями работоспособности ременных передач является тяговая способность (способность

передачи передавать заданную нагрузку без буксования) и долговечность ремня (свойство ремня сопротивляться усталостному разрушению).

К достоинствам ременных передач относятся:

- простота конструкции;
- возможность передачи движения на большие расстояния (до 15 м);
- возможность работы с высокими частотами вращения;
- плавность и бесшумность работы;
- смягчение вибраций и толчков;
- предохранение механизмов от перегрузок за счет проскальзывания ремня.

Недостатки:

- большие радиальные размеры шкивов передачи;
- недолговечность ремня, в том числе из-за чувствительности материала к присутствию в окружающей среде нефтепродуктов, жиров, влаги и т.д.;
- непостоянное передаточное число из-за проскальзывания ремня;
- большие нагрузки на валы и подшипники;

## 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

---

### 5.1. ПРИВОДЫ КАК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Электромеханические преобразователи можно разделить на 3 класса:

- индуктивные, в которых рабочим полем является магнитное поле (магнитные);
- емкостные (электростатические), в которых рабочим полем является электрическое;
- индуктивно-емкостные, в которых электромагнитное преобразование осуществляется магнитным и электрическим полями.

Электромеханические преобразователи, в которых электрическая энергия преобразуется в механическую, называются двигателями или приводами (актюаторами, actuator).

Электромеханические преобразователи, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую, называются сенсорами или генераторами (sensor).

Таким образом, один и тот же электромеханический преобразователь может работать и приводом (актюатором), и сенсорным элементом. Электромеханические преобразователи, а именно актюаторы, выполняются с одной подвижной частью, называемой ротором и одной неподвижной, называемой статором.

Электромеханика является одним из разделов физики, в котором рассматривается электромеханическое преобразование энергии. Отсюда все преобразователи энергии можно разделить на два вида: простые и сложные.

В простых преобразователях энергия одного вида полностью преобразуется в энергию другого вида. Например: электрическая печь, в которой электрическая энергия полностью преобразуется в тепловую. В сложных преобразователях энергия одного вида преобразуется в энергию двух (реже трех и более) видов. В данном виде преобразователей есть сопутствующее преобразование энергии в тепло.

Электромеханические преобразователи (ЭП) относятся к сложным преобразователям, так как электромеханическое преобразование электрической  $W_{эл}$  или



механической  $W_{\text{мех}}$  энергий сопровождается преобразованием их в тепловую  $W_{\text{теп}}$ . Уменьшить тепловые потери можно уменьшением габаритов электромеханических преобразователей. Электромеханический преобразователь можно представить как шестиполюсник с электрическими, механическими и тепловыми выводами. В большинстве исследований тепловой контур рассматривается как имеющий бесконечный объем с неизменной температурой. Поэтому электромеханический преобразователь рассматривают как четырехполюсник. Электромеханический преобразователь в виде четырехполюсника рассматривается при решении задач электромеханики, когда процессы преобразования энергии внутри преобразователя не имеют определенного значения.

Все электромеханические преобразователи обратимы, т.е. могут работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Работа электромеханических машин в двух режимах является важнейшим преимуществом электромеханических преобразователей перед другими преобразователями энергии. Если электрическая энергия поступает из сети, то электромеханический преобразователь работает в режиме двигателя, если поток механической энергии преобразуется в поток электрической энергии, устанавливается генераторный режим работы.

Потери в электромеханических преобразователях необратимы. Однако, электромеханические преобразователи настолько разнообразны, что существуют ЭП, преобразующие тепло в электрическую и механическую энергию.

Электромеханическое преобразование энергии осуществляется полями, неподвижными относительно друг друга. Неподвижные относительно друг друга поля создают результирующее поле и электромагнитный момент, а поля, перемещающиеся в воздушном зазоре относительно друг друга, создают поток тепловой энергии, что приводит к потерям в ЭП и уменьшению КПД.

Обмотки электрических машин выполняют таким образом, что при протекании по ним токов в воздушном зазоре создается вращающееся магнитное поле. При проектировании ЭП стремятся получить в воздушном зазоре круговое поле, содержащее только одну гармонику. Такое поле называется синусоидальным.

Электромеханические преобразователи можно классифицировать по назначению, конструктивному исполнению и принципу действия следующим образом (рис. 5.1).

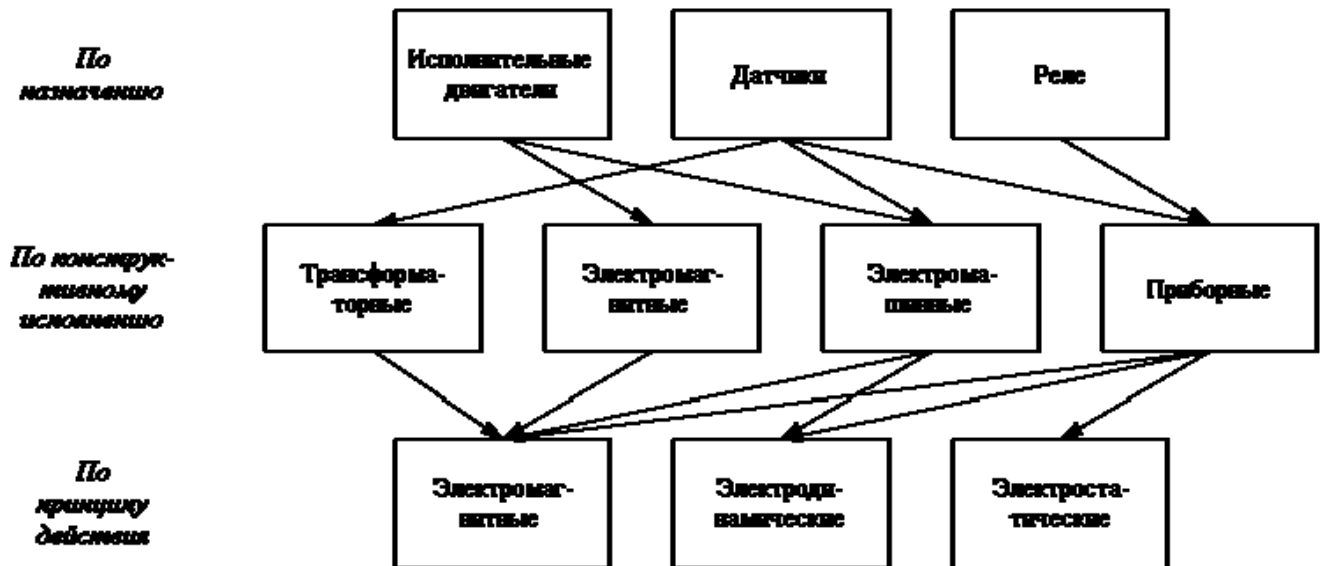


Рис. 5.1. Классификация электромеханических преобразователей

## 5.2. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В системах мехатроники преимущественное применение нашли двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или магнитоэлектрические. Управление этими двигателями, как правило, осуществляется по цепи якоря. Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{я}} &= R_{\text{я}} \left( R_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} - i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}; \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_{\text{H}}; \\
 \omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt}; \\
 e_{\text{я}} &= k_E \omega_m, \quad M = k_M i_{\text{я}}.
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

В уравнениях (5.1)  $u_{\text{я}}$ ,  $i_{\text{я}}$ ,  $e_{\text{я}}$  – напряжение, ток и противоэдс якоря,  $L_{\text{я}}$ ,  $R_{\text{я}}$ ,  $T_z = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  – индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря,  $\omega_m$ ,  $M$ ,  $M_{\text{H}}$ ,  $\theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала,  $J$  – момент инерции ротора, коэффициенты  $k_E$ ,  $k_M$  являются конструктивными постоянными.

ми. Параметры двигателя, входящие в уравнения (5.1) рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

В качестве примера в табл. 5.1 приведены параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением, разработанные для робототехнических комплексов.

**Таблица 5.1**

$P_H$ , кВт	$U_{\text{я}} = U_{\text{в}}$ , В	$n_H$ , об/мин	$I_{\text{я}}$ , А	$R_{\text{я}}$ , Ом	$R_{\text{в}}$ , Ом	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
0,12	110	3000	1,53	1,48	642	0,06
0,2	110	3000	2,46	0,762	560	0,08
0,25	110	3000	3,05	0,945	827	0,14
0,37	110	3000	4,4	0,546	934	0,16
0,45	110	3000	5,6	0,585	400	0,36
1,0	110	3000	9,96	0,561	500	0,8

В таблице 5.1 введены следующие обозначения:

- номинальная мощность двигателя  $P_H$ , кВт;
- номинальное напряжение питания якоря  $U_{\text{я}}$ , В;
- номинальное напряжение возбуждения  $U_{\text{в}}$ , В;
- номинальный ток якоря  $I_{\text{я}}$ , А;
- номинальная скорость вращения якоря  $n_H$ , об/мин;
- сопротивление обмотки якоря  $R_{\text{я}}$ , Ом;
- сопротивление обмотки возбуждения  $R_{\text{в}}$ , Ом.

Номинальный момент двигателя в (Н·м), номинальный ток возбуждения в (А), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30 P_H}{\pi n_H}, \quad I_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}, \quad k_M = \frac{M_H}{I_{\text{я}}}, \quad k_E = \frac{30(U_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}})}{\pi n_H}, \quad L_{\text{я}} \approx \frac{30 U_{\text{я}} c_x}{\pi n_H I_{\text{я}}}, \quad (5.2)$$

где  $c_x = 0,3-0,4$  – эмпирический коэффициент.

Передаточные функции скоростной части ДПТ по управляющему и возмущающему воздействиям могут быть представлены соответственно выражениями

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{\text{я}}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}, \quad (5.3)$$

$$W'(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_{\text{н}}(s)} = -\frac{\frac{(T_{\text{я}} s + 1) k_M}{k_E}}{\frac{T_{\text{я}}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1}. \quad (5.4)$$

В выражениях (5.3), (5.4) введены обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_{\text{я}}}, \quad K_2 = \frac{k_M}{J}. \quad (5.5)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_{\text{я}}} \pm \frac{1}{2T_{\text{я}}} \sqrt{1 - 4T_{\text{я}} K_1 K_2 k_E}. \quad (5.6)$$

В зависимости от соотношения параметров  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $T_{\text{я}}$  и  $k_E$  корни характеристического уравнения могут быть либо вещественными либо комплексно-сопряженными. При выполнении условия  $4T_{\text{я}} K_1 K_2 k_E \leq 1$  корни характеристического уравнения являются вещественными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде двух последовательно включенных апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени  $T_1$ ,  $T_2$  и коэффициентом передачи  $1/k_E$ .

$$W(s) = \frac{x(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (5.7)$$

где  $T_1 = -1/s_1$ ,  $T_2 = -1/s_2$ .

Для придания скоростному контуру требуемых свойств используются регуляторы, структура и параметры которых зависят от параметров ДПТ и требований, предъявляемых к скоростному контуру.

### 5.2.1. ОДНОКОНТУРНАЯ СКОРОСТНАЯ СИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Структурная схема системы с исполнительным двигателем постоянного тока (ДПТ), управляемого по цепи якоря, представлена на (рис. 5.2). Она включает сам двигатель, представленный последовательно включенными апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном, охваченными обратной связью через безынерционное звено ( $k_E$ ).

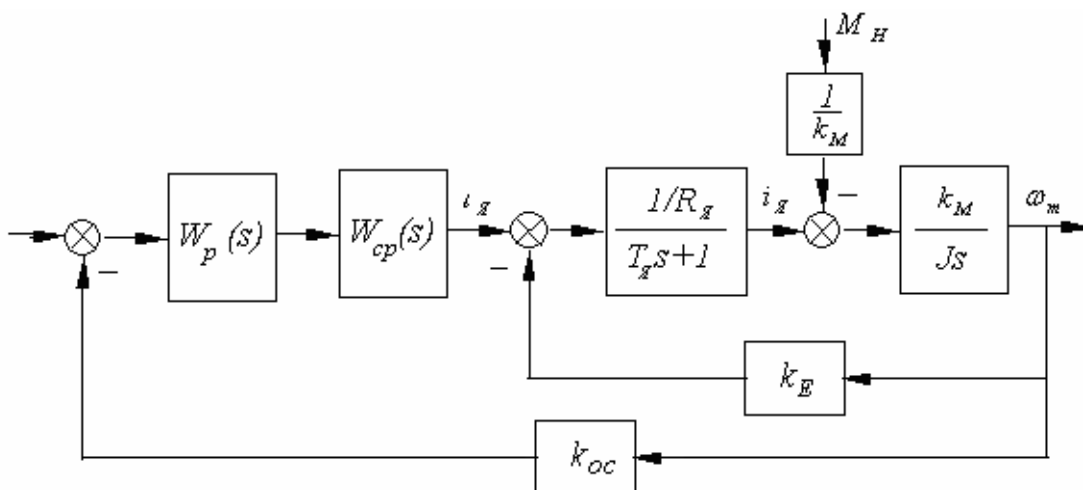


Рис. 5.2. Структурная схема одноконтурной скоростной системы постоянного тока

Двигатель постоянного тока управляется от силового регулятора, представленного звеном  $W_{cp}(s)$ . Силовой регулятор (в данном случае реверсивный широтно-импульсный преобразователь) управляется от регулятора с передаточной функцией  $W_p(s)$ , на вход которого подается разность сигнала управления и обратной связи по скорости.

Первоначально рассмотрим синтез регуляторов скоростной системы, в которой момент нагрузки является независимой от координат системы функцией. В этом случае момент нагрузки является возмущением, которое система должна компенсировать

**Пример 5.1.** Для случая, когда постоянные времени сильно разнятся  $T_2 \gg T_1$  целесообразно строить ПИ регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени объекта

$$W_p(s) = \frac{(T_2 s + 1)k_p}{T_2 s} = k_p + \frac{k_p}{T_2 s} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s}. \quad (5.8)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{(T_2 s + 1) k_{\text{ср}} k_{\text{р}} k_{\text{ос}}}{T_2 s} \frac{1/k_E}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{k_{\text{ср}} k_{\text{р}} k_{\text{ос}} / k_E}{T_2 s (T_1 s + 1)}. \quad (5.9)$$

Оптимум по модулю в такой системе достигается при  $\frac{T_2 k_E}{k_{\text{ср}} k_{\text{р}} k_{\text{ос}}} = 2T_1$ , откуда находятся коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора.

$$k_{\text{п}} = k_{\text{р}} = \frac{T_2 k_E}{2T_1 k_{\text{ср}} k_{\text{ос}}}, \quad k_{\text{и}} = \frac{k_{\text{р}}}{T_2}. \quad (5.10)$$

**Пример 5.2.** В случае, когда эквивалентные постоянные времени различаются незначительно для придания звену второго порядка, описанного уравнением (5.3), заданных динамических качеств, как это следует из материалов, необходимо использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{р}}(s) = k_{\text{п}} + \frac{k_{\text{и}}}{s} + \frac{k_{\text{Д}} s}{T_{\text{Д}} s + 1} = \frac{k_{\text{и}}}{s} \frac{\frac{k_{\text{Д}} + T_{\text{Д}} k_{\text{п}}}{k_{\text{и}}} s^2 + \frac{k_{\text{п}} + T_{\text{Д}} k_{\text{и}}}{k_{\text{и}}} s + 1}{T_{\text{Д}} s + 1}. \quad (5.11)$$

Параметры регулятора, обеспечивающие optimum по модулю в замкнутой скоростной системе, рассчитываются по уравнениям:

$$T_{\text{Д}} < T_1, \quad k_{\text{и}} = \frac{k_E}{2T_{\text{Д}} k_{\text{ср}} k_{\text{ос}}}, \quad \frac{k_{\text{Д}} + T_{\text{Д}} k_{\text{п}}}{k_{\text{и}}} = T_1 T_2, \quad \frac{k_{\text{п}} + T_{\text{Д}} k_{\text{и}}}{k_{\text{и}}} = T_1 + T_2. \quad (5.12)$$

При  $4T_{\text{я}} K_1 K_2 k_E > 1$  корни характеристического уравнения являются комплексно-сопряженными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде колебательного звена с параметрами  $T$ ,  $\xi$  и коэффициентом передачи  $1/k_E$

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (5.13)$$

где  $T = \sqrt{T_{\text{я}} / K_1 K_2 k_E}$ ,  $\xi = 1 / \sqrt{4T_{\text{я}} K_1 K_2 k_E}$ .

Для такой системы используется ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, параметры такого регулятора выбираются в соответствии с требованиями к динамике замкнутой системы. Например, при настройке скоростной системы на оптимум по модулю параметры ПИД-регулятора находятся из уравнений:

$$T_D < 2\xi T_1, k_{и} = \frac{k_E}{2T_D k_{cp} k_{oc}} \frac{k_D + T_D k_{п}}{k_{и}} = T^2, \frac{k_{п} + T_D k_{и}}{k_{и}} = 2\xi T. \quad (5.14)$$

### 5.2.2. ДВУХКОНТУРНАЯ СКОРОСТНАЯ СИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Когда инерционностью силового регулятора пренебречь нельзя в скоростном контуре ДПТ используется двухконтурный регулятор (рис. 5.3). При этом первый контур называется токовым, второй – скоростным.

