

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Приборостроение»

## **ОСНОВЫ ПРИВОДОВ**

Методические рекомендации  
по выполнению курсового проекта  
для студентов по направлениям  
12.03.01, 680100 – «Приборостроение»

Бишкек 2021

УДК 681.2(072)  
О 75

Рецензенты:

*А.В. Анохин* – канд. техн. наук, доц.  
*М.М. Шамсутдинов* – д-р техн. наук, проф.

Составитель:

*А.П. Муслимов*

Рекомендовано к изданию  
кафедрой «Приборостроение» КРСУ

О 75 **ОСНОВЫ ПРИВОДОВ: Методические рекомендации по выполнению курсового проекта для студентов по направлениям 12.03.01, 680100 – «Приборостроение» / сост. А.П. Муслимов. Бишкек: КРСУ, 2021. 52 с.: ил.**

В методическом пособии по выполнению курсовых проектов приводится обзор существующих проблем по основам приводов, примеры приводов и схем управления, описание их, а также передаточные отношения и функции как элементов, так и всей системы.

Даны рекомендации по разработке и применению отдельных приводов к конкретным оборудованьям, а также даны варианты курсовых тем.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 4  |
| Роль и значение приводов в машиностроении .....  | 4  |
| 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД .....  | 6  |
| 1.1 Электромеханические свойства двигателей. Требования<br>к электроприводам станков ..... | 6  |
| 1.2 Регулирование скорости асинхронного двигателя<br>изменением частоты .....              | 9  |
| 1.3 Регулирование скорости асинхронного двигателя<br>изменением числа пар полюсов .....    | 12 |
| 1.4 Электропривод с однофазным асинхронным двигателем.....                                 | 13 |
| 1.5 Электропривод с синхронным двигателем.....   | 14 |
| 1.6 Электропривод с шаговым двигателем.....  | 16 |
| 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД.....  | 21 |
| 2.1 Роль гидропривода в современном станкостроении .....                                   | 21 |
| 2.2 Статика силового цилиндра.....   | 27 |
| 2.3 Динамика гидроцилиндра .....   | 28 |
| 2.4 Объемное регулирование .....   | 32 |
| 2.5 Дроссельное регулирование скорости .....   | 33 |
| 2.6 Дискретное регулирование расхода жидкости .....  | 36 |
| 3. ПНЕВМОПРИВОД.....   | 40 |
| 3.1 Общие сведения о пневматических устройствах и системах .....                           | 42 |
| 3.2 Структура пневматических систем и устройств .....                                      | 43 |
| 3.3 Пневмодвигатели .....  | 44 |
| 3.4 Поршневые пневмодвигатели.....   | 45 |
| 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ<br>УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ.....                          | 47 |
| 5. НАЗНАЧЕНИЕ, СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА  | 48 |
| 6. ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....  | 49 |
| ЛИТЕРАТУРА .....   | 50 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Роль и значение приводов в машиностроении**

Приводом называется агрегат, в котором происходит преобразование любого вида энергии в механическую, возможность регулирования его выходных параметров – скорости движения, усилия или момента.

Любое оборудование независимо от своего назначения, т. е. вида выполняемого технологического процесса, снабжено приводами, количество их может быть один или несколько.

От правильного выбора привода к оборудованию зависят его эксплуатационные показатели: производительность, качество продукции, универсальность, долговечность, а также экономические показатели.

В связи с этим к приводам предъявляются следующие основные требования:

- 1) малые массы и габариты;
- 2) создание больших усилий и моментов;
- 3) высокая весовая отдача;
- 4) возможность регулирования выходных параметров в широком диапазоне;
- 5) жесткая механическая характеристика;
- 6) высокие динамические качества: быстроедействие и устойчивая работа на всех предусмотренных режимах;
- 7) хорошие экономические показатели: невысокая себестоимость, универсальность, малый срок окупаемости и др.

Практически во всех отраслях промышленности, особенно в машиностроении, в основном применяются три вида приводов:

- 1) электропривод;
- 2) гидропривод;
- 3) пневмопривод.