Такое построение дает ряд преимуществ перед одноконтурной системой:

- во-первых, в токовом контуре существенно снижаются влияние нелинейностей и запаздывания, которые может вносить силовой регулятор;
- во-вторых, в такой структуре просто реализуется ограничение тока якоря ДПТ, что практически всегда требуется в реальных системах;
- в-третьих, при таком построении практически исключается влияние скорости на ток якоря (разрывается связь по  $k_E$ ), двигатель может быть представлен

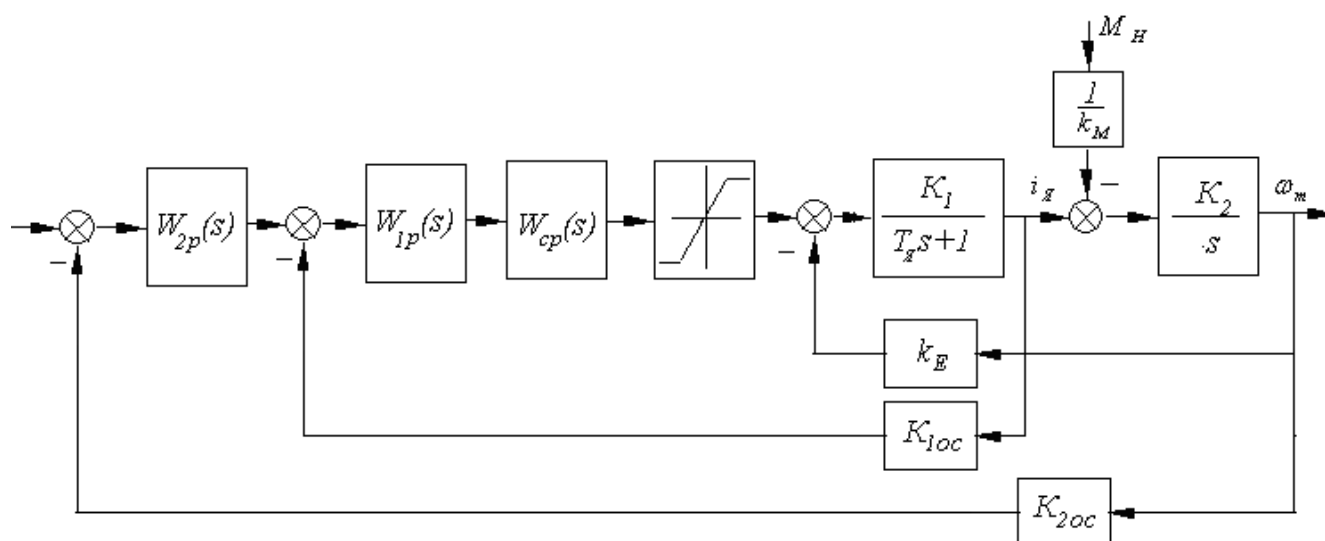


Рис. 5.3. Двухконтурная скоростная система постоянного тока

двумя последовательно включенными динамическими звеньями. Первое звено апериодическое с постоянной времени  $T_{\text{я}}$ , второе – интегрирующее. Синтез регуляторов в такой структуре не зависит от соотношения постоянных времени и осуществляется по единой методике.

Когда в качестве силового регулятора используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП), в токовом контуре можно использовать релейный регулятор. В этом случае токовый контур становится практически безынерционным, силовой регулятор приобретает свойства источника тока, а ДПТ – источника момента;

– в-четвертых, для придания замкнутой системе заданных динамических характеристик в регуляторах исключаются дифференцирующие звенья, что улучшает помехоустойчивость и расширяет динамический диапазон работы системы.

**Пример 5.3.** Рассмотрим пример, где в качестве силового регулятора используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП). Широтно-импульсный преобразователь представим звеном с запаздыванием на период коммутации  $T_{\text{ср}}$  и коэффициентом усиления  $k_{\text{ср}}$ . Кроме того, учтем насыщение, которое обусловлено конечной величиной напряжения питания ШИП и ограничение, которое осуществляется в системе. Постоянная времени запаздывания звена определяется частотой коммутации.

При синтезе регулятора токового контура представим ШИП апериодическим звеном с передаточной функцией  $W_{\text{ср}}(s) = \frac{k_{\text{ср}}}{T_{\text{ср}}s + 1}$ , тогда передаточная функция разомкнутого внутреннего (токового) контура будет равна

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{W_{1\text{р}}(s)k_{\text{ср}}k_{1\text{ос}}K_1}{(T_{\text{ср}}s + 1)(T_{\text{я}}s + 1)}. \quad (5.15)$$

Для рассматриваемого ДПТ  $T_{\text{я}} \gg T_{\text{ср}}$  и методика синтеза регулятора аналогична той, которая рассмотрена в *примере 5.1*.

При использовании ПИ-регулятора с параметрами  $W_{1\text{р}}(s) = \frac{k_{1\text{р}}(T_{\text{я}}s + 1)}{T_{\text{я}}s}$

получим



$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{k_{1\text{p}}k_{\text{cp}}k_{1\text{oc}}K_1}{T_{\text{я}}s(T_{\text{cp}}s + 1)}. \quad (5.16)$$

Настройка замкнутого контура на оптимум по модулю реализуется при

$$k_{1\text{p}} = \frac{T_{\text{я}}}{2T_{\text{cp}}k_{\text{cp}}k_{1\text{oc}}K_1}. \quad (5.17)$$

При этом замкнутый внутренний контур может быть представлен передаточной функцией

$$W_{13}(s) = \frac{1}{k_{1\text{oc}}} \frac{1}{2T_{\text{cp}}^2s^2 + 2T_{\text{cp}}s + 1} \approx \frac{1}{k_{1\text{oc}}} \frac{1}{2T_{\text{cp}}s + 1}. \quad (5.18)$$

Для реализации оптимума по модулю во внешнем (скоростном) контуре нужно использовать П-регулятор с коэффициентом усиления  $k_{2\text{p}} = \frac{k_{1\text{oc}}}{4T_{\text{cp}}K_2k_{2\text{oc}}}$ .

### 5.2.3. СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Выше рассмотрены типовые скоростные системы постоянного тока. Такие системы широко используются для стабилизации или регулирования скорости различных механизмов.

Следящие системы (системы замкнутые по углу) широко используются при построении систем управления положением различных механизмов. Рассмотрим этот вопрос на примере построения следящей системы с широтно-импульсным преобразователем и релейным регулятором в контуре тока.

В этом случае контур тока можно считать безынерционным, а силовой регулятор – источником тока. Структурная схема такой системы представлена на рис. 5.4.

**Пример 5.4.** Замкнутая структура содержит скоростной и угловой контуры, регуляторы в которых требуется синтезировать. Регулятор в скоростном контуре следует подобрать так, чтобы разомкнутый контур удовлетворял требованию оп-

тимума по модулю  $W_{1\text{p}}(s) = \frac{k_{1\text{p}}}{(T_{\text{p}}s + 1)}$ , тогда

$$W_{1\text{раз}}(s) = \frac{k_{1\text{p}}K_2k_{1\text{oc}}}{s(T_{\text{p}}s + 1)} = \frac{1}{2T_{\text{p}}(T_{\text{p}}s + 1)}.$$

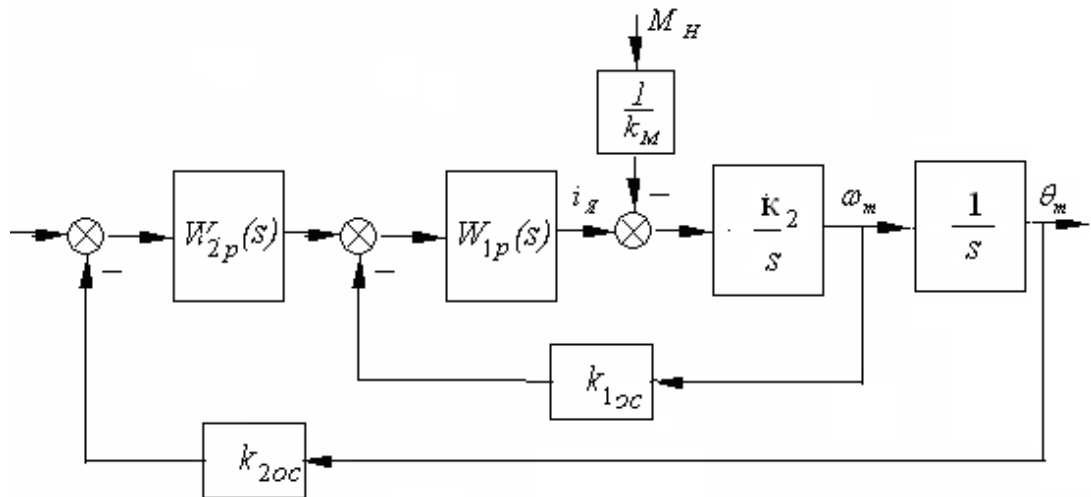


Рис. 5.4. Структурная схема следящей системы постоянного тока

Задавшись  $T_p = 0,01$  с,  $k_{1oc} = 1,0$ , определим  $k_{1p} = \frac{1}{2T_p K_2 k_{1oc}} = 70$ .

Аналогично предыдущему синтезируется внешний (угловой) контур при  $k_{2oc} = 1,0$

$$k_{2p} = \frac{1}{4T_p k_{2oc}} = 25.$$

#### 5.2.4. СЛЕДЯЩАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В робототехнических системах, как правило, двигатель соединен с исполнительным механизмом напрямую (без редуктора).

Математическое описание одного звена робота имеет вид

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + C_1 \omega_m + C_2 \sin \theta_m = k_M i_{я}, \quad (5.19)$$

где  $J$  – суммарный момент инерции якоря и механического звена робота;  $i_{я}$  – ток якоря;  $\theta_m = \int \omega_m dt$  – угол поворота звена робота. Ток якоря ДПТ находится из уравнения

$$T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + i_{я} + \frac{k_E}{R_{я}} \omega_m = \frac{u_{я}}{R_{я}}. \quad (5.20)$$

**Пример 5.5.** Синтез регулятора при наличии датчиков по всем переменным состояниям, т.е. имеется три контура:

- 1) контур тока;
- 2) контур скорости;
- 3) контур положения.

Рассмотрим пример, когда в качестве силового регулятора в контуре тока используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП).

ШИП представим апериодическим звеном с насыщением и с передаточной функцией  $W_{cp}(s) = \frac{k_{cp}}{T_{cp}s + 1}$ . Постоянная времени звена определяется частотой коммутации. Зададимся частотой коммутации 500 Гц, тогда  $T_{cp} = 0,002$  с.

Первоначально проведем синтез регуляторов в системе в линейной зоне (в «малом») при отсутствии затемненных блоков, а затем рассмотрим вопросы синтеза в нелинейной зоне (в «большом»).

*А. Синтез регуляторов в системе в линейной зоне.*

Передаточная функция объекта регулирования в первом контуре равна

$$W_1(s) = \frac{k_{cp}}{T_{cp}s + 1} \frac{K_1}{T_яs + 1}. \quad (5.21)$$

Поскольку  $T_я \gg T_{cp}$ , то в соответствии с положениями, изложенными выше, в качестве регулятора выбираем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{1p}(s) = \frac{(T_яs + 1)k_{1p}}{T_яс} = k_{1p} + \frac{k_{1p}}{T_яс} = k_{1п} + \frac{k_{1и}}{s}. \quad (5.22)$$

Оптимум по модулю в замкнутом токовом контуре достигается при

$$k_{1p} = \frac{T_я}{2T_{cp}k_{cp}K_1k_{1ос}}. \quad (5.24)$$

Например, для  $k_{1ос} = 0,1$ , получим  $k_{1p} = k_{1п} = 6,29$ ,  $k_{1и} = 146,1$ .

Оптимизированный по модулю замкнутый токовый контур может быть представлен передаточной функцией

$$W_{1\text{зам}}(s) = \frac{1/k_{1\text{ос}}}{2T_{\text{ср}}s + 1}. \quad (5.25)$$

Следует подчеркнуть, что в подчиненном контуре при наличии обратной связи практически компенсировано влияние противоэдс двигателя.

Передаточная функция объекта регулирования во втором (скоростном) контуре определится из выражения  $W_2(s) = \frac{K_2/k_{1\text{ос}}}{s(2T_{\text{ср}}s + 1)}$ .

Второй (скоростной) контур настраиваем также на оптимум по модулю. В этом случае регулятор должен быть пропорциональным с коэффициентом уси-

ления  $k_{2\text{р}} = \frac{k_{1\text{ос}}}{4T_{\text{ср}}K_2k_{2\text{ос}}} = 347$  при  $k_{2\text{ос}} = 0,05$ , а передаточная функция объекта,

состоящего из первого и второго контура, определится выражением

$$W_{2\text{зам}}(s) \approx \frac{1/k_{2\text{ос}}}{4T_{\text{ср}}s + 1}.$$

Передаточная функция объекта регулирования в разомкнутом контуре положения с учетом предыдущего уравнения определится выражением

$$W_3(s) = \frac{1/k_{2\text{ос}}}{s(4T_{\text{ср}}s + 1)}. \quad (5.26)$$

Для оптимизации по модулю регулятор должен быть пропорциональным с

коэффициентом усиления  $k_{3\text{р}} = \frac{k_{2\text{ос}}}{8T_{\text{ср}}k_{3\text{ос}}}$ .

### *Б. Синтез регуляторов в системе в нелинейной зоне.*

Напряжение на выходе ШИП ограничено напряжением питания – это является естественным ограничением в системе. Однако, как правило, естественного ограничения недостаточно для ограничения пускового тока. В двигателях, предназначенных для использования в мехатронных системах, пусковой ток допускается в пределах 2–3 от тока номинального. Для реализации такого ограничения на входе регулятора тока включается нелинейное звено с ограничением на требуемом уровне (рис. 5.5).

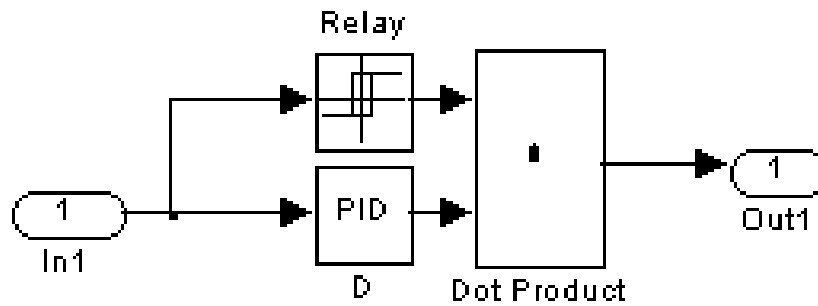


Рис. 5.5. Структура нелинейного блока

Нелинейное звено на входе содержит реальный Д-регулятор и релейный элемент, который обеспечивает подключение Д-регулятора при определенном значении сигнала рассогласования на входе системы.

### 5.3. ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Обобщенная асинхронная машина показана на рис. 5.6. Она содержит трехфазную обмотку на статоре и трехфазную обмотку на роторе. Обмотки статора и ротора подключены к симметричным трехфазным источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах.

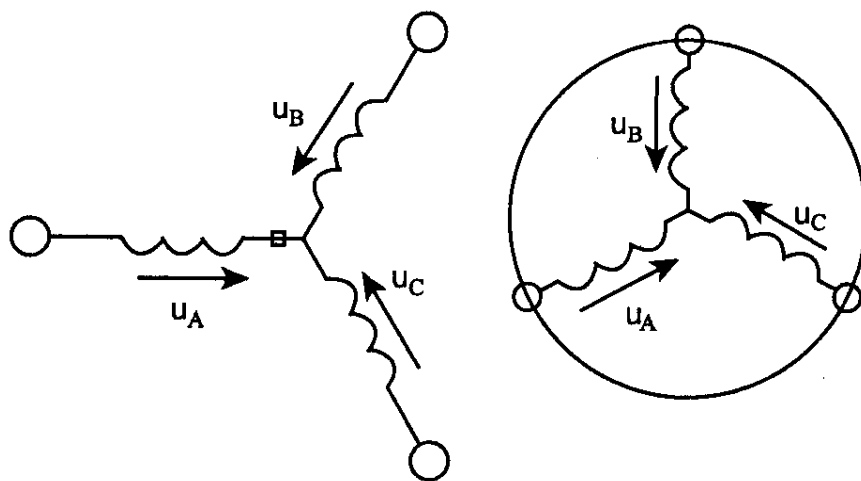


Рис. 5.6. Обобщенная асинхронная машина

1. Уравнения равновесия э.д.с. на обмотках статора и ротора в соответствии с 2 законом Кирхгофа запишутся в виде:

Для статора:

$$u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt},$$

$$u_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt},$$

$$u_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}.$$

Для ротора:

$$u_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt},$$

$$u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \quad (5.27)$$

$$u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}.$$

В уравнениях (5.27) фигурируют мгновенные напряжения, токи и потокосцепления статора и ротора, а также активные сопротивления обмоток. Обычно обмотки выполняются симметричными и поэтому  $R_A = R_B = R_C = R_S$  – активное сопротивление статорной обмотки,  $R_a = R_b = R_c = R_R$  – активное сопротивление роторной обмотки.

2. В уравнениях (5.27) потокосцепления обмоток статора и ротора находятся на основе закона Ампера:

Для статора

$$\psi_A = L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c,$$

$$\psi_B = L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c,$$

$$\psi_C = L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c, \quad (5.28)$$

Для ротора

$$\psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c,$$

$$\psi_b = L_{bA} i_A + L_{bB} i_B + L_{bC} i_C + L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c,$$

$$\psi_c = L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_{cC} i_C + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c.$$

Уравнения для определения потокосцеплений показывают, что потокосцепление каждой обмотки зависит от токов во всех обмотках, эти зависимости проявляются через взаимную индукцию. В уравнениях (5.28)  $L_{AA}$ ,  $L_{BB}$ ,  $L_{CC}$ ,  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$ ,  $L_{cc}$  являются собственными индуктивностями соответствующих обмоток, все остальные – являются взаимными индуктивностями между соответствующими обмотками.