Однако по сравнению с гидроприводом и пневмоприводом, наибольшее применение в промышленности получил электропривод, что обусловлено следующими его достоинствами:

- 1) простота структуры;
- 2) несложность подачи энергии к приводу;
- 3) серийное и массовое производство электродвигателей, сравнительно невысокая их себестоимость;
- 4) возможность широкого выбора электродвигателей в связи с их большой номенклатурой и др.

Второе место по применению в промышленности занимает гидропривод, который по сравнению с другими приводами имеет следующие достоинства:

- 1) развивает большие усилия и момент;
- 2) малые масса и габариты;
- 3) бесступенчатое регулирование его выходных параметров: скорости, усилия, момента;
- 4) высокое быстродействие и др.

Достоинствами пневмопривода являются: простота конструкции, несложность структуры, получение больших скоростей движения и др.

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

## 1.1 Электромеханические свойства двигателей. Требования к электроприводам станков

Наиболее компактным, дешевым, надежным и экономичным в эксплуатации двигателем, сохраняющим примерно постоянную скорость при изменениях нагрузки от холостого хода до номинальной, является трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Поэтому трехфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели получили в станкостроении наибольшее распространение.

В процессе обработки на металлорежущем станке необходимо сохранение заданной скорости резания и выбранной подачи. Отклонение от выбранного режима резания вызывает ухудшение качества отработки или уменьшение производительности. Поэтому электрический привод станка должен сохранять примерное постоянство скорости при изменениях нагрузки, вызванных колебаниями припуска (за исключением некоторых видов управления). Этому требованию удовлетворяют электродвигатели с достаточно жесткими механическими характеристиками.

У каждого металлорежущего станка электродвигатель и кинематическая цепь станка обеспечивают нужную скорость резания. У большей части специальных станков частота (скорость) вращения шпинделя неизменна.

Если требуемая частота вращения шпинделя станка достаточно велика (1000–3000 об/мин), то вал электродвигателя можно связать непосредственно со шпинделем. Это имеет место, например, на шлифовальных станках. Если же нужна низкая частота вращения шпинделя, то применять электродвигатель с пониженной номинальной частотой вращения в большинстве случаев нецелесообразно, так как масса электрической машины возрастает примерно обратно пропорционально номинальной частоте ее вращения (при той же мощности). Вместе с массой возрастают размеры и стоимость электродвигателя, и потому такой привод становится конструктивно и экономически неприемлемым. Опыт показал целесообразность использования в станкостроении элек-

тродвигателей с относительно высокой номинальной частотой вращения (1000–3000 об/мин) и механических передач для последующего понижения частоты вращения.

При небольшой частоте вращения шпинделя двигатель может иметь разные номинальные частоты вращения. Чем быстроходнее двигатель, тем он меньше и дешевле, но тем сложнее механическая передача, связывающая вал электродвигателя с рабочими органами станка. Лучшее решение выбирают путем экономического сравнения ряда возможных вариантов. Сказанное в значительной мере относится также к приводам подачи и вспомогательного перемещения. В отдельных случаях в станкостроении применяют и тихоходные электродвигатели специальных конструкций для повышения жесткости передачи или упрощения конструкции.

При необходимости обработки с различными скоростями резания требуется регулирование частоты вращения шпинделя. При этом может быть применен регулируемый электропривод, коробка скоростей или их сочетание – в зависимости от результатов экономического анализа выбранных вариантов. Могут также быть применены различные формы регулируемого гидропривода и разного рода механические вариаторы.

В ряде случаев (в частности, у электрокопировальных станков) большое значение приобретают динамические свойства привода, его быстродействие, способность быстро изменять частоту вращения.

В процессе работы металлорежущего станка двигатель развивает на своем валу движущий момент  $M$ . Этому моменту противодействует момент  $m$  сил сопротивления, вызванный силами резания и трения в кинематической цепи электропривода.

Момент  $M$  ( $Hm$ ) на валу двигателя, угловая скорость  $\omega$  ( $1/c$ ) вращения его вала, частота вращения  $n$  ( $об/мин$ ) вала двигателя и механическая мощность  $P$  ( $Bm$ ), развиваемая двигателем, связаны известными соотношениями:

$$M = \frac{P}{\omega} \tag{1.1}$$
$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

Если мощность выражена в кВт, то

$$M = \frac{P}{\omega} * 10^3 = \frac{P}{n} * 9,55 * 10^3 \approx \frac{P}{n} * 10^4 \quad (1.2)$$

Если момент  $M$  выражает в  $H.m$ , то использует формулу

$$M = \frac{P}{n} * 10^4 \quad (1.3)$$

Скольжение  $s$ , синхронная частота вращения  $n_0$  двигателя (частота вращения магнитного поля) и частота вращения  $n$  вала двигателя связаны зависимостью

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (1.4)$$

Наибольшую мощность  $P_H$ , с которой может работать двигатель в нормальном для него режиме, называют номинальной мощностью двигателя. Соответствующие этой мощности значения тока  $I_H$ , частоты вращения  $n_H$ , момента  $M_H$  и скольжения  $s_H$  называют номинальными значениями этих величин. Величина номинального скольжения колеблется в пределах 2–5 %, причем при большей мощности имеют меньшее номинальное скольжение. Такое изменение скорости под нагрузкой при обработке резанием является допустимым. Механическая характеристика [1, 2]  $n(M)$  трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя показана на рис. 1.1 (кривая 1).

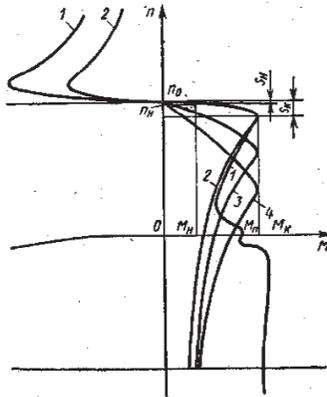


Рис. 1.1. Механические характеристики асинхронного двигателя

При  $M = M_c$  имеет место установившееся движение с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вала электродвигателя. Если момент  $M_c$  сил сопротивления возрастает (например, при увеличении припуска), то движение будет замедляться, а если уменьшится (при уменьшении припуска) – то ускоряться. При этом возникает динамический момент  $M_j$ , обусловленный действием сил инерции.

Динамический момент [2]

$$M_j = \frac{Jd\omega}{dt}$$

где  $J$  – момент инерции системы, приведенный к валу двигателя.  
В общем случае движение описывается уравнением

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$$

Причем направление динамического момента зависит от знака  $\frac{d\omega}{dt}$

Процессы, при которых  $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ , называют переходными.

Поскольку припуск на обработку обычно является переменной величиной, резание по существу протекает в условиях переходных процессов, хотя в расчетах небольшими колебаниями частоты вращения обычно пренебрегают.

## 1.2 Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением частоты

Данный способ [5, 6], называемый частотным, является одним из наиболее перспективных и широко внедряется в настоящее время. Принцип его заключается в том, что, изменяя частоту  $f_1$  питающего АД напряжения, можно в соответствии с выражением  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$  изменять его скорость  $\omega_0$ , получая различные искусственные характеристики. Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а получаемые характеристики обладают высокой жесткостью. Частотный способ к тому же отличается и ещё одним весьма важным свойством: регулирование скорости АД не сопровождается увеличением его

скольжения, поэтому потери мощности при регулировании скорости, определяемые по  $\Delta P = P_{эм} - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s$ , оказываются небольшими.

Для лучшего использования АД и получения высоких энергетических показателей его работы – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – одновременно с частотой необходимо изменять и подводимое к АД напряжение. Закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки  $M_c$ .

При постоянном моменте нагрузки  $M_c = const$  напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально его частоте

$$U_1/f_1 = const \quad (1.5)$$

Для вентиляторного характера момента нагрузки это соотношение имеет вид

$$U_1/f_1^2 = const \quad (1.6)$$

а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, оно пишется в виде

$$U_1/\sqrt{f_1} = const \quad (1.7)$$

Таким образом, при реализации частотного способа регулирования скорости АД должен быть использован преобразователь частоты, который позволяет также регулировать и напряжение на статоре АД.