3. Уравнение равновесия моментов на валу машины определяется на основе второго закона Ньютона:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_H, \quad (5.29)$$

где  $J$  (кГ·м<sup>2</sup>) – момент инерции на валу машины, учитывающий инерционность как самой машины, так и приведенной к валу инерционности рабочего механизма и редуктора,  $\vec{\omega}_m$  (рад/с) – угловая скорость вала машины,  $\vec{M}_H$  (Н·м) – момент рабочего механизма, приведенный к валу, который в общем случае может быть функцией скорости и угла поворота.

Электромагнитный момент машины в уравнении (5.29) находится на основании закона, сформулированного Ленцем, как правило левой руки. Этот закон связывает векторные величины момента, потокосцепления и тока:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \times \vec{i}). \quad (5.30)$$

Следует сразу подчеркнуть, что, несмотря на полное и строгое математическое описание, использование уравнений (5.27) – (5.30) для исследования машины встречает серьезные трудности.

Перечислим основные из этих трудностей:

- в уравнениях (5.29 и 5.30) фигурируют векторные величины, а в уравнениях (5.27 и 5.28) величины скалярные;
- количество взаимосвязанных уравнений равно 16, а количество коэффициентов – 44;
- коэффициенты взаимоиндукции между обмотками статора и ротора в уравнениях (5.28) являются функцией угла поворота ротора относительно статора, т.е. уравнения (5.28) являются уравнениями с переменными коэффициентами;
- уравнение (5.30) является нелинейным, так как в нем перемножаются переменные.

Упрощение математического описания обобщенной асинхронной машины осуществляется в несколько этапов (шагов).

### ШАГ 1.

Для преобразования уравнений в мгновенных значениях к уравнениям в пространственных векторах умножим первые уравнения на  $\frac{2}{3}$ , вторые – на  $\frac{2}{3}\vec{a}$ , третьи – на  $\frac{2}{3}\vec{a}^2$  и сложим отдельно для статора и ротора, тогда получим:

$$\begin{aligned}\vec{u}_S &= R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt}, \\ \vec{u}_R &= R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt}, \\ \vec{\Psi}_S &= L_S \vec{i}_S + L_m(\theta) \vec{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= L_m(\theta) \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R,\end{aligned}\tag{5.31}$$

где  $L_S$ ,  $L_R$  – собственные индуктивности статора и ротора;  $L_m(\theta)$  – взаимная индуктивность между статором и ротором, т.е. вместо 12 уравнений (5.27) – (5.28) получено лишь четыре уравнения (5.31).

### ШАГ 2.

Переменные коэффициенты взаимной индукции в уравнениях для потокосцеплений (5.31) являются результатом того, что уравнения равновесия э.д.с для статора записаны в неподвижной системе координат, связанной со статором, а уравнения равновесия э.д.с для ротора записаны во вращающейся системе координат, связанной с ротором. Метод пространственного вектора позволяет записать эти уравнения в единой системе координат, вращающейся с произвольной скоростью  $\omega_k$ . В этом случае уравнения (5.31) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned}\vec{u}_S &= R_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_S, \\ \vec{u}_R &= R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_R, \\ \vec{\Psi}_S &= L_S \vec{i}_S + L_m \vec{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= L_m \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R,\end{aligned}\tag{5.32}$$



В уравнениях (5.32) все коэффициенты являются величинами постоянными, имеют четкий физический смысл и могут быть определены по паспортным данным, либо экспериментально.

### ШАГ 3.

Этот шаг связан с определением момента. Момент в уравнении (5.30) является векторным произведением любой пары векторов. Из уравнения (5.30) следует, что таких пар может быть шесть:  $(\vec{i}_S, \vec{i}_R)$ ;  $(\vec{\Psi}_S, \vec{\Psi}_R)$ ;  $(\vec{i}_S, \vec{\Psi})_S$ ;  $(\vec{i}_S, \vec{\Psi})_R$ ;  $(\vec{i}_R, \vec{\Psi})_S$ ;  $(\vec{i}_R, \vec{\Psi})_R$ . Часто в рассмотрение вводится потокосцепление взаимной индукции  $\vec{\Psi}_m = L_m(\vec{i}_S + \vec{i}_R)$ . В этом случае появляется еще четыре возможности представления электромагнитного момента машины через следующие пары:  $(\vec{i}_S, \vec{\Psi}_m)$ ;  $(\vec{i}_R, \vec{\Psi}_m)$ ;  $(\vec{\Psi}_S, \vec{\Psi}_m)$ ;  $(\vec{\Psi}_R, \vec{\Psi}_m)$ . После выбора той или иной пары уравнение момента приобретает определенность, а количество уравнений в системе (5.32) сокращается до двух. Кроме того, в уравнениях (5.29) и (5.30) векторные величины момента и скорости могут быть заменены их модульными значениями. Это является следствием того, что пространственные векторы токов и потокосцеплений расположены в плоскости перпендикулярной оси вращения, а вектор момента и угловой скорости совпадают с осью.

В системах мехатроники для определения электромагнитного момента асинхронной машины, как правило, в качестве переменных состояния выбирают ток статора и потокосцепление ротора.

$$M = \frac{3}{2} pk_R \cdot \text{Mod}(\vec{\Psi}_R \times \vec{i}_S). \quad (5.33)$$

Обобщенная система уравнений для описания асинхронной машины принимает вид:

$$\begin{aligned} \vec{u}_S &= L_S \vec{i}_S + \frac{d\vec{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\Psi}_S, \\ \vec{u}_R &= R_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \vec{\Psi}_R, \\ \vec{\Psi}_R &= L_m \vec{i}_S + L_R \vec{i}_R, \end{aligned}$$

$$M = \frac{3}{2} pk_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H, \quad (5.34)$$

где  $\omega = p\omega_m$ ,  $p$  – число пар полюсов в машине.

При составлении уравнений (5.34), описывающих обобщенную асинхронную машину, вводятся следующие допущения:

1. Не учитывается насыщение, которое наступает при больших токах в обмотках.
2. Пространственное распределение магнитного поля в зазоре считается синусоидальным.
3. Параметры машины считаются постоянными, не зависящими от тока в обмотках.

### 5.3.1. АСИНХРОННАЯ МАШИНА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получается из обобщенной схемы (рис.5.6), если обмотки ротора замкнуть накоротко. При этом в общих уравнениях (5.34) следует положить  $\bar{u}_R = 0$ .

$$\bar{u}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_S,$$

$$0 = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\Psi}_R,$$

$$\bar{\Psi}_S = L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R, \quad (5.35)$$

$$\bar{\Psi}_R = L_m \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R,$$

$$M = \frac{3}{2} pk_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H.$$

Уравнения (5.35) после соответствующих преобразований можно привести к виду:

$$\begin{aligned}\bar{u}_S &= r\bar{i}_S + L'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega_K L'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\Psi}_R + jk_R p\omega_m \bar{\Psi}_R, \\ 0 &= -k_R R_R \bar{i}_S + \frac{1}{T_R} \bar{\Psi}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_K - p\omega_m) \bar{\Psi}_R,\end{aligned}\quad (5.36)$$

$$M = \frac{3}{2} pk_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H,$$

где  $r = (R_S + k_R^2 R_R)$ ,  $L'_S = \left( L_S - \frac{L_m^2}{L_R} \right)$ ,  $k_R = \frac{L_m}{L_R}$ ,  $T_R = \frac{L_R}{R_R}$ .

### 5.3.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКЗ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В неподвижной комплексной системе координат ( $\omega_k = 0$ ) вещественная ось обозначается " $\alpha$ ", а мнимая " $\beta$ ". Пространственные вектора в этом случае раскладываются по осям:  $\bar{u}_S = u_{S\alpha} + ju_{S\beta}$ ,  $\bar{i}_S = i_{S\alpha} + ji_{S\beta}$ ,  $\bar{\Psi}_R = \Psi_{R\alpha} + j\Psi_{R\beta}$ . Подставив эти значения в уравнения (5.36) и, приравняв отдельно вещественные и мнимые части, получим:

$$u_{S\alpha} = ri_{S\alpha} + L'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\alpha} - k_R p\omega_m \Psi_{R\beta},$$

$$u_{S\beta} = ri_{S\beta} + L'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{R\beta} + k_R p\omega_m \Psi_{R\alpha},$$

$$0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p\omega_m \Psi_{R\beta},$$

$$0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - p\omega_m \Psi_{R\alpha},$$

$$M = \frac{3}{2}pk_R(\Psi_{R\alpha}i_{S\beta} - \Psi_{R\beta}i_{S\alpha}),$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H. \quad (5.37)$$

Система уравнений (5.37) в операторной форме примет вид:

$$u_{S\alpha} = r(1 + T'_S s)i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R}\Psi_{R\alpha} - k_R p\omega_m \Psi_{R\beta},$$

$$u_{S\beta} = r(1 + T'_S s)i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R}\Psi_{R\beta} + k_R p\omega_m \Psi_{R\alpha},$$

$$0 = -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R}(1 + T_R s)\Psi_{R\alpha} + p\omega_m \Psi_{R\beta}, \quad (5.38)$$

$$0 = -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R}(1 + T_R s)\Psi_{R\beta} - p\omega_m \Psi_{R\alpha},$$

$$M = \frac{3}{2}pk_R(\Psi_{R\alpha}i_{S\beta} - \Psi_{R\beta}i_{S\alpha}),$$

$$Js\omega_m = M - M_H,$$

где  $\bar{T}'_S = \frac{L'_S}{r}$ .

Структурная схема АКЗ представлена на рис. 5.7.

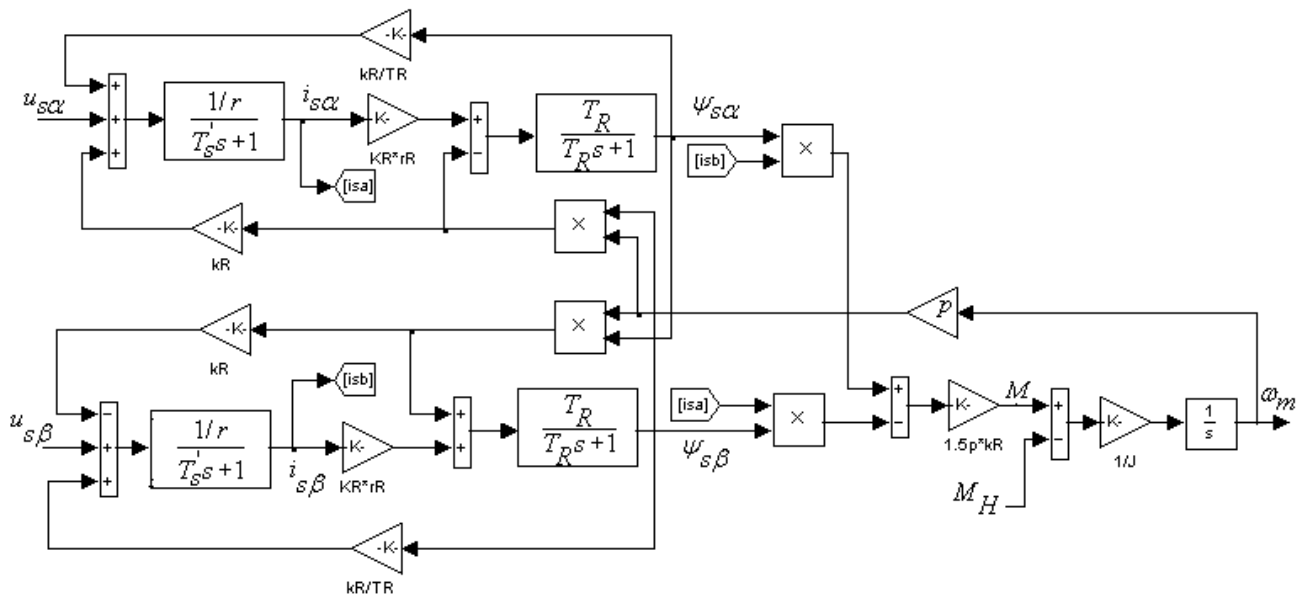


Рис. 5.7. Структурная схема АКЗ в неподвижной системе координат

Математическое описание АКЗ, рассмотренное выше, справедливо для случая питания машины от источника напряжения. Таким источником может быть сеть или автономный инвертор напряжения, который в замкнутых системах выполняет функцию силового регулятора. Также как в системах постоянного тока силовой регулятор в системах переменного тока может быть охвачен релейной обратной связью. В этом случае силовой регулятор представляет из себя источник тока.

При реализации в системе релейных токовых контуров АКЗ управляется от источника тока, переменными режима в этом случае становятся токи статора и уравнения принимают вид:

$$k_R R_R i_{Sx} = \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \Psi_{Ry},$$

$$k_R R_R i_{Sy} = \frac{1}{T_R} \Psi_{Ry} + s \Psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \Psi_{Rx}, \quad (5.39)$$

$$m = 1,5 p k_R (\Psi_{Rx} i_{Sy} - \Psi_{Ry} i_{Sx}),$$

$$J s \omega_m = M - M_H.$$

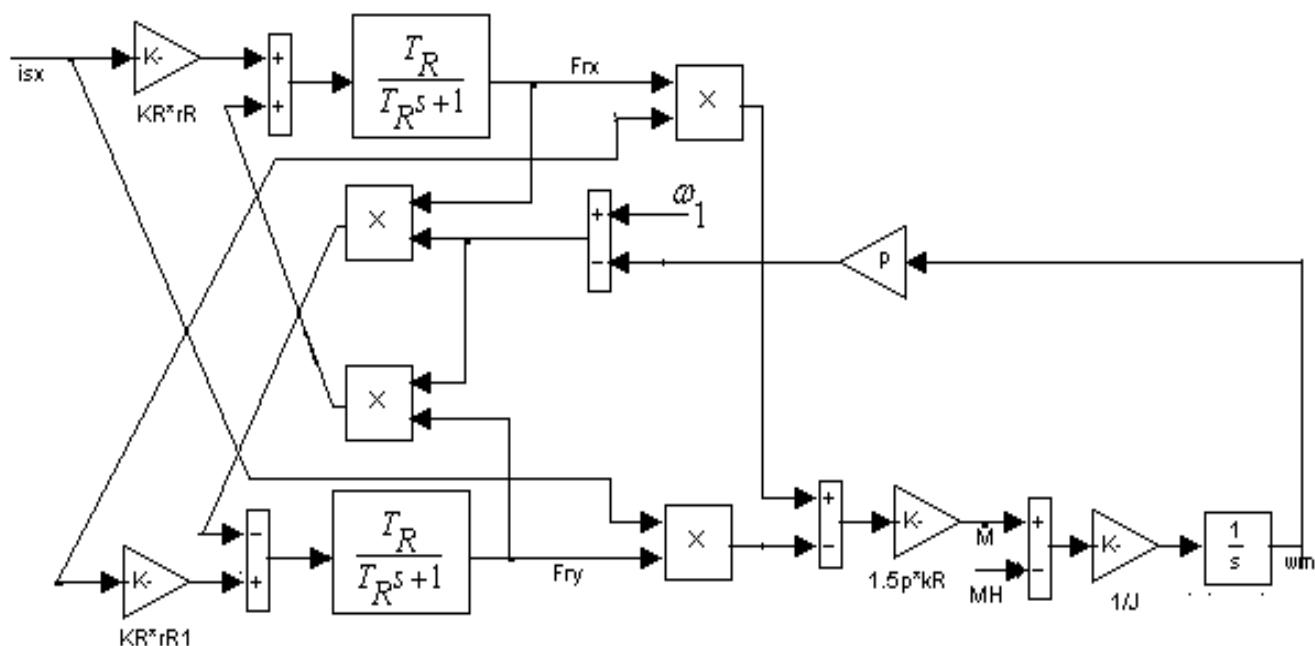


Рис. 5.8. Структурная схема АКЗ при питании от источника тока с базовым вектором тока статора

Если в качестве базового вектора принять вектор тока статора  $\bar{i}_S$  и совместить его с осью  $x$  системы координат, то система уравнений (5.39) переписывается в виде:

$$\begin{aligned} k_R R_R i_{Sx} &= \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \Psi_{Ry}, \\ 0 &= \frac{1}{T_R} \Psi_{Ry} + s \Psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \Psi_{Rx}, \\ m &= 1,5 p k_R (\Psi_{Rx} i_{Sy} - \Psi_{Ry} i_{Sx}), \\ J s \omega_m &= M - M_H. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Структурная схема АКЗ приведена на рис. 5.8.

### 5.3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКЗ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Если за базовый вектор принять вектор потокосцепления ротора и совместить вектор  $\bar{\Psi}_R$  с осью  $x$  вращающейся системы координат, то в уравнениях следует принять  $\Psi_{Ry} = 0$ .