**Схема включения АД и характеристики.** Необходимым элементом ЭП является преобразователь 1 частоты и напряжения (в дальнейшем используется обозначение ПЧ), на вход которого подается стандартное напряжение сети  $U_1$ , (220,380 В и т. д.) промышленной частоты  $f_1 = 50$  Гц, а с его выхода снимается переменное напряжение  $U_{1пер}$ , регулируемой частоты  $f_{1пер}$  (рис. 1.2 а), значения которых находятся между собой в определенных соотношениях, определяемых формулами (1.5) – (1.7). Регулирование выходной частоты и напряжения осуществляется с помощью управляющего сигнала  $U_y$ , изменение которого определяет в конечном итоге изменение скорости двигателя 2.

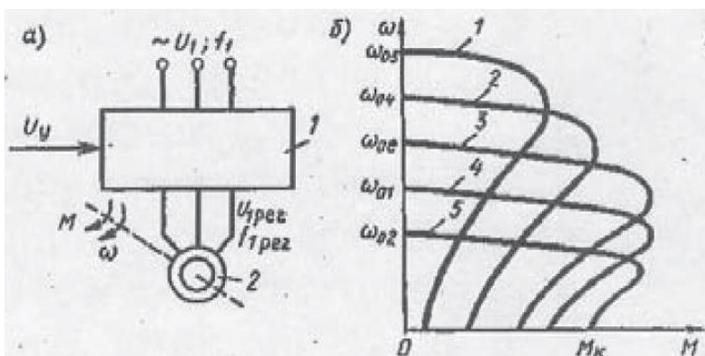


Рис. 1.2. Схема асинхронного ЭП (а) и механические характеристики АД (б) при частотном регулировании

Анализ механических характеристик АД при его управлении по наиболее простому закону  $U_1/f_1 = const$  показывает, что скорость  $\omega_0$  идеального холостого хода АД изменяется при регулировании  $f_1$ , а критический момент  $M_k$  остается неизменным, что следует из его упрощенного выражения  $M_k = 3U_\phi^2 / (2\omega_0 x_k)$ . Действительно, так как  $\omega_0 \propto f_1$  и  $x_k \propto f_1$ , то критический момент  $M_k \propto U_1^2 / f_1^2 \propto U_1 / f_1 = const$ .

Механические характеристики (рис. 1.2 б) по своим особенностям разделяются на два семейства: характеристики, соответствующие частотам ниже номинальной (сетевой)  $f_{1ном}$  и выше ее. Область частот  $f_1 < f_{1ном}$ . В этой области для частот  $f_{13} = f_{1ном}$ ;  $f_{14} < f_{13}$ ;  $f_{15} < f_{14}$  (характеристики 3–5) соотношение  $U_1/f_1 = const$  может выполняться, так как напряжение, подводимое к АД, регулируется от номинального ( сетевого) в сторону уменьшения. Поэтому  $M_k = const$  и АД имеет постоянную перегрузочную способность. Отметим, что из-за влияния сопротивления  $R_1$ , которое не учитывалось при выводе формулы  $M_k = 3U_\phi^2 / (2\omega_0 x_k)$ , момент  $M_k$  в области малых скоростей АД несколько снижается, поэтому для поддержания  $M_k = const$  напряжения при малой частоте должно изменяться не пропорционально ей.

Область частот  $f_1 > f_{1ном}$ . По условиям нормальной работы АД нельзя повышать напряжение сверх номинального (паспортно-

го). Поэтому регулирование скорости в этой области  $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$  (характеристики 1 и 2 при частотах  $f_{11}$  и  $f_{12}$ ), в связи с чем критический момент  $M_k$  в соответствии с  $M_k = 3U_{\Phi}^2 / (2\omega_0 x_k)$ , будет уменьшаться при увеличении  $f_1$  ( $f_{11} > f_{12} > f_{1\text{ном}}$ ).

Упрощенная функциональная схема ПЧ без звена постоянного тока (рис. 1.3). Она состоит из силовой части 3, с которой связан асинхронный двигатель 4, и блока 2 управления. С помощью указанных блоков осуществляется преобразование электрической энергии переменного тока стандартных напряжений  $U_1$  и частоты  $f_1$  в энергию переменного тока стандартных напряжений с регулируемым напряжением  $U_{\text{рег}}$  и частотой  $f_{\text{рег}}$ . Силовая часть 3 выполняется на базе полупроводниковых приборов (тиристоров или транзисторов), управляемых сигналами с блока 2, и в некоторых случаях согласующих трансформаторов.

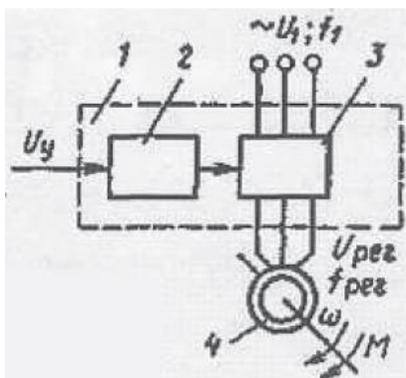


Рис. 1.3. Блок-схема ПЧ с непосредственной связью

### 1.3 Регулирование скорости асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов

Этот способ регулирования скорости [4] может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название многоскоростных. Особенность этих АД состоит в том, что их статорная обмотка состоит из двух одинаковых секций (полуобмоток). За счет разных схем их соединения может быть изменено число пар полюсов  $p$  АД. В соответствии с формулой

$\omega_0 = 2\pi f_1/p$  это позволяет изменять скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$  и тем самым регулировать скорость АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.

Так как число пар полюсов АД может принимать только дискретные значения ( $p=1,2,3,4,\dots$ ), то и скорость АД этим способом может регулироваться лишь ступенчато.

#### **1.4 Электропривод с однофазным асинхронным двигателем**

В том случае, когда источником электроэнергии является однофазная сеть переменного тока, что имеет место для жилых и административных городских зданий, сельскохозяйственных районов, применяются ЭП с однофазными АД. Эти двигатели выпускаются, как правило, на небольшую мощность (до 5-10 кВт) и используются в приводе стиральных машин, холодильников, медицинских аппаратов, пылесосов, доильных аппаратов, центрифуг, небольших обрабатывающих станков и т. д.

Разновидностью однофазных АД являются так называемые исполнительные двигатели, которые применяются в различных устройствах автоматического управления и характеризуются возможностью широкого регулирования скорости.

В СНГ выпускаются однофазные АД серий АОЛБ мощностью от 18 до 400 Вт на напряжения 127, 220 и 380 В и номинальные скорости от 1370 до 2900 об/мин; АВЕ мощностью от 10 до 400 Вт; УАД мощностью от 1 до 70 Вт в однофазном режиме и некоторые другие типы однофазных АД.

Отметим, что однофазные АД по сравнению с трехфазными обычно имеют несколько худшие технические характеристики. Так, мощность однофазного АД составляет не более 70% от мощности трехфазного АД в том же габарите. Однофазные АД, кроме того, имеют и более низкую перегрузочную способность.

**Схема включения и характеристики однофазного АД.** Однофазные АД имеют на статоре две обмотки – основную (рабочую) и пусковую, которая используется для пуска АД. Ротор однофазного АД выполняется короткозамкнутым в виде беличьей

клетки. Рассмотрим вначале работу однофазного АД в режиме, когда пусковая обмотка отключена.

Рабочая обмотка 1 двигателя (рис. 1.4 а) подключается к однофазной сети переменного тока с напряжением  $U_1$  и частотой  $f_1$ . Однофазный ток  $I_1$  этой обмотки создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на два поля  $\Phi_A$  и  $\Phi_B$ , имеющие равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны с одинаковой скоростью  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ .