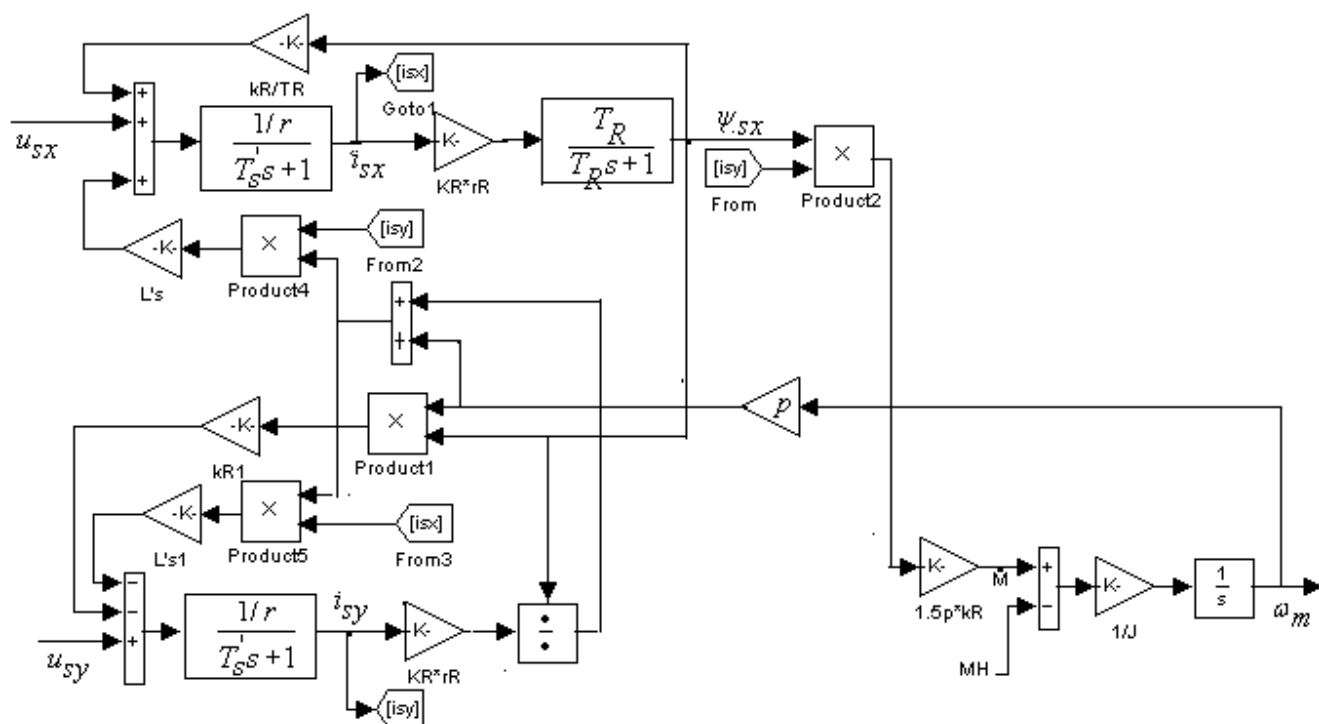
Тогда при питании статорных обмоток от источника напряжения получим:

$$\begin{aligned} u_{Sx} &= r(1 + T'_S s) i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Rx}, \\ u_{Sy} &= r(1 + T'_S s) i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} + k_R p \omega_m \Psi_{Rx}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \Psi_{Rx}, \\ M &= 1,5 p k_R \Psi_{Rx} i_{Sy}, \\ J s \omega_m &= M - M_H. \end{aligned} \quad (5.41)$$

Существенной особенностью этой математической модели является то обстоятельство, что угловая скорость вращения системы координат зависит от значений переменных состояния машины и определяется из четвертого уравнения системы (5.41)

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{Sy}}{\Psi_{Rx}} + p\omega_m. \quad (5.42)$$

Структурная схема АКЗ во вращающейся системе координат совмещенной с потокоцеплением ротора и управлением от источников напряжения показана на рис. 5.9.



**Рис. 5.9. Структурная схема АКЗ во вращающейся системе координат при питании от источника напряжения с базовым вектором потокоцепления ротора**

При питании статорных обмоток от источников тока уравнения (5.35) преобразуются к виду:

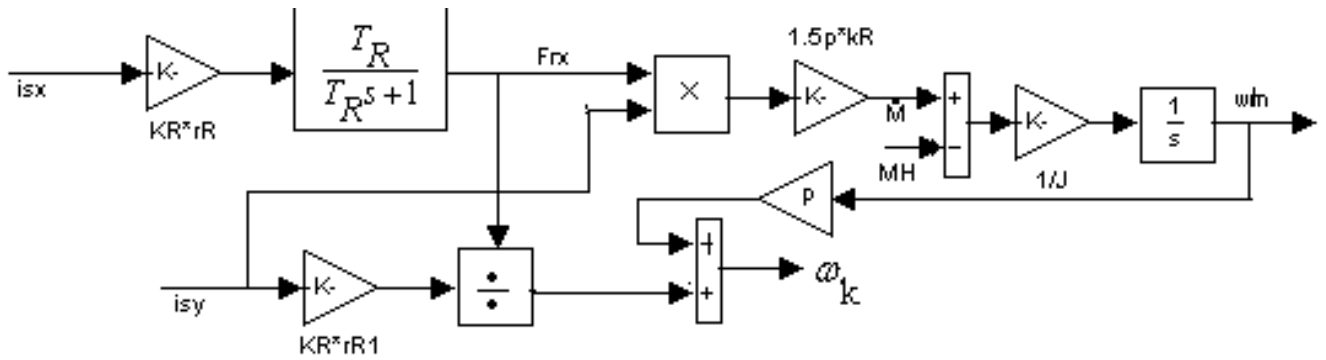
$$k_R R_R i_{Sx} = \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx} + s \Psi_{Rx},$$

$$k_R R_R i_{Sy} = (\omega_k - p\omega_m) \Psi_{Rx}, \quad (5.43)$$

$$M = 1,5 p k_R \Psi_{Rx} i_{Sy},$$

$$J s \omega_m = M - M_H.$$

Структура АКЗ во вращающейся системе координат совмещенной с потокоцеплением ротора и управлением от источников тока показана на рис. 5.10.



**Рис. 5.10. Структурная схема АКЗ во вращающейся системе координат при питании от источника тока с базовым вектором потокосцепления ротора**

Можно заметить, что при постоянном сигнале  $i_{Sx}$  электромагнитный момент машины определится только составляющей тока статора  $i_{Sy}$ . В этом случае структура АКЗ повторяет структуру двигателя постоянного тока при управлении по цепи якоря.

Математическое описание АКЗ во вращающейся системе координат совмещенной с потокосцеплением ротора, как при питании АКЗ от источника напряжения), так и при питании АКЗ от источника тока), является основой для синтеза асинхронных систем с векторным управлением.

#### 5.3.4. АСИНХРОННЫЕ СИСТЕМЫ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Асинхронные системы с частотным управлением строятся как разомкнутые, поддерживающие определенное соотношение между частотой и напряжением, так и замкнутые. В разомкнутых системах выбор соотношения между частотой и напряжением зависит от момента нагрузки и определяется из условий сохранения перегрузочной способности.

$$\lambda = \frac{M_k}{M_H} = \text{const}, \quad (5.44)$$

где  $M_k$  – критический момент АКЗ;  $M_H$  – момент нагрузки на валу машины.

Закон изменения напряжения и частоты, удовлетворяющий требованию (5.44) при допущении  $R_S = 0$  установлен М. П. Костенко.



Математически этот закон описывается уравнением:

$$\frac{U_S}{U_{\text{НОМ}}} = \frac{\omega_k}{\omega_1} \sqrt{\frac{M_H}{M_{\text{НОМ}}}}, \quad (5.45)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$ ,  $\omega_1$ ,  $M_{\text{НОМ}}$  – номинальные значения напряжения, угловой частоты и момента машины.

Если закон изменения момента нагрузки заранее известен, то можно определить требуемые соотношения напряжения и частоты. Рассмотрим три классических вида нагрузок на валу машины:

$$M_H = \text{const}, \quad P_H = M_H \omega_m = \text{const}, \quad M_H = k \omega_m^2. \quad (5.46)$$

Этим нагрузкам соответствуют следующие соотношения между напряжением и частотой:

$$\left( \frac{U_S}{\omega_k} = \text{const} \right), \quad \left( \frac{U_S}{\sqrt{\omega_k}} = \text{const} \right), \quad \left( \frac{U_S}{\omega_k^2} = \text{const} \right). \quad (5.47)$$

Механические характеристики АКЗ при регулировании напряжения и частоты для различных зависимостей момента от скорости приведены на рис. 5.11.

Простейшим из перечисленных законов является закон  $\frac{\bar{U}_S}{\omega_k} = \text{const}$ . Этот закон при использовании инвертора с синусоидальной ШИМ реализован практически во всех полупроводниковых преобразователях, которые выпускаются многочисленными фирмами и предлагаются на рынке.

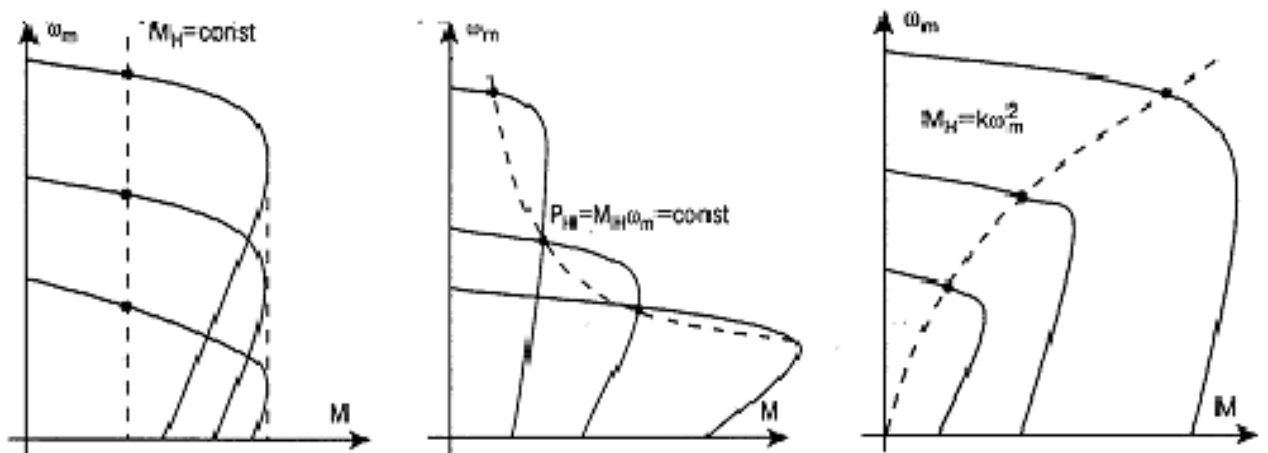


Рис. 5.11. Механические характеристики разомкнутых асинхронных электроприводов с частотным управлением

Удобство этого закона заключается в том, что электропривод может работать без отрицательной обратной связи по скорости и обладать естественной жесткостью механических характеристик в ограниченном диапазоне регулирования скорости.

В имеющихся на рынке преобразователях часто предусматривается возможность перестройки с целью обеспечения всех трех законов.

Реализация рассмотренных законов показана на рис. 5.12. Функциональный преобразователь (ФП) реализует одну из зависимостей, определяемую характером нагрузки. Полупроводниковый преобразователь (ПП) включает в себя автономный инвертор и его систему управления, задатчик интенсивности (ЗИ) формирует медленно нарастающий входной сигнал. В этом случае нарастание скорости не будет сопровождаться интенсивными колебаниями момента и скорости, которые наблюдаются при прямом пуске.

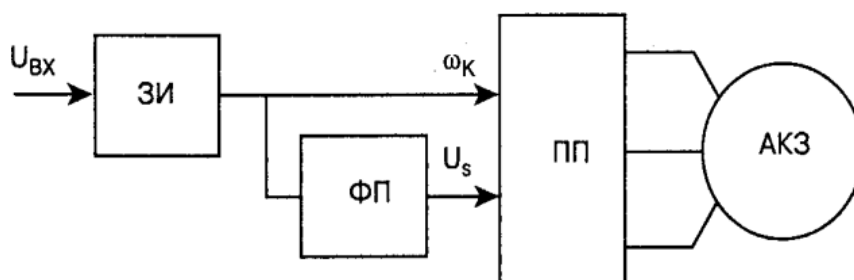


Рис. 5.12. Функциональная схема асинхронной системы с частотным управлением

Частотные способы управления АКЗ в замкнутых системах используются в основном тогда, когда заранее неизвестен характер изменения нагрузки и одновременно к системе не предъявляется жестких требований по динамике.

Аналізу различных способов частотного управления в асинхронных системах посвящено значительное количество работ.

Частотные способы управления обеспечивают достижение требуемых статических, в основном энергетических, характеристик и используются в системах со «спокойной» нагрузкой. На входе этих систем включаются задатчики интенсивности, которые ограничивают скорость нарастания (убывания) входного сигнала до такой величины, при которой электромеханические процессы в системе

можно считать установившимися, т.е. в уравнении (5.36) можно пренебречь слагаемым  $J \frac{d\omega}{dt}$ ,  $\left( J \frac{d\omega}{dt} \ll M_H \right)$ .

Все законы частотного управления базируются на математическом описании асинхронной машины в установившемся режиме работы во вращающейся системе координат.

В этом случае  $\omega_m = \text{const}$ ,  $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ ,  $M = M_H$ , все пространственные векторы неподвижны в пространстве и неизменны по величине:  $\bar{u}_S = \bar{U}_S = \text{const}$ ,  $\bar{i}_S = \bar{I}_S = \text{const}$ ,  $\bar{i}_R = \bar{I}_R = \text{const}$ ,  $\bar{\psi}_S = \bar{\Psi}_S = \text{const}$ ,  $\bar{\psi}_R = \bar{\Psi}_R = \text{const}$ , поэтому производные от потокосцеплений также равны нулю, после преобразования примут вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \bar{I}_S + j\omega_k \bar{\Psi}_S = R_S \bar{I}_S + jX_{S\sigma} \bar{I}_S + j\omega_k \bar{\Psi}_m, \\ 0 &= \frac{R_R}{\beta_k} \bar{I}_R + j\omega_k \bar{\Psi}_R = \frac{R_R}{\beta_k} \bar{I}_R + jX_{R\sigma} \bar{I}_R + j\omega_k \bar{\Psi}_m, \end{aligned} \quad (5.48)$$

где  $\bar{\Psi}_m = L_m (\bar{I}_S + \bar{I}_R)$  – потокосцепление взаимоиндукции;  $\beta_k = \frac{\omega_k - p\omega_m}{\omega_k}$  – скольжение;  $X_{S\sigma} = \omega_k L_{S\sigma} = \omega_k (L_S - L_m)$ ,  $X_{R\sigma} = \omega_k (L_R - L_m)$  – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора.

Схема замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя в установившемся режиме приведена на рис. 5.13. С использованием этой схемы замещения можно показать основные законы частотного управления машиной в замкнутых асинхронных системах. Этим законам четыре:

$$1. \frac{U_S}{\omega_k} = \text{const.} \quad 2. \frac{E_S}{\omega_k} = \Psi_S = \text{const.} \quad 3. \frac{E_m}{\omega_k} = \Psi_m = \text{const.} \quad 4. \frac{E_R}{\omega_k} = \Psi_R = \text{const.}$$

Выражения момента для перечисленных законов управления находятся из схемы замещения:

$$1. M = \frac{\left( \frac{U_S}{\omega_k} \right)^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{S\sigma} + X_{R\sigma})^2 + \left( R_S + \frac{R_R}{\beta_k} \right)^2}; \quad (5.49)$$

$$2. M = \frac{\Psi_S^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{S\sigma} + X_{R\sigma})^2 + \left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2}; \quad (5.50)$$

$$3. M = \frac{\Psi_m^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{R\sigma})^2 + \left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2}; \quad (5.51)$$

$$4. M = \frac{\Psi_R^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{\left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2}. \quad (5.52)$$

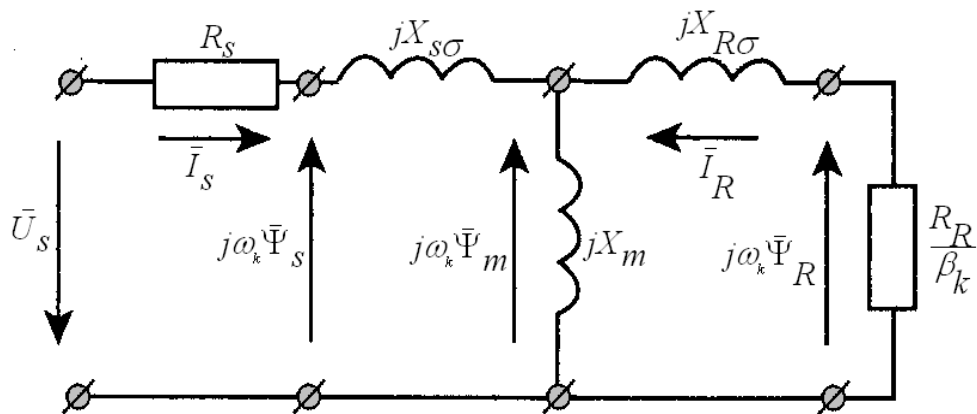


Рис. 5.13. Схема замещения АКЗ в установившемся режиме

На рисунке 5.14 приведены механические характеристики замкнутой асинхронной системы для всех четырех законов управления. Следует отметить, что перечисленные законы управления широко использовались и хорошо себя зарекомендовали в системах, где не требуется быстродействия по управлению и нет резких изменений момента нагрузки.

Реализация постоянства потокосцепления требует применение отрицательной обратной связи по соответствующей э.д.с. Функциональная схема таких систем показана на рис. 5.15.

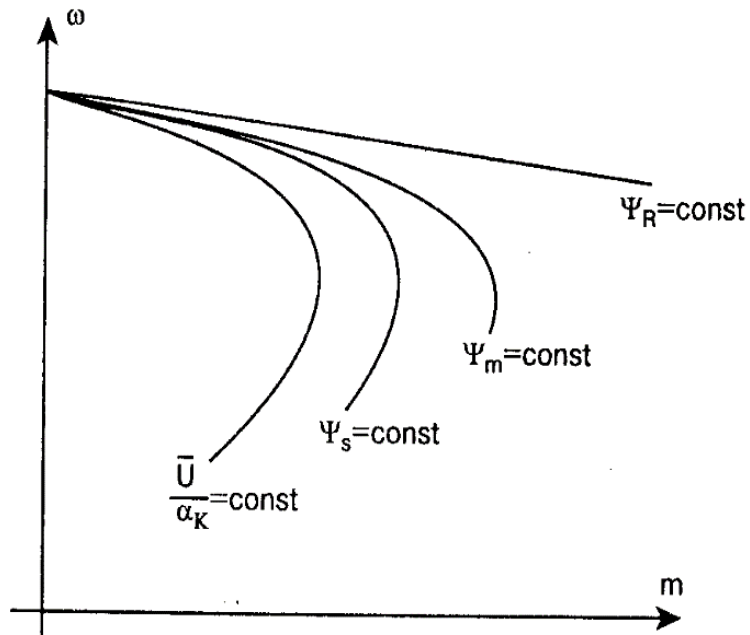


Рис. 5.14. Механические характеристики АКЗ при различных законах управления

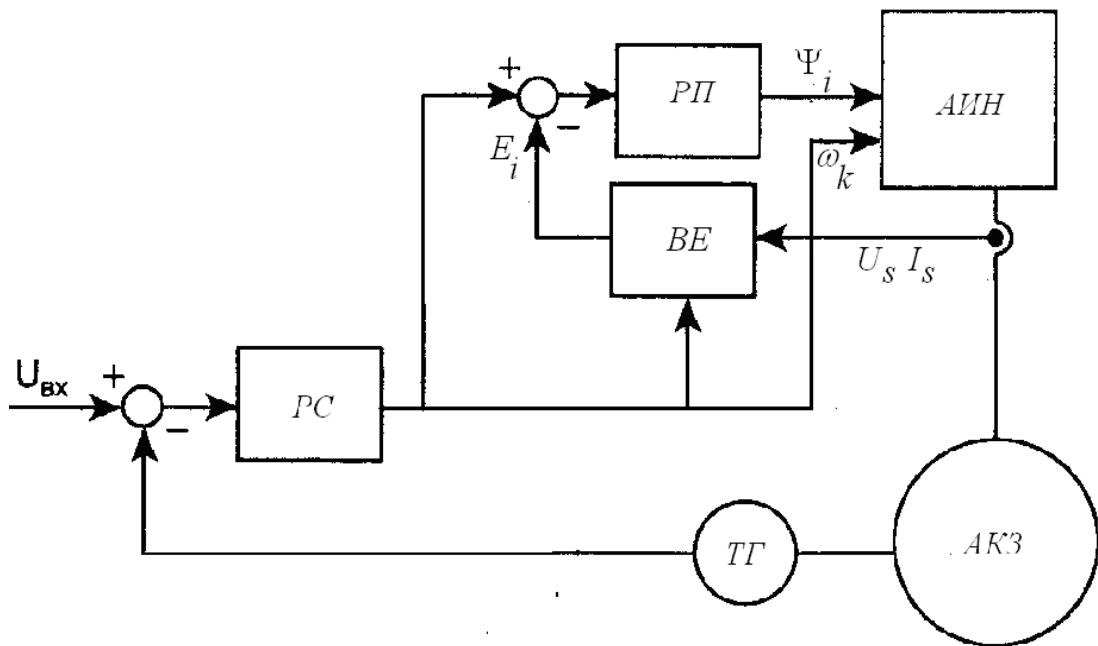


Рис. 5.15. Схема замкнутой асинхронной системы

Вычислитель э.д.с. (BE) реализует одну из следующих зависимостей:

$$\begin{aligned}
 E_S &= U_S - R_S I_S; \\
 E_m &= U_S - I_S \sqrt{R_S^2 + (\omega_k L_{S\sigma})^2}; \\
 E_R &= U_S - I_S \sqrt{R_S^2 + [\omega_k (L_{S\sigma} + L_{R\sigma})]^2}.
 \end{aligned}
 \tag{5.53}$$

### 5.3.5. АСИНХРОННЫЕ СИСТЕМЫ С ЧАСТОТНО-ТОКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрим один из возможных частотно-токовый способ управления системой с  $\psi_R = \text{const}$ , который используется при управлении АКЗ от источника тока. Из схемы замещения (рис. 5.13) не трудно определить значение тока статора

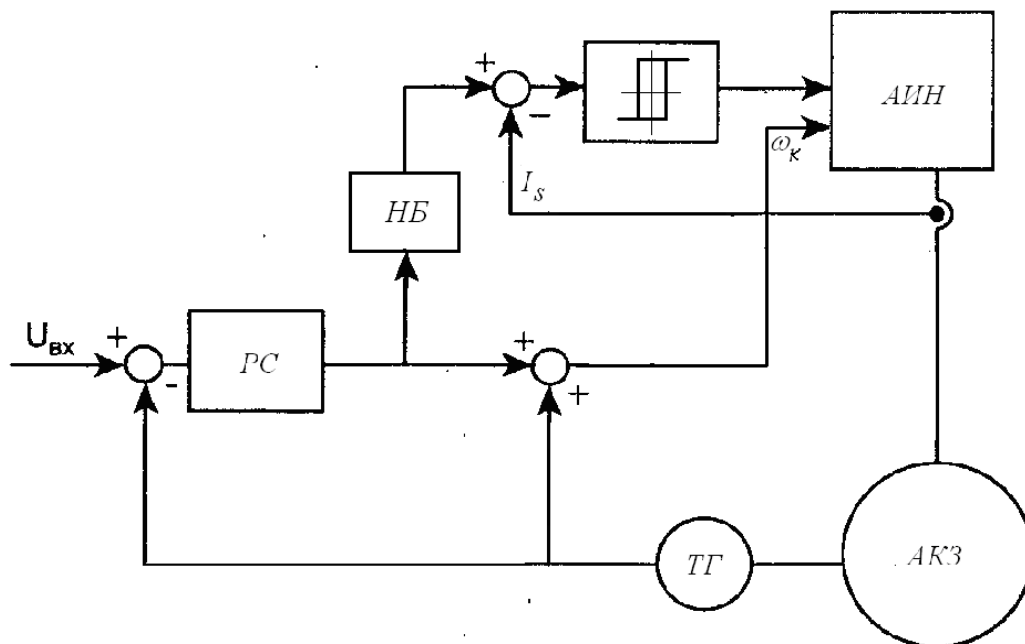
$$\bar{I}_S = \frac{j\omega_k \bar{\Psi}_R}{x_m} (1 + j\beta_k \omega_k T_R), \quad (5.54)$$

откуда можно найти зависимость между скалярными значениями тока статора по токосцеплению ротора и абсолютным скольжением

$$I_S = \frac{\Psi_R}{L_m} \sqrt{1 + (\alpha_k T_R)^2}, \quad (5.55)$$

где  $\alpha_k = \frac{\omega_k - p\omega}{\omega_k} \omega_k = \omega_k - p\omega_m$  – абсолютное скольжение. Функциональная

схема такой системы приведена на рис. 5.16.



**Рис. 5.16. Функциональная схема асинхронной системы  
с частотно-токовым управлением**



В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило,  $T_R \gg T_s$ , поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}$ , тогда для реализации в этом канале оптимума по модулю коэффициент усиления регулятора рассчитывается из условия:

$$k_{p\psi} = \frac{r}{2T'_s k_R R_R k_{oc.\psi}}. \quad (5.56)$$

Рассчитанный таким образом ПИ-регулятор компенсирует перекрестные связи в канале  $x$ .

Для компенсации влияния перекрестных связей в канале  $y$  следует также выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_s s + 1)}{T'_s s}$ .

Тогда передаточная функция замкнутого токового контура в канале  $y$  будет равна:

$$W_i(s) = \frac{1}{k_{oc.i}} \frac{1}{\frac{T'_s r}{k_{pi} k_{oc.i}} s + 1} \approx \frac{1}{k_{oc.i}} \text{ при } k_{pi} \gg 1. \quad (5.57)$$

При компенсированных перекрестных связях канал  $y$ , отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока. Для придания этой системе астатизма по скорости необходимо выбрать ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega} s + 1)}{T_{p\omega} s}. \quad (5.58)$$

Тогда передаточная функция системы по возмущению будет равна

$$W'(s) = \frac{-k_{oc.i}}{1,5 p k_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{\frac{T_{p\omega} J k_{oc.i}}{k_{oc.\omega} k_{p\omega}} s^2 + T_{p\omega} s + 1} \approx \frac{-k_{oc.i}}{1,5 p k_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{T_{p\omega} s + 1} \text{ при } k_{p\omega} \gg 1. \quad (5.59)$$



Провал скорости при приложении момента определится из выражения:

$$\Delta\omega_m = \frac{-k_{oc.i}}{1,5pk_Rk_{oc.\omega}k_{p\omega}} \Delta M_H, \quad (5.60)$$

что может быть определяющим в выборе коэффициента усиления регулятора скорости.

### 5.3.7. ЧАСТОТНО-ТОКОВАЯ АСИНХРОННАЯ СИСТЕМА С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Реализация режима источника тока в автономном инверторе осуществляется, как это было описано выше, введением релейных элементов, на вход которых подается разность управляющего сигнала и сигнала с датчика реального тока двигателя. Структурная схема замкнутой частотно-токовой системы с векторным управлением, которая управляется от инвертора тока, показана на рис. 5.18 (серым цветом выделены каналы обратных связей). Следует подчеркнуть, что выходная частота инвертора формируется в зависимости от значения переменных состояния системы  $i_{Sy}$ ,  $pV$ ,  $\Psi_{Rx}$ .

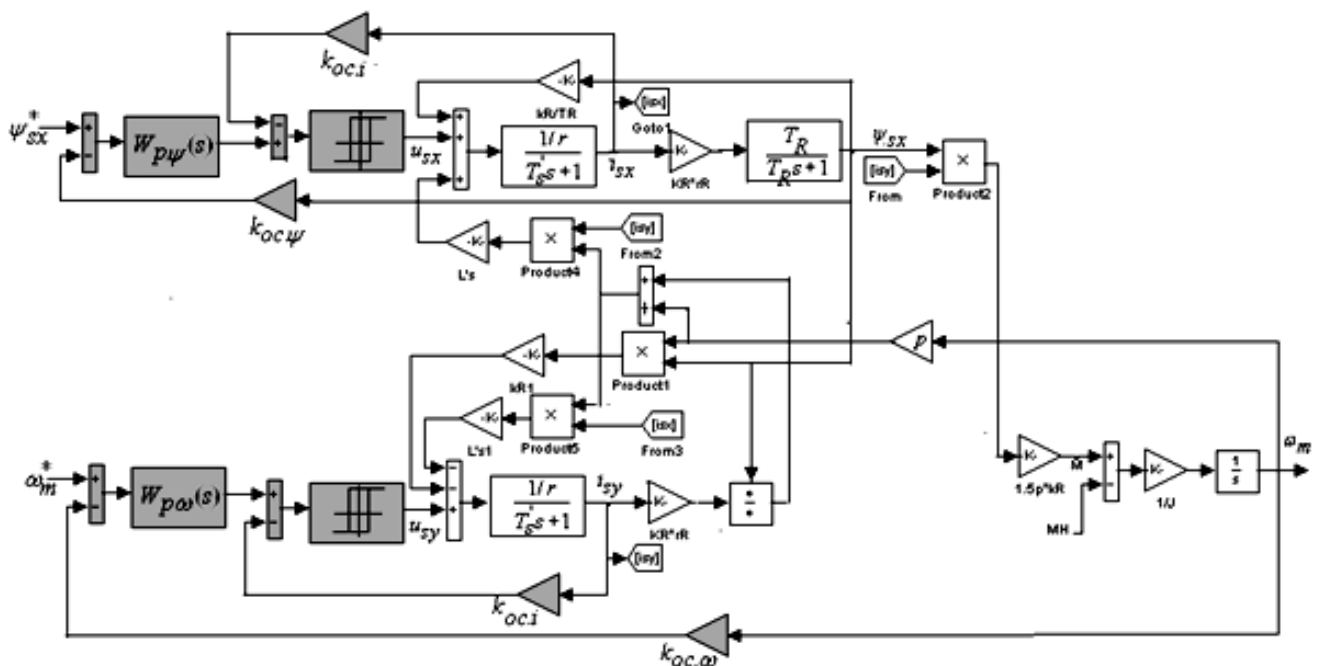


Рис. 5.18. Структурная схема замкнутой асинхронной частотно-токовой системы с векторным управлением

В системе имеются два канала, один определяет поток в машине, другой – момент. Синтез регуляторов при построении подчиненной системы в каждом канале осуществим в соответствии с положениями, изложенными ранее. В канале потока выбран П-регулятор, в канале скорости выбран ПИ-регулятор.

Коэффициенты передач регуляторов выбираем так, чтобы постоянная времени в канале управления потоком была бы по крайней мере на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью.

#### **5.4. ОДНОФАЗНЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И УСТРОЙСТВА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ**

Синхронные реактивные двигатели имеют явнополюсный ротор из магнитно-мягкого материала с впадинами, или секционированный, благодаря чему его магнитное сопротивление в радиальных направлениях различно. Ротор со впадинами состоит из штампованных листов электротехнической стали и имеет короткозамкнутую пусковую обмотку. Встречаются роторы из сплошного ферромагнитного материала с аналогичными впадинами. Ротор секционированный состоит из листов электротехнической стали, залитых алюминием или другим диамагнитным материалом, выполняющим роль коротко-замкнутой обмотки.

При включении обмотки статора возбуждается вращающееся магнитное поле и происходит асинхронный пуск двигателя. По завершении разгона ротора до подсинхронной скорости он под действием реактивного вращающего момента, обусловленного различием магнитных сопротивлений в радиальных направлениях, входит в синхронизм и располагается относительно вращающегося магнитного поля статора так, чтобы его магнитное сопротивление для этого поля было наименьшим.

Обычно синхронные реактивные двигатели изготавливают номинальной мощностью до 100 Вт, а иногда и выше, если простоте конструкции и повышенной надежности придают особое значение. При одинаковых габаритах номинальная мощность синхронных реактивных двигателей в 2–3 раза меньше номинальной мощности синхронных двигателей с постоянными магнитами, но по конструкции они проще, отличаются меньшей стоимостью, номинальный коэффициент мощности их не превышает 0,5, а номинальный КПД составляет до 0,35 – 0,40.

Синхронные гистерезисные двигатели имеют ротор из магнитотвердого сплава с широкой петлей гистерезиса. С целью экономии этого дорогостоящего материала ротор выполняют сборной конструкции, при которой вал крепится на втулке из ферро- или диамагнитного материала, а на ней укрепляют сплошной или собранный из пластин полый цилиндр, затянутый запорным кольцом. Использование магнитно-твердого сплава для изготовления ротора приводит к тому, что в работающем двигателе волны распределения магнитной индукции по поверхностям статора и ротора смещены друг относительно друга на некоторый угол, называемый углом гистерезиса, что обуславливает возникновение гистерезисного вращающего момента, направленного в сторону вращения ротора.

Различие между синхронными двигателями с постоянными магнитами и синхронными гистерезисными двигателями состоит в том, что у первых ротор при изготовлении машин подвергается предварительному намагничиванию в сильном импульсном магнитном поле, а у вторых он намагничивается вращающимся магнитным полем статора.

При пуске синхронного гистерезисного двигателя помимо основного гистерезисного вращающего момента в машинах со сплошным ротором возникает еще асинхронный вращающий момент, обусловленный вихревыми токами в магнитопроводе ротора, что способствует разгону ротора, вхождению его в синхронизм и дальнейшую работу с синхронной скоростью при постоянном сдвиге ротора относительно вращающегося магнитного поля статора на угол, определяемый нагрузкой на валу машины.

Синхронные гистерезисные двигатели эксплуатируют как в синхронном режиме, так и в асинхронном, но в последнем случае при малом скольжении. Синхронные гистерезисные двигатели отличаются большим начальным пусковым моментом, плавностью входа в синхронизм, незначительным изменением тока в пределах 20 – 30% при переходе от холостого хода к режиму короткого замыкания.

Эти двигатели имеют лучшие показатели, чем синхронные реактивные, отличаются простотой конструкции, надежностью и бесшумностью в работе, малыми габаритами и незначительной массой.

Отсутствие короткозамкнутой обмотки приводит к качаниям ротора при переменной нагрузке, что обуславливает определенную неравномерность его вращения, ограничивающую область применения машин, которые изготавливают номинальной мощностью до 400 Вт на промышленную и повышенные частоты как одно-, так и двухскоростные.

Номинальный коэффициент мощности синхронных гистерезисных двигателей не превышает 0,5, а номинальный КПД достигает значения 0,65.

Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели имеют явнополюсный статор с обмоткой, расположенной на магнитопроводе, собранном из двух симметричных пакетов листов электротехнической стали со стыком внутри каркаса обмотки. Магнитопровод имеет два полюса, разрезанных продольным пазом на равные части, причем на одной из них на каждом полюсе находятся короткозамкнутые витки. Между этими расщепленными полюсами находится ротор, составленный из нескольких тонких колец с перемычками из закаленной магнитно-твердой стали, насаженных на валик, соединенный с редуктором, снижающим частоту вращения выходного вала до нескольких сотых долей или нескольких десятков оборотов в минуту.

При включении обмотки статора, благодаря короткозамкнутым виткам, создается сдвиг по фазе во времени между магнитными потоками неэкранированной и экранированной частей полюсов, что приводит к возбуждению результирующего вращающегося магнитного поля. Это поле, взаимодействуя с ротором, способствует возникновению асинхронного и гистерезисного вращающихся моментов, вызывающих разгон ротора, который по достижении подсинхронной скорости под влиянием реактивного и гистерезисного вращающихся моментов входит в синхронизм и вращается в направлении, от неэкранированной части полюса к его экранированной части, где расположены короткозамкнутые витки.