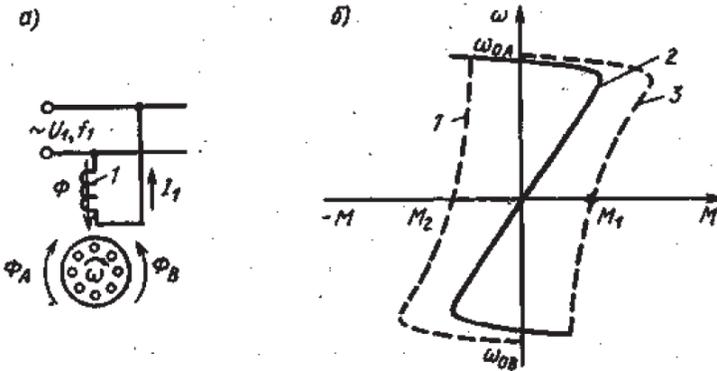


Рис. 1.4. Схема (а) и механические характеристики (б) однофазного АД

### 1.5 Электропривод с синхронным двигателем

Синхронные трехфазные двигатели (СД) широко применяются в ЭП самых разнообразных рабочих машин и механизмов, что объясняется их высокими технико-экономическими показателями. СД имеют высокий коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , близкий к единице и могут даже иметь опережающий  $\cos\varphi$ . Способность СД работать с опережающим  $\cos\varphi$  и отдавать при этом в сеть реактивную мощность позволяет улучшать режим работы и экономичность системы электроснабжения. КПД современных СД составляет 96–98%, что на 1–1,5% выше КПД АД тех же габаритов и скорости. В синхронных двигателях возможно регулирование перегрузочной способности за счет регулирования тока возбуждения, причем перегрузочная способность меньше зависит от напряжения сети по сравнению с АД. Синхронный двигатель об-

ладает абсолютно жесткой механической характеристикой. Важным преимуществом конструкции СД является большой воздушный зазор, вследствие чего его характеристики и свойства мало зависят от износа подшипников и неточности монтажа ротора.

Электротехническая промышленность выпускает несколько серий СД различного назначения. Для общего применения выпускаются двигатели серии СД2 и СД3 мощностью от 132 до 1000 кВт, СДН-2 и СДН-3 на мощность от 315 до 4000 кВт с напряжением питания 380 и 6000 В. В приводе вертикальных насосов используются двигатели ВДС и ВДС2 мощностью от 4000 до 12 500 кВт и ВСДН на мощность от 630 до 3200 кВт. Промышленность изготавливает и СД во взрывоопасном исполнении серий СДКП2 (315–5000 кВт) и СТДП (630–12 500 кВт). Кроме того, выпускаются СД, предназначенные для привода быстроходных механизмов (серия СТД), мельниц (СДМЗ и СДСЗ-2), поршневых компрессоров (СДК2) и ряд других.

**Схема включения, статические характеристики и режимы работы синхронного двигателя.** Статор СД выполняется аналогично статору асинхронного двигателя с трехфазной обмоткой, подключаемой к сети переменного тока. Ротор СД имеет обмотку возбуждения и пусковую короткозамкнутую в виде беличьей клетки, предназначенную для пуска СД. Конструктивно ротор СД может быть выполнен явнополюсным и неявнополюсным в виде цилиндра.

В качестве источника для питания обмотки возбуждения СД чаще всего используется генератор 2 постоянного тока небольшой – 0,3–3% мощности СД, называемый возбудителем, который устанавливается на одном валу с СД (рис. 1.5 а).

Регулирование тока возбуждения двигателя  $I_{\text{ВМ}}$  осуществляется изменением с помощью резистора 3 тока  $I_{\text{ВВ}}$  возбуждения 4 возбудителя. Отметим, что в современных схемах автоматического регулирования возбуждения (АРВ) СД широко применяются тиристорные управляемые выпрямители (тиристорные возбудители).