У реверсивных двигателей вместо короткозамкнутых витков применяют четыре катушки, которые располагают на обеих частях каждого расщепленного полюса, и для принятого направления вращения ротора замыкают соответствующую пару катушек накоротко.

Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели имеют относительно большие габариты и массу, номинальная мощность их не превышает 12 кВт, ра-

ботают они при очень низком коэффициенте мощности, а номинальный КПД их не превышает 0,01.

Большинство синхронных электродвигателей малой мощности отличается от машин нормального исполнения только конструкцией ротора, который, как правило, не имеет обмотки возбуждения, контактных колец и прижимающихся к ним щеток.

Для возникновения вращающего момента ротор выполняют из магнитно-твердого сплава с последующим однократным намагничиванием его в сильном импульсном магнитном поле, в результате чего в дальнейшем полюсы сохраняют остаточную намагниченность.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют цилиндрический явнополюсный ротор из магнитно-твердого сплава и короткозамкнутую пусковую обмотку.

В момент пуска синхронный двигатель работает как асинхронный и его начальный вращающий момент создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с наведенными им токами в короткозамкнутой обмотке ротора. Поскольку двигатель пускается в ход в возбужденном состоянии, то магнитное поле постоянных магнитов вращающегося ротора наводит в обмотке статора э.д.с. переменной частоты, а это вызывает токи, из-за которых возникает тормозной момент.

Результирующий момент на валу двигателя определяется суммой моментов, обусловленных короткозамкнутой обмоткой и тормозным эффектом, т.е. который зависит от скольжения. В процессе разгона ротора этот момент достигает минимального значения, которое при правильном выборе пусковой обмотки должно быть больше номинального момента.

Когда скорость приблизится к синхронной, ротор, в результате взаимодействия поля постоянных магнитов с вращающимся магнитным полем статора втягивается в синхронизм и далее вращается с синхронной скоростью.

Рабочие характеристики синхронного двигателя с постоянными магнитами мало отличаются от аналогичных характеристик синхронного двигателя с обмоткой возбуждения ротора.

В мехатронных системах с синхронными двигателями широкое применение нашли магнитоэлектрические синхронные машины.

На базе этих машин строятся подсистемы, которые сокращенно называются вентильными двигателями (ВД) и бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ).

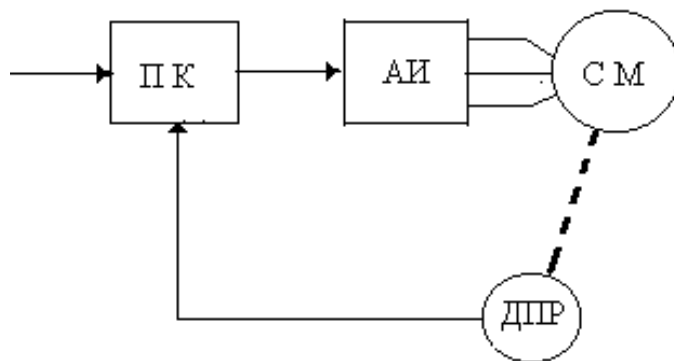


Рис. 5.19. Функциональная модель ВД

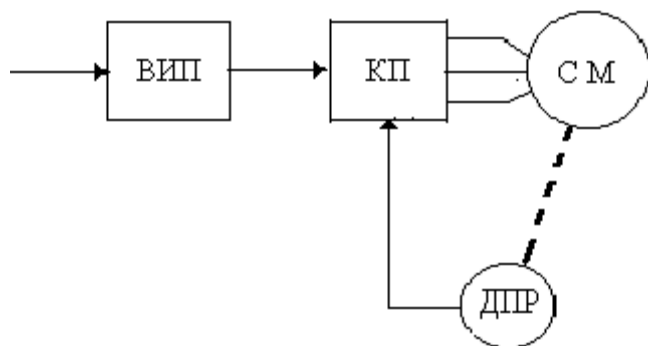
*Вентильные двигатели* (рис. 5.19) – это устройства, в которых магнитоэлектрическая синхронная машина с *синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре* включена в замкнутую систему с использованием датчика положения ротора (ДПР), преобразователя координат (ПК) и автономного инвертора (АИ). Форма магнитного поля в зазоре обуславливает способ формирования напряжения (тока) на выходе АИ. В ВД на выходе инвертора необходимо формировать синусоидальный ток, что достигается за счет синусоидальной широтно-импульсной модуляции в инверторе.

Отмеченная модуляция реализуется в ПК при этом амплитуда модулирующего сигнала определяется сигналом на входе ПК, а мгновенная фаза – углом поворота ротора (сигналом с ДПР). Таким образом, регулирование скорости ВД осуществляется за счет изменения входного сигнала.

Датчики положения ротора можно поделить на две группы: безинерционные и инерционные. К первой группе относятся импульсные и цифровые ДПР. Ко второй – ДПР, выполненные на вращающихся трансформаторах или индукционных релюксоинах.

Важно подчеркнуть, что статические и динамические характеристики ВД зависят от свойств каждого блока, входящего в его состав.

*Бесконтактные двигатели постоянного тока* (рис. 5.20) – это устройства, в которых магнитоэлектрическая синхронная машина с *трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре* включена в замкнутую систему с использованием датчика положения ротора (ДПР) и полупроводникового коммутатора (КП).



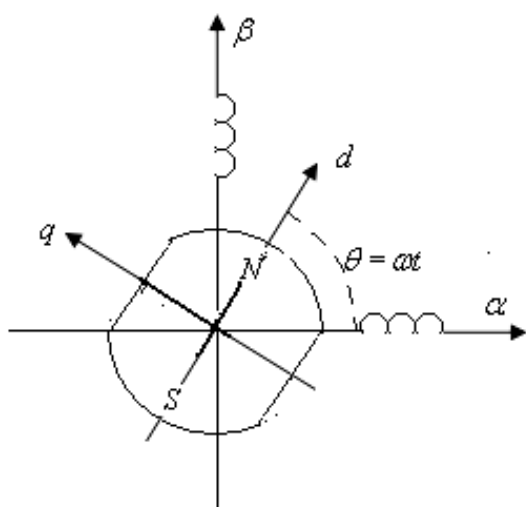
**Рис. 5.20. Функциональная модель БДПТ**

равно числу фаз статора двигателя.

Регулирование скорости в БДПТ осуществляется за счет изменения напряжения питания полупроводникового коммутатора.

В данном разделе первостепенное внимание уделяется вентильным двигателям и системам, построенным на их основе. При математическом описании бесконтактного двигателя постоянного тока обычно используют модель двигателя постоянного тока. При этом вопросы проектирования систем с БДПТ ничем не отличаются от проектирования систем постоянного тока.

В вентильных двигателях при определенных условиях проявляются свойства существенно отличные от свойств двигателей постоянного тока. Поэтому вопросы проектирования систем с ВД требуют подробного рассмотрения.



**Рис. 5.21. Обобщенная магнитоэлектрическая синхронная машина**

#### 5.4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ С БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ КАНАЛОМ ДПР–ПК

Обобщенная магнитоэлектрическая синхронная машина показана на рис. 5.21. Она содержит две обмотки на статоре, обозначенные  $\alpha$ ,  $\beta$  и явнополюсный ротор в виде постоянного магнита, поле которого направлено по оси  $d$ .

Уравнения равновесия э.д.с. в обмотках статора и моментов на валу записываются в виде:

$$U_{\alpha} = Ri_{\alpha} + \frac{d\psi_{\alpha}}{dt};$$

$$U_{\beta} = Ri_{\beta} + \frac{d\psi_{\beta}}{dt}; \quad (5.61)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H,$$

где  $U_{\alpha}$ ,  $U_{\beta}$ ,  $i_{\alpha}$ ,  $i_{\beta}$  – проекции мгновенных значений напряжения и тока статора на оси;  $R$  – сопротивления статорной обмотки;  $\omega_m$ ,  $M$ ,  $M_H$ ,  $\theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала;  $J$  – момент инерции ротора.

В уравнениях (5.61) потокосцепления по неподвижным осям  $\alpha$ ,  $\beta$  находятся из выражений:

$$\psi_{\alpha} = L_{\alpha}i_{\alpha} + L_{\alpha\beta}i_{\beta} + \psi_{0\alpha} = L_{\alpha}i_{\alpha} + L_{\alpha\beta}i_{\beta} + \Phi_0 \cos\theta; \quad (5.62)$$

$$\psi_{\beta} = L_{\alpha\beta}i_{\alpha} + L_{\beta}i_{\beta} + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta}i_{\alpha} + L_{\beta}i_{\beta} + \Phi_0 \sin\theta,$$

где  $\Phi_0$  – поток, созданный постоянным магнитом ротора на пару полюсов.

Если пренебречь насыщением стали, то выражения для собственных индуктивностей и взаимной индуктивности имеют вид:

$$L_{\alpha} = \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta;$$

$$L_{\beta} = \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta; \quad (5.63)$$

$$L_{\alpha\beta} = \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta,$$

где  $L_d$ ,  $L_q$  – индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной оси.

С учетом уравнений (5.61), (5.62), (5.63) полное описание синхронной магнитоэлектрической машины в неподвижной системе координат запишется в виде:



$$\begin{aligned}
U_{\alpha} &= R_1 i_{\alpha} - (L_d - L_q) \omega \sin 2\theta i_{\alpha} + \left( \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_{\alpha}}{dt} + \\
&\quad + (L_d - L_q) \omega \cos 2\theta i_{\beta} + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \frac{di_{\beta}}{dt} - \Phi_0 \omega \sin \theta; \\
U_{\beta} &= R_1 i_{\beta} + (L_d - L_q) \omega \cos 2\theta i_{\alpha} + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \frac{di_{\alpha}}{dt} + \\
&\quad + (L_d - L_q) \omega \sin 2\theta i_{\beta} + \left( \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_{\beta}}{dt} + \Phi_0 \omega \cos \theta; \\
M &= p \frac{m}{2} \left[ \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta (i_{\beta}^2 - i_{\alpha}^2) + (L_d - L_q) \cos 2\theta i_{\alpha} i_{\beta} + \Phi_0 \cos \theta i_{\beta} - \Phi_0 \sin \theta i_{\alpha} \right]; \\
J = \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H; \quad \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m; \quad \omega = p\omega_m; \quad \theta = p\theta_m, \tag{5.64}
\end{aligned}$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $m$  – число фаз в машине.

Уравнения (5.64) описывают синхронную магнитоэлектрическую машину с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре. Для того, чтобы из этих уравнений получить уравнения ВД, необходимо связать напряжения на статоре ВД с углом поворота ротора, который определяется сигналом с ДПР.

В этом случае напряжения  $U_{\alpha}$ ,  $U_{\beta}$  должны зависеть от начальной установки датчика положения ротора и от угла поворота ротора и определяться выражениями:

$$U_{\alpha} = U_1 \cos(\theta + \theta_0); \quad U_{\beta} = U_1 \sin(\theta + \theta_0), \tag{5.65}$$

где  $U_1$  – амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора.

В реверсивных системах, а мехатронные системы, как правило, реверсивные, датчик положения ротора выставляется так, чтобы  $\theta_0 = 90^\circ$ .

#### 5.4.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ С БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ КАНАЛОМ ДПР–ПК

Для упрощения математического описания ВД используется система координат  $d$ – $q$ , жестко связанная с ротором, при этом ось  $d$  совмещается с направлением магнитного поля ротора.

В этом случае операторные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в вентильном двигателе, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_d &= R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q; \\
 U_q &= R(T_q s + 1)i_q + \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega; \\
 M &= p \frac{m}{2} (\Psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q); \\
 s\omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H); \quad s\theta_m = \omega_m; \quad \omega = p\omega_m,
 \end{aligned}
 \tag{5.66}$$

где  $U_d, U_q, i_d, i_q$  – проекции напряжения и тока статора на оси;  $\Psi_0$  – проекция потока сцепления ротора на ось  $d$ ;  $T_d = \frac{L_d}{R}$ ,  $T_q = \frac{L_q}{R}$ ,  $L_d, L_q$  – постоянные времени и индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной осям;  $R$  – сопротивление статорной обмотки;  $\omega_m, M, M_H, \theta_m$  – механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала;  $J$  – момент инерции ротора.

Структурная схема ВД, составленная по уравнениям (5.66), приведена на рис. 5.22 (серым цветом выделен канал ДПР–ПК).

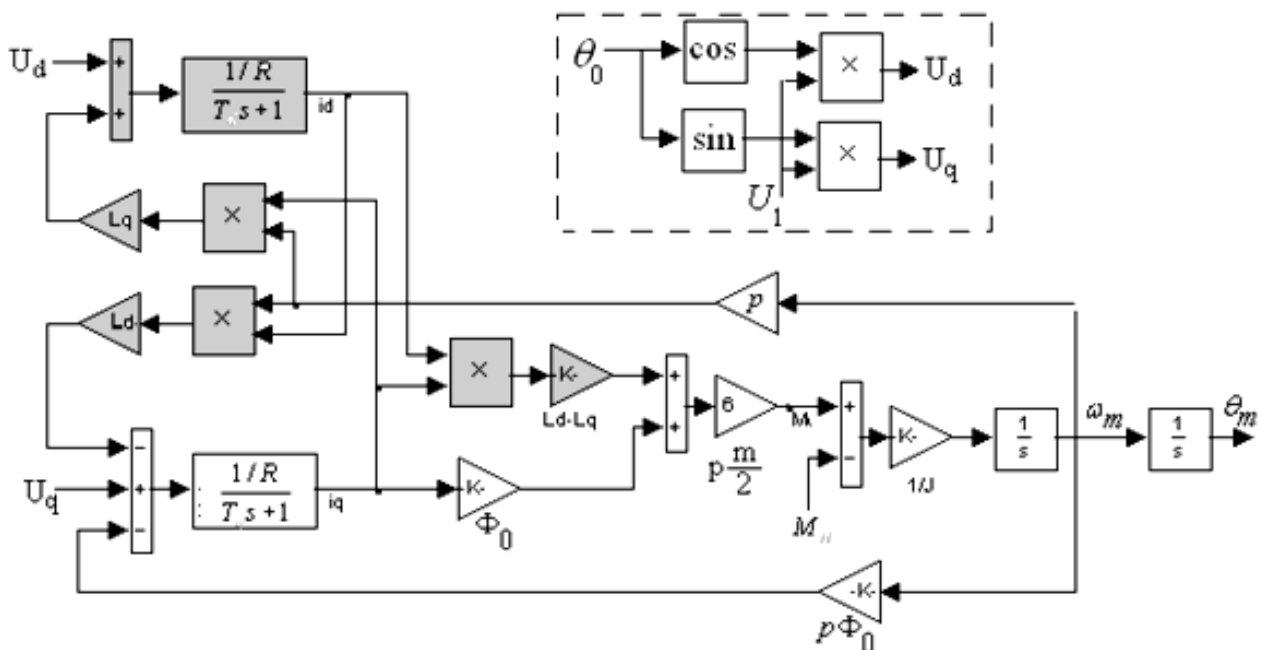


Рис. 5.22. Структурная схема ВД

Напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  можно задавать независимо друг от друга, а можно их значения увязать с начальной установкой датчика положения ротора  $\theta_0$ , как это показано в пунктирной рамке на рис. 5.22. В этом случае напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  определяются выражениями:

$$U_d = u_1 K_{cp} \cos \theta_0 = U_1 \cos \theta_0, \quad (5.67)$$

$$U_q = u_1 K_{cp} \sin \theta_0 = U_1 \sin \theta_0.$$

В любом случае в реверсивных системах реализуются соотношения  $U_d = 0$ ,  $U_q = U_1$ .

Структуру ВД с независимым заданием  $U_d$ ,  $U_q$  в дальнейшем будем называть *двухканальной*, структуру ВД, где напряжения  $U_d$ ,  $U_q$  зависят от начальной установки ДПР, в дальнейшем будем называть *одноканальной*.

#### 5.4.3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВД ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

В установившемся режиме момент и ток потребления двигателя определяются из системы (5.66).

$$M = \frac{m}{2} p \Phi_0 \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} + \frac{m}{2} p (T_d - T_q) \frac{\omega T_q (U_1 - \omega \Phi_0)^2}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)^2}; \quad (5.68)$$

$$I_1 = \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} \sqrt{1 + (\omega T_q)^2}. \quad (5.69)$$

Для неявнополюсного двигателя  $T_d = T_q = T$  и из (5.68) и (6.69) легко получить уравнения момента и тока потребления неявнополюсного двигателя.

$$M = \frac{m}{2} p \Phi_0 \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T^2)}; \quad (5.70)$$

$$I_1 = \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T^2)} \sqrt{1 + (\omega T)^2}. \quad (5.71)$$

#### 5.4.4. ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КООРДИНАТ, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ВРАЩАЮЩИХСЯ ТРАНСФОРМАТОРАХ

В качестве датчика положения ротора и преобразователя координат (ДПР-ПК) в системах управления с ВД часто используется вращающийся трансформатор (ВТ), число полюсов которого согласовано с числом полюсов ВД. Вращающийся трансформатор может быть использован как в режиме амплитудной модуляции, так и в режиме фазовой модуляции.

При использовании амплитудной модуляции в ВТ возможны два способа построения преобразователя координат (ПК, рис. 5.23). Модулирующим сигналом модулятора является входной сигнал, а несущим сигналом – высокочастотный сигнал с генератора. К синусной и косинусной обмоткам ВТ подключены демодуляторы, на выходе которых использованы фильтры, выделяющие модулирующий сигнал.