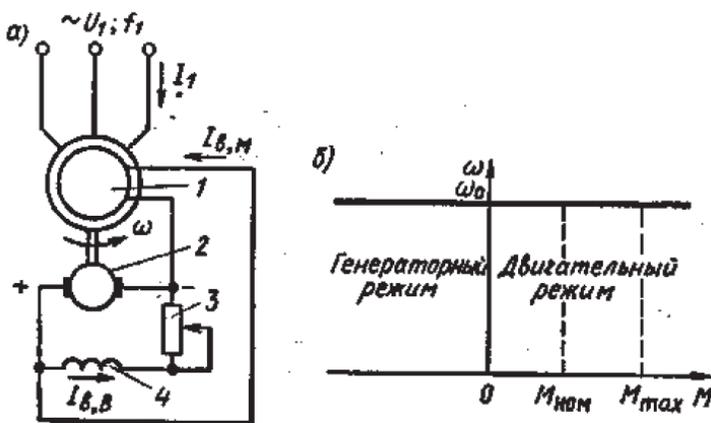


Рис. 1.5. Схема включения (а) и механические характеристики (б) СД

Вращающий момент СД обусловлен взаимодействием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, и магнитного поля, создаваемого обмоткой возбуждения или постоянными магнитами на роторе. Взаимодействие этих полей может создать постоянный по направлению вращающий момент СД только в том случае, когда ротор будет вращаться со скоростью магнитного поля  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ , т. е. синхронно с вращающимся полем.

## 1.6 Электропривод с шаговым двигателем

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В ЭП таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов, образующие основу дискретного ЭП [8].

Широкое распространение дискретного ЭП определяется еще и тем обстоятельством, что он естественным образом сочетается с цифровыми управляющими машинами, программными устройствами и микропроцессорами, которые все шире применяются во всех отраслях техники. Например, дискретный ЭП используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов,

в гибком автоматизированном производстве, в электронной и часовой промышленности и т. д.

ЭП с ШД в настоящее время используется на мощности от долей ватта до нескольких киловатт, что определяется мощностью серийно выпускаемых ШД. Расширение шкалы мощности, дискретного ЭП может быть достигнуто использованием в нем серийных АД, которые за счет соответствующего управления могут работать в шаговом режиме.

Шаговый двигатель по принципу своего действия является синхронным двигателем. Однако в отличие от последнего магнитное поле ШД перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами. Это достигается за счет импульсного возбуждения обмоток ШД с помощью электронного коммутатора, который преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемых к обмоткам (фазам) ШД.

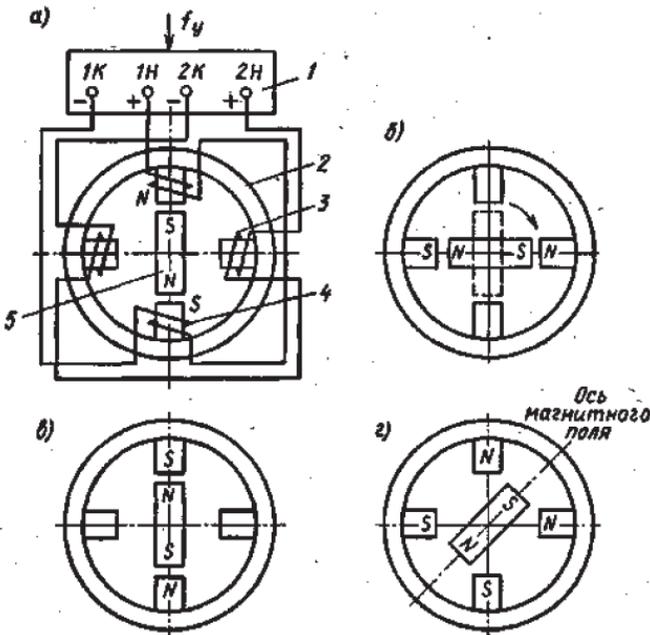


Рис. 1.6. Упрощенная схема ШД с активным ротором

Дискретному характеру напряжения на фазах ШД соответствует дискретное вращение (перемещение) электромагнитного поля в воздушном зазоре, вследствие чего движение ротора состоит из последовательных элементарных поворотов или шагов.

**Принцип действия и основные свойства шагового двигателя.** Принцип получения дискретного перемещения ротора рассмотрим на примере простейшей схемы двухфазного ШД (рис. 1.6).

ШД имеет на статоре две пары явно выраженных полюсов, на которых находятся обмотки возбуждения (управления): обмотка 4 с выводами  $1H - 1K$  и обмотка 3 с выводами  $2H - 2K$ . Каждая из обмоток состоит из двух частей, находящихся на противоположных полюсах статора 2 ШД. Ротор в рассматриваемой схеме представляет собой двухполюсный постоянный магнит 5.