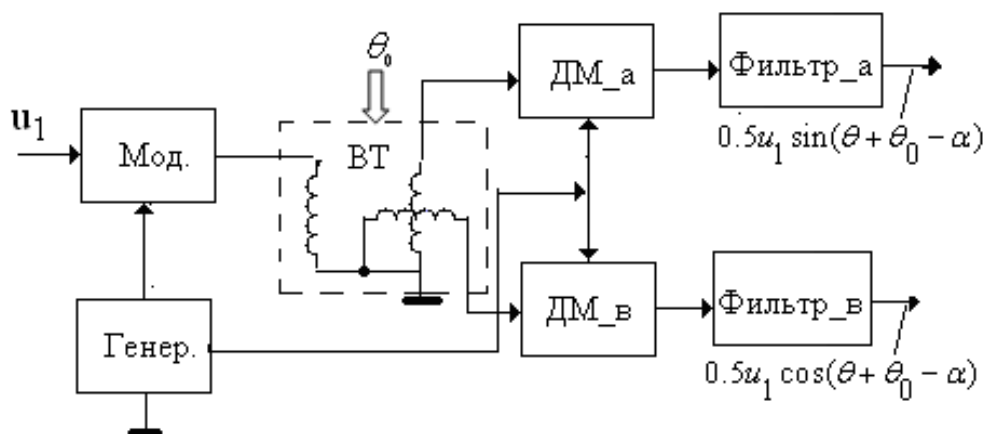


Рис. 5.23. Одноканальная система ДПР-ПК с амплитудной модуляцией

При таком построении в реверсивных системах начальный угол установки ВТ должен быть выбран равным  $\theta_0 = 90$  эл. град., тогда входной сигнал модулятора  $u_1$  определяет значение составляющей напряжения  $u_q$  вращающейся системы координат. Такой способ построения, как это отмечено выше, называется одноканальным.

При использовании второго способа на обмотку возбуждения ВТ поступает немодулированный сигнал с генератора несущей частоты (рис. 5.24), демодулято-

ры и фильтры генерируют систему вращающихся координат. Преобразование сигналов  $ud, uq$  из вращающихся координат в неподвижные  $u_\alpha u_\beta$  осуществляется в преобразователе  $d, q \Rightarrow \alpha, \beta$  в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_d \cos \theta - u_q \sin \theta, \\ u_\beta &= u_d \sin \theta + u_q \cos \theta. \end{aligned} \quad (5.71)$$

При таком (двухканальном) построении начальный угол установки датчика положения ротора следует задать нулевым, а ориентацию напряжения на статоре относительно поля ротора во вращающейся системы координат осуществить соответствующим заданием величин  $u_d, u_q$ .

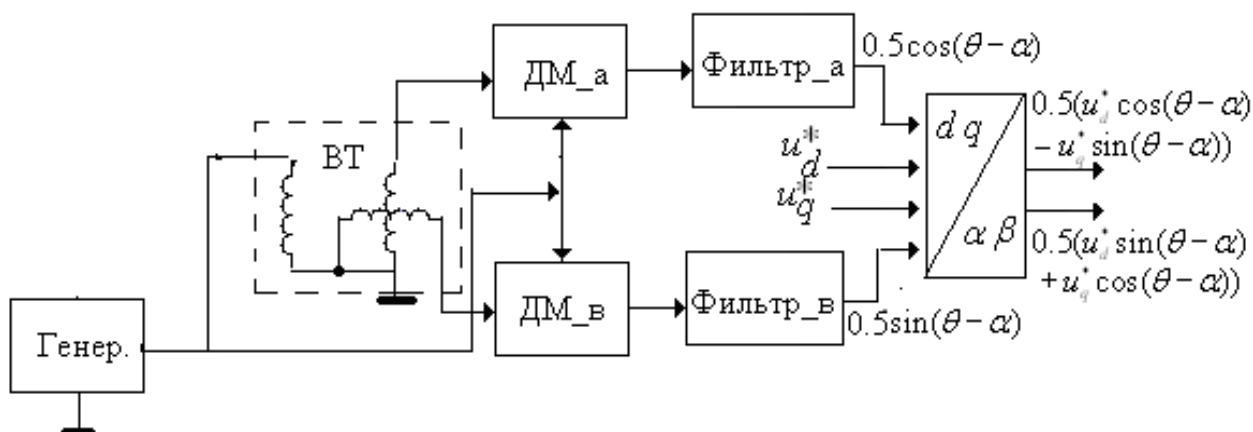


Рис. 5.24. Двухканальная система ДПР-ПК с амплитудной модуляцией

При использовании фазовой модуляции в ВТ возможны также два способа построения преобразователя координат (рис. 5.25). Первый, одноканальный вариант с фазовой модуляцией показан на рис. 5.25. В этой схеме генератор несущей частоты вырабатывает два сдвинутых по фазе на 90 эл. град. синусоидальных сигнала несущей частоты, которые поступают на синусную и косинусную обмотки ВТ, и одновременно на фазовые детекторы (ФД). С обмотки возбуждения ВТ сигнал несущей частоты и сигнал управления поступают на умножитель, который выполняет роль фазовращателя. Фазовые детекторы и фильтры выделяют напряжения  $u_\alpha u_\beta$  неподвижной системы координат.

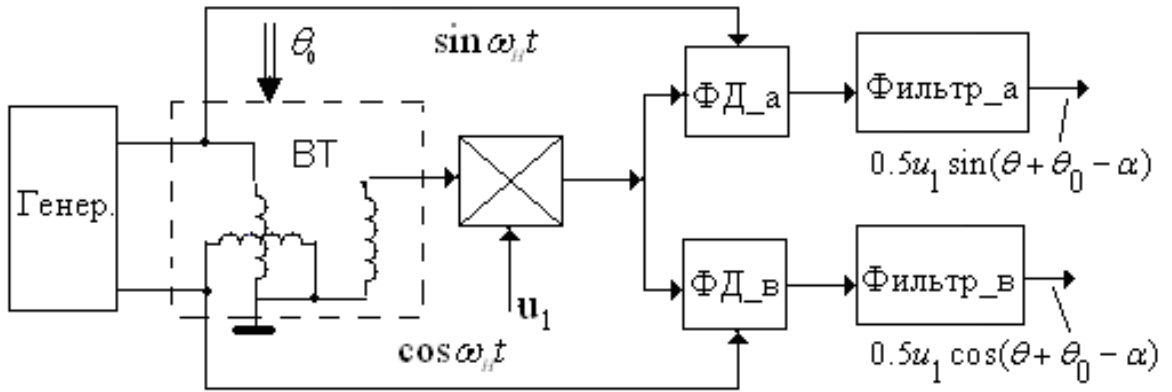


Рис. 5.25. Одноканальная система ДПР-ПК с фазовой модуляцией

При использовании второго двухканального способа с обмотки возбуждения ВТ немодулированный сигнал поступает непосредственно на фазовые детекторы (рис. 5.26), ФД и фильтры генерируют систему вращающихся координат. Преобразование сигналов  $id, iq$  из вращающихся координат в неподвижные  $u_\alpha u_\beta$  осуществляется в преобразователе  $d, q \Rightarrow \alpha, \beta$  в соответствии с уравнениями (5.71).

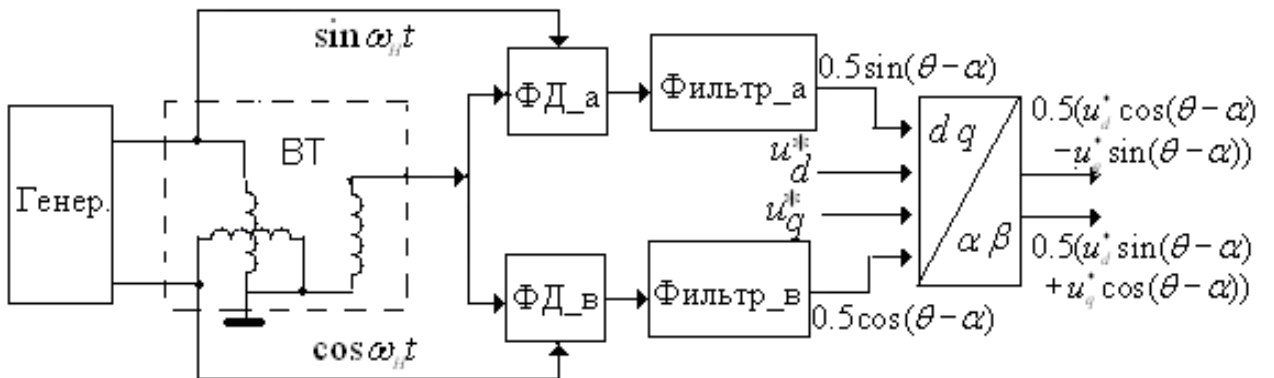


Рис. 5.26. Двухканальная система ДПР-ПК с фазовой модуляцией

При таком построении, также как и в случае амплитудной модуляции, начальный угол установки датчика положения ротора необходимо задать нулевым, а ориентацию напряжения на статоре относительно поля ротора во вращающейся системы координат осуществить соответствующим заданием величин  $u_d, u_q$ .

## 5.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МИКРОМЕХАТРОНИКА

### 5.5.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Моделью называется любой другой объект, отдельные свойства которого полностью или частично совпадают со свойствами исходного. Следует ясно понимать, что исчерпывающе полной модели быть не может. Она всегда ограничена и должна лишь соответствовать целям моделирования, отражая ровно столько свойств исходного объекта и в такой полноте, сколько необходимо для конкретного исследования.

Можно выделить несколько целей, ради которых создаются модели:

1. Модель как средство осмысления помогает выявить взаимозависимости переменных, характер их изменения во времени, найти существующие закономерности. При составлении модели становится более понятной структура исследуемого объекта, вскрываются важные причинно-следственные связи.

В процессе моделирования постепенно происходит разделение свойств исходного объекта на существенные и второстепенные с точки зрения сформулированных требований к системе. В определенном смысле вся научная деятельность сводится к построению и исследованию моделей.

2. Модель как средство прогнозирования позволяет предсказывать поведение объекта и управлять им, испытывая различные варианты управления.

3. Модель как средство проектирования, включающее этапы эскизного, технического и рабочего проектирования. Достижение этой цели стало возможным благодаря интенсивному развитию специализированных прикладных пакетов.

Экспериментировать с реальным объектом часто бывает неудобно, а иногда и просто опасно или вообще невозможно в силу ряда причин:

- большой продолжительности эксперимента;
- риска повредить или уничтожить объект;
- риска здоровью и жизни исследователей;
- отсутствия реального объекта в случае, когда он еще только проектируется.

Все эти причины устраняются при использовании моделей.

Модели можно условно разделить на три группы: физические, аналоговые и математические.

*Физическими* принято называть такие модели (макеты), в которых реальный объект заменен его увеличенной или уменьшенной копией. Эта копия создается на основе теории подобия, что и позволяет утверждать, что в модели сохранились требуемые свойства. Например, при исследованиях аэродинамических свойств будущего самолета в аэродинамической трубе достаточно его макета, изготовленного в натуральную величину или уменьшенного. Главное, чтобы он точно отражал геометрические размеры. Если физическая модель имеет совершенно иную природу нежели реальный объект, то такую модель называют аналоговой (от слова аналогия).

*Аналоговое* моделирование основано на замене исходного объекта объектом другой физической природы, обладающим аналогичным поведением. Колебания и резонанс можно изучать и с помощью механических систем, и с помощью электрических цепей. При аналоговом моделировании важно увидеть в объекте-заменителе нужные черты, и правильно их интерпретировать.

*Математическая* модель является математическим описанием реального физического объекта. Это описание базируется на физических законах, описывающих поведение объекта. Свойства объекта, представленного математической моделью, могут изучаться с использованием аналитических и вычислительных методов.

Аналитические методы исследования математических моделей, в разработке которых вот уже несколько столетий принимали и принимают участие самые светлые умы человечества, дали очень много теории и практике. Однако эти методы имеют существенные ограничения. Они позволяют в полной мере исследовать системы, которые описываются дифференциальными уравнениями первого и второго порядка. Системы, описываемые уравнениями третьего и четвертого порядка, поддаются аналитическому решению, но влияние параметров системы приходится исследовать уже численными методами. Системы более высоких порядков исследуются только численными методами.

Численные методы базируются на использовании компьютерного моделирования.



Компьютерная модель – это программная реализация математической модели, дополненная различными служебными программами (например, рисующими и изменяющими графические образы во времени).

### 5.5.2. МИКРОМЕХАТРОНИКА, ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Первые научные публикации по мехатронике появились в 1970-х гг. в Японии в связи с разработкой высокоточных систем автоматизации, управляемых от компьютера. В 1983 г. начал издаваться научный журнал «Мехатроника», а в 1984 г. было издано 7 книг в серии «Мехатроника».

В 1985 г. в Америке, в Калифорнийском Университете был создан научный центр мехатроники, куда вошло около 20 фирм, занимающихся перспективными научными разработками.

В России и в нынешних странах СНГ работы в области мехатроники интенсивно проводились начиная с 1980-х гг. в основном для нужд космоса и в военных целях. К концу XX в. сформировались научные школы при ведущих технических ВУЗах в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Киеве, Харькове, Минске и других городах бывшего СССР.

Основной движущей силой широкого внедрения мехатроники явилось развитие вычислительной техники, микросхемотехники, микропроцессоров и микроконтроллеров, что привело к новому осмыслению процессов передачи и преобразования информации в электромеханических системах. В результате это нашло отражение в новых практических разработках в различных отраслях науки и техники.

Само слово «Мехатроника» состоит из двух частей – механика и электроника. При своем рождении это слово обозначало только использование компьютера для управления механической системой. В связи с интенсивным развитием нанотехнологий все чаще используется термин – микромехатроника.

Сегодня этот термин обозначает научно – техническое направление, соединяющее в себе новые научные подходы при исследовании, опирающееся на современные компьютерные технологии (теория) и новые нанотехнологии в проектировании нетрадиционных технических устройств (практика).

В настоящее время микромехатронные устройства широко используются в медицине (исследования и искусственные органы), в компьютерной технике (привода дисков, принтеры, сканеры), в роботах и манипуляторах, в аудио- и видео-технике, в специальных устройствах космической и военной техники и т.д.

### 5.5.3. АРХИТЕКТУРА МИКРОМЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ

Архитектура микромехатронной системы приведена на рис. 5.27. Она включает три подсистемы: информационную, энергоэлектронную и электромеханическую.

Электромеханическая подсистема содержит объект управления (ОУ) и электромеханический преобразователь (ЭМП).

Энергоэлектронная подсистема включает силовой преобразователь (СПП) и вторичный источник питания (ВИП).

Информационная подсистема содержит систему управления и диагностики (СУД) и блок сенсорных устройств (СУ).

При изучении микромехатронной системы необходимо исследовать динамические, статические, энергетические, спектральные и ряд других характеристик.

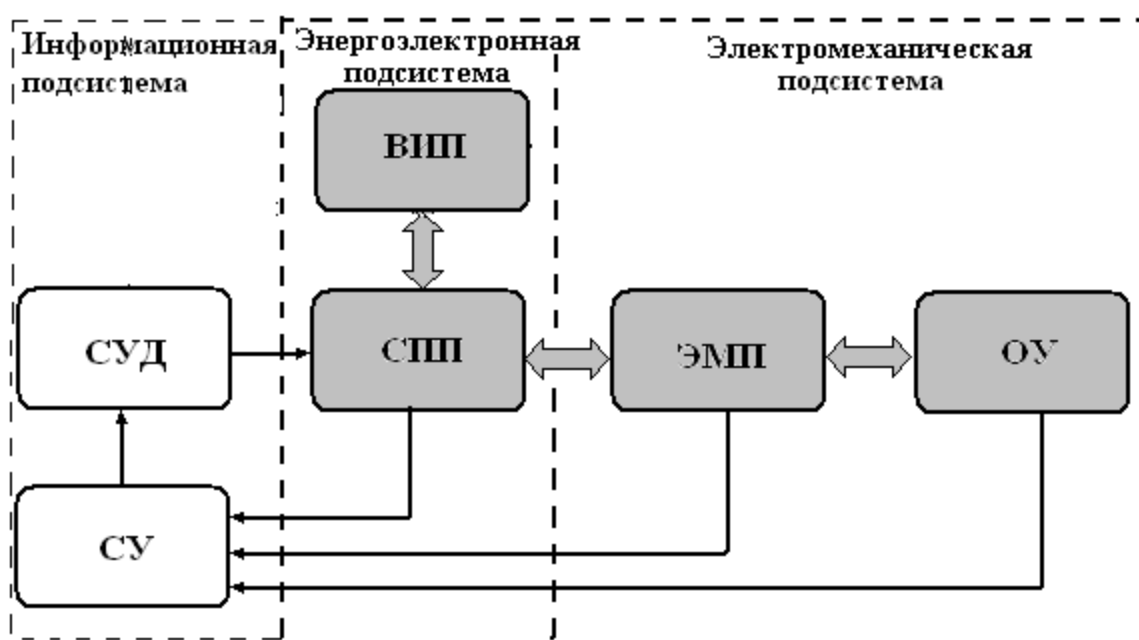


Рис. 5.27. Архитектура микромехатронной системы

Следует подчеркнуть основные особенности микромехатронной системы:

1. Объекты управления, как правило, заменяют человека в условиях, где его возможности ограничены или там, где его здоровью и жизни угрожает опасность.

2. Объекты управления (ОУ) микромехатронных систем, как правило, имеют переменные параметры. Часто не удается создать математическую модель объекта управления на основе физических закономерностей его работы. В этом случае для математического описания (ОУ) приходится прибегать к методам идентификации.

3. Электромеханические преобразователи (ЭМП) часто являются конструктивным звеном объекта управления. В этом случае конструкция ЭМП является нетрадиционной.

4. Управление потоком энергии от ПИП до ЭМП осуществляется силовым преобразователем (СПП). Объединение ПИП, СПП и ЭМП создает микромехатронную энергетическую подсистему (МЭП), в которой проявляются новые свойства, отсутствующие в отдельно взятых блоках.

5. Микромехатронная энергетическая подсистема, как правило, является нелинейной, импульсной подсистемой с дискретно изменяющимися параметрами. Поэтому ее анализ, а также синтез системы управления требует применения методов, базирующихся на современных компьютерных технологиях.

Расчет и проектирование микромехатронной системы включают:

- построение совместной модели цифровой, импульсной и непрерывной части;
- исследование динамических характеристик непрерывной и импульсной части;
- синтез регулятора;
- исследование динамических характеристик всей системы;
- исследование статических характеристик всей системы.

#### 5.5.4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАКОНОВ ФИЗИКИ В МИКРОМЕХАТРОНИКЕ

В основе принципов действия и работы мехатронных систем лежат широко известные законы физики, в том числе:

- 1) законы классической механики;
- 2) законы электромагнитных взаимодействий;
- 3) законы квантовой механики.

Из последних достижений в области нанотехнологий по созданию микро-мехатронных систем, основанных на законах физики, следует отметить следующие результаты.

*Центральные процессоры* – 15 октября 2007 г. компания Intel заявила о разработке нового прототипа процессора, содержащего наименьший структурный элемент размерами примерно 45 нм. В дальнейшем компания намерена достичь размеров структурных элементов до 5 нм. Основной конкурент Intel, компания AMD, также давно использует для производства своих процессоров нанотехнологические процессы, разработанные совместно с компанией IBM. Характерным отличием от разработок Intel является применение дополнительного изолирующего слоя SOI, препятствующего утечке тока за счет дополнительной изоляции структур, формирующих транзистор. Уже существуют рабочие образцы процессоров с транзисторами размером 32 нм и опытные образцы на 22 нм.

*Жесткие диски* – в 2007 г. Питер Грюнберг и Альберт Ферт получили Нобелевскую премию по физике за открытие GMR-эффекта, позволяющего производить запись данных на жестких дисках с атомарной плотностью информации.

*Сканирующий зондовый микроскоп* – микроскоп высокого разрешения, основанный на взаимодействии иглы кантилевера (зонда) с поверхностью исследуемого образца. Обычно под взаимодействием понимается притяжение или отталкивание кантилевера от поверхности из-за сил Ван-дер-Ваальса. Но при использовании специальных кантилеверов можно изучать электрические и магнитные свойства поверхности. СЗМ может исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности даже через слой жидкости, что позволяет работать с органическими молекулами (ДНК). Пространственное разрешение сканирующих зондовых микроскопов зависит от характеристик используемых зондов. Разрешение достигает атомарного по горизонтали и существенно превышает его по вертикали.

*Антенна-осциллятор* – 9 февраля 2005 г. в лаборатории Бостонского университета была получена антенна-осциллятор размерами порядка 1 мкм. Это устройство насчитывает 5000 миллионов атомов и способно осциллировать с частотой

той 1,49 гигагерц, что позволяет передавать с ее помощью огромные объемы информации.

*Плазмоны* – коллективные колебания свободных электронов в металле. Характерной особенностью возбуждения плазмонов можно считать так называемый плазмонный резонанс, впервые предсказанный Ми в начале XX в. Длина волны плазмонного резонанса, например, для сферической частицы серебра диаметром 50 нм составляет примерно 400 нм, что указывает на возможность регистрации наночастиц далеко за границами дифракционного предела (длина волны излучения много больше размеров частицы). В начале 2000-го г., благодаря быстрому прогрессу в технологии изготовления частиц наноразмеров, был дан толчок к развитию новой области нанотехнологии – наноплазмонике. Оказалось возможным передавать электромагнитное излучение вдоль цепочки металлических наночастиц с помощью возбуждения плазмонных колебаний.

*Молекулярные роторы* – синтетические наноразмерные двигатели, способные генерировать крутящий момент при приложении к ним достаточного количества энергии.

*Нанороботы* – роботы, созданные из наноматериалов и размером сопоставимые с молекулой, обладающие функциями движения, обработки и передачи информации, исполнения программ. Нанороботы, способные к созданию своих копий, то есть самовоспроизводству, называются репликаторами. Вопросы разработки нанороботов и их компонентов рассматриваются на профильных международных конференциях.

*Молекулярные пропеллеры* – наноразмерные молекулы в форме винта, способные совершать вращательные движения благодаря своей специальной форме, аналогичной форме макроскопического винта.

С 2006 г. в рамках проекта RoboCup (чемпионат по футболу среди роботов) появилась номинация «NanogramCompetition», в которой игровое поле представляет из себя квадрат со стороной 2,5 мм. Максимальный размер игрока ограничен 300 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Главной целью изучения материалов этого учебного пособия студентами бакалавриата и магистратуры, обучающимися по направлению 221000 «Мехатроника и робототехника», является формирование основ их будущих профессиональных компетенций в рамках изучения учебных дисциплин:

Б2.В.ДВ.1 «Введение в мехатронику и робототехнику»;

Б3.Б.3 «Основы мехатроники и робототехники»;

Б3.Б.7 «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование»;

Б3.Б.10 «Электрические и гидравлические приводы мехатронных и робототехнических устройств»;

Б3.В.ОД.3 «Проектирование и эксплуатация систем автоматизированного управления в мехатронике и робототехнике».

Надеемся, что учебное пособие будет полезно также аспирантам университетов и специалистам производственных, проектных и научно-исследовательских организаций, занимающимся вопросами эксплуатации, проектирования, разработки и исследования мехатронных модулей и робототехнических систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
2. **Солодовников, В. В.** Основы теории и элементы систем автоматического регулирования : учебное пособие для вузов / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. – М. : Машиностроение, 1985. – 536 с.
3. **Кулик, В. Д.** Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи : учебное пособие / В. Д. Кулик. – СПб. : Изд-во ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2010. – 90 с.
4. **Петрович, В. П.** Силовые преобразователи электрической энергии : учебное пособие / В. П. Петрович, Н. А. Воронина, А. В. Глазачев. – Томск : Изд-во Томского гос. техн. ун-та, 2009. – 240 с.
5. **Алексеев, К. Б.** Микроконтроллерное управление электроприводом : учебное пособие / К. Б. Алексеев, К. А. Палагута. – М. : МГИУ, 2008. – 298 с.
6. **Афанасьева, Н. А.** Электротехника и электроника : учебное пособие / Н. А. Афанасьева, Л. П. Булат. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2009. – 181 с.
7. **ГОСТ 27471–87.** Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. – 40 с.
8. **Дементьев, Ю. Н.** Электрический привод : учебное пособие / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.
9. **Кацман, М. М.** Электрический привод : учебник / М. М. Кацман. – Изд. 4-е. – М. : Академия, 2011. – 384 с.
10. **Вольдек, А. И.** Электрические машины : учебник / А. И. Вольдек. – Изд. 3-е. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
11. **Беспалов, В. Я.** Электрические машины : учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2006. – 320 с.
12. **Ермолин, Н. П.** Электрические машины малой мощности / Н. П. Ермолин. – М. : Высшая школа, 1967. – 506 с.

13. **Энциклопедия ремонта.** Выпуск 12: Микросхемы для управления электродвигателями / под. ред. А. В. Перебаскина. – М. : ДОДЭКА, 1999. – 288 с.
14. **Раимова, А. Т.** Электроника и основы микропроцессорной техники : учебное пособие / А. Т. Раимова, С. С. Якупов. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2003. – 145 с.
15. **ГОСТ 2.722–68.** Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические. – 14 с.
16. **Управление шаговыми двигателями** // <http://www.stepmotor.ru/production/block/>. Дата посещения 26.02.2009.
17. **Башта, Т. М.** Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем : учебник для вузов / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1974. – 606 с.
18. **Схиртладзе, А. Г.** Гидравлические и пневматические системы / А. Г. Схиртладзе, В. И. Иванов, В. Н. Кореев. – М. : ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003. – 544 с.
19. **Лепешкин, А. В.** Гидравлика и гидропневмопривод : учебник. Ч. 2: Гидравлические машины и гидропневмопривод / А. В. Лепешкин, А. А. Михайлин, А. А. Шейпак ; под ред. А. А. Шейпака. – М. : МГИУ, 2003. – 352 с.
20. **Золотниковый** распределитель <http://wikipedia.org>.
21. **Шестеренные** гидронасосы и гидромоторы. Пластинчатые гидронасосы и гидромоторы. [http://exkavator.ru/hydroequip/rid = 5466](http://exkavator.ru/hydroequip/rid=5466).
22. **Гидравлический** привод [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Гидравлический привод](http://ru.wikipedia.org/wiki/Гидравлический_привод).
23. **Костенко, М. П.** Электрические машины. В 2-х ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд. – М. : Энергия, 1973.
24. **Башарин, А. В.** Управление электроприводами (Для студентов ВУЗов) / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
25. **Борцов, Ю. А.** Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992.
26. **Бенькович, Е.** Практическое моделирование динамических систем / Е. Бенькович, Ю. Колесов, Ю. Сениченков. БХВ –Петербург, 2002.
27. **Беленький, Ю. М.** Выбор и программирование параметров бесконтактного моментного привода / Ю. М. Беленький, А. Г. Микеров. – Л. : ЛДНТП, 1990.



28. **Глазенко, Т. А.** Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока / Т.А. Глазенко. – Л. : Энергия, 1973.
29. **Ильинский, Н. Ф.** Основы электропривода : учебное пособие / Н. Ф. Ильинский. – М. : Изд-во МЭИ, 2003.
30. **Ковчин, С. А.** Теория электропривода / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – СПб. : ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Санкт-Петербургское отделение, 1994.
31. **Слежановский, О. В.** Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
32. **Усольцев, А. А.** Векторное управление асинхронными двигателями : учебное пособие. – СПб., 2002.
33. **Фигаро, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фигаро, Л. Б. Павлячек. – Минск : ЗАО Техноперспектива , 2004.
34. **Герман-Галкин, С. Г.** Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С. Г. Герман-Галкин, В. Д. Лебедев, Б. А. Марков, Н. И. Чичерин. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.
35. **Шрейнер, Р. Т.** Системы подчиненного регулирования электроприводов : учебное пособие / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1997.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ .....	15
1.1. Электродвигатели постоянного тока .....	20
1.1.1. Принцип работы и устройство электрических машин постоянного тока .....	20
1.1.2. Устройство якоря .....	23
1.1.3. Работа электрических машин постоянного тока .....	25
1.1.4. Динамические характеристики электродвигателей постоянного тока .....	28
1.1.5. Достоинства и недостатки электродвигателей постоянного тока	30
1.1.6. Электродвигатели с постоянными магнитами .....	31
1.1.7. Электродвигатели с обмотками возбуждения .....	32
1.1.8. Коллекторные двигатели переменного тока .....	35
1.1.9. Исполнительные двигатели постоянного тока .....	38
1.1.10. Пуск электродвигателей постоянного тока .....	40
1.1.11. Торможение электродвигателей постоянного тока .....	42
1.1.12. Изменение направления вращения в машинах постоянного тока	45
1.1.13. Регулировка частоты вращения электродвигателей постоянного тока .....	52
1.1.14. Энкодеры и сервоприводы .....	59
1.1.15. Вентильный двигатель .....	62
1.2. Синхронные электрические машины .....	64
1.2.1. Вращающееся магнитное поле .....	64
1.2.2. Число пар полюсов и частота вращения .....	67
1.2.3. Устройство синхронных электродвигателей .....	68
1.2.4. Работа синхронных электрических машин .....	73
1.2.5. Достоинства и недостатки синхронных электродвигателей .....	75
1.2.6. Пуск и торможение синхронных электродвигателей .....	78
1.2.7. Шаговые электродвигатели .....	79

1.3. Асинхронные электродвигатели .....	90
1.3.1. Устройство асинхронного двигателя .....	90
1.3.2. Принцип действия асинхронной машины .....	92
1.3.3. Основные характеристики асинхронных двигателей и режимы их работы .....	94
1.3.4. Пуск асинхронного двигателя .....	96
1.3.5. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором с повышенным пусковым моментом .....	97
1.3.6. Регулирование скорости вращения АД .....	98
1.3.7. Режимы торможения электродвигателя и способы останова .....	105
2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ СИСТЕМ МЕХАТРОНИКИ .....	107
2.1. Особенности пневматического привода, достоинства и недостатки ...	107
2.2. Физические основы функционирования пневмосистем .....	114
2.2.1. Основные параметры газа .....	114
2.2.2. Основные физические свойства газов .....	117
2.2.3. Основные газовые законы .....	118
2.2.4. Течение газа .....	121
2.3. Производство сжатого воздуха .....	127
2.3.1. Классификация компрессоров .....	128
2.3.2. Объемные компрессоры .....	128
2.3.3. Динамические компрессоры .....	134
2.3.4. Блоки подготовки сжатого воздуха .....	137
2.4. Пневматические приводы .....	148
2.4.1. Поршневые пневматические приводы .....	148
2.4.2. Позиционирование пневмоприводов .....	157
2.5. Поворотные пневматические двигатели .....	163
2.6. Пневмомоторы .....	165
2.6.1. Классификация пневматических моторов .....	165
2.6.2. Пластинчатые (шиберные) пневмомоторы .....	167
2.6.3. Шестеренные пневмомоторы .....	168
2.6.4. Радиально-поршневые пневмомоторы .....	169
2.6.5. Турбинные пневмомоторы .....	169

2.7. Преобразователи сигналов в мехатронике .....	170
2.7.1. Преобразователь силы в давление сжатого воздуха .....	171
2.7.2. Преобразователь тока в давление сжатого воздуха .....	175
2.7.3. Преобразователь силы в ток .....	176
2.7.4. Преобразователь давления сжатого воздуха в ток .....	178
2.7.5. Преобразователь давления в перемещение .....	180
3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ГИДРОПРИВОДЫ В СОСТАВЕ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	182
3.1. Основные сведения о гидравлических исполнительных механизмах ..	182
3.2. Принцип действия и работа гидравлических исполнительных механизмов .....	184
3.2.1. Конструкции гидроприводов (гидродвигателей) .....	184
3.2.2. Управляющие устройства гидравлических исполнительных механизмов .....	187
3.3. Объемные гидравлические передачи вращательного движения .....	189
3.3.1. Гидромоторы и гидронасосы .....	190
3.3.2. Основы функционирования объемных гидроприводов вращательного движения .....	203
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ .....	212
4.1. Редукторы .....	213
4.1.1. Основные понятия и характеристики зубчатой передачи .....	216
4.1.2. Основные понятия и характеристики червячной передачи .....	220
4.1.3. Основные понятия и характеристики планетарной передачи .....	223
4.1.4. Основные понятия и характеристики волновой передачи .....	226
4.1.5. Основные понятия и характеристики ременной передачи .....	228
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ .....	233
5.1. Приводы как электромеханические преобразователи мехатронных систем .....	233
5.2. Двигатели постоянного тока .....	235
5.2.1. Одноконтурная скоростная система постоянного тока .....	238
5.2.2. Двухконтурная скоростная система постоянного тока .....	240
5.2.3. Следящая система постоянного тока .....	242
5.2.4. Следящая робототехническая система постоянного тока .....	243

5.3. Однофазные и трехфазные асинхронные двигатели .....	246
5.3.1. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором .....	251
5.3.2. Моделирование АКЗ в неподвижной системе координат .....	252
5.3.3. Моделирование АКЗ во вращающейся системе координат .....	255
5.3.4. Асинхронные системы с частотным управлением .....	257
5.3.5. Асинхронные системы с частотно-токовым управлением .....	263
5.3.6. Частотная асинхронная система с векторным управлением .....	264
5.3.7. Частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением .....	266
5.4. Однофазные реактивные двигатели и устройства на постоянных магнитах .....	267
5.4.1. Моделирование вентильных двигателей в неподвижной системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК .....	272
5.4.2. Моделирование вентильных двигателей во вращающейся системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК .....	274
5.4.3. Статистические характеристики ВД при питании от источника напряжения .....	276
5.4.4. Датчики положения ротора и преобразователи координат, выполненные на вращающихся трансформаторах .....	277
5.5. Моделирование и микромехатроника .....	280
5.5.1. Моделирование. Основные понятия и определения .....	280
5.5.2. Микромехатроника, основные понятия и определения .....	282
5.5.3. Архитектура микромехатронной системы .....	283
5.5.4. Примеры использования законов физики в микромехатронике	284
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	287
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	288

Учебное электронное издание

ПОНОМАРЕВ Сергей Васильевич,  
ДИВИН Александр Георгиевич,  
МОЗГОВА Галина Владимировна,  
МОРДАСОВ Михаил Михайлович,  
САВЕНКОВ Александр Петрович,  
СТЕНИН Александр Африканович

# КОМПОНЕНТЫ ПРИВОДОВ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Электронное учебное пособие

Редактор И. В. Калистратова

Инженеры по компьютерному макетированию: И. В. Евсеева, М. Н. Рыжкова

ISBN 978-5-8265-1294-4



Подписано к изданию 15.09.2014.

Тираж 210 шт. Заказ № 394

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

Телефон (4752) 63-81-08

E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)