Питание обмоток ШД осуществляется импульсами напряжения, поступающими с устройства управления, которое преобразует одноканальную последовательность входных импульсов управления  $f_y$  в многоканальную по числу фаз ШД.

Рассмотрим работу ШД, предположив, что в начальный момент напряжение подано на обмотку 4. Прохождение тока по этой обмотке вызовет появление магнитного поля статора 2 с вертикально расположенными полюсами  $N - S$ . В результате взаимодействия поля с постоянным магнитом ротора последний займет указанное на рис. 6.12, а равновесное положение, в котором оси магнитных полей статора и ротора совпадают. Положение будет устойчивым, поскольку при отклонении от него на ротор будет действовать вращающий момент (называемый синхронизирующим), который стремится вернуть ротор в положение равновесия

$$M = M_{max} \sin \alpha \quad (1.8)$$

где  $\alpha$  – угол между осями магнитных полей статора и ротора;

$M_{max}$  – максимальный момент.

Допустим, что с помощью блока 1 управления напряжение снимается с обмотки 4 и подается на обмотку 3. В этом случае образуется магнитное поле статора с горизонтальными полюсами (рис. 1.6 б), т.е. магнитное поле статора дискретно совершило поворот на четверть окружности статора. При этом между осями статора и ротора появится угол рассогласования  $\alpha = 90^\circ$  и на ро-

тор будет действовать в соответствии с формулой (1.12) максимальный вращающий момент  $M = M_{max}$ . Под его действием ротор повернется на четверть окружности статора и займет новое устойчивое равновесное положение, показанное сплошной линией на рис. 1.6 б. Таким образом, вслед за шаговым перемещением поля статора совершит такое же шаговое перемещение и ротор двигателя.

Предположим, что отключилась обмотка 3 и вновь подано питание на обмотку 4, но с противоположной по сравнению с рис. 1.6 а полярностью напряжения. Магнитное поле статора опять будет иметь вертикально расположенные полюсы, но другой по сравнению с рис. 1.6 а полярностью. Это означает, что поле совершит еще один шаг на четверть окружности. Снова на ротор будет действовать синхронизирующий момент, который повернет его в положение, показанное на рис. 1.6 в. Следующий шаг в том же направлении ротор может совершить, если будет отключена обмотка 4 и подключена обмотка 3 с обратной полярностью напряжения. И наконец, ротор завершит полный оборот при снятии напряжения с обмотки 3 и подаче напряжения на обмотку 4.

Кроме рассмотренного порядка коммутации обмоток двигателя, обеспечивающего шаговое перемещение ротора на  $90^\circ$ , можно использовать другой способ их коммутации, позволяющий при той же конструкции ШД уменьшить шаг ротора вдвое.

Допустим, что исходное положение ШД соответствует схеме, показанной на рис. 1.6 а. Подключим обмотку 3 с полярностью, соответствующей магнитному полю рис. 1.6 б, не отключая обмотку 4. При этом образуется вторая, горизонтальная система полюсов и магнитное поле будет складываться из магнитных полей горизонтальных и вертикальных полюсов. Ось такого результирующего поля будет располагаться между полюсами с одинаковой полярностью, как это показано на рис. 1.6 г, т. е. ось магнитного поля совершит поворот на  $45^\circ$ . Поэтому ротор при таком порядке возбуждения обмоток ШД повернется тоже на  $45^\circ$ , а не на  $90^\circ$ , как было ранее.

Для совершения следующего шага достаточно снять напряжение с обмотки 4, в результате чего магнитное поле будет соответствовать схеме рис. 1.6 б. Следующее перемещение магнитно-

го поля и ротора на  $45^\circ$  совершится при возбуждении обмотки 4 без отключения обмотки 3 и т. д. Схема коммутации, при которой подключается поочередно одна или две обмотки, называется несимметричной, в отличие от рассмотренной вначале симметричной схемы.

Угловое перемещение ШД в общем случае определяется выражением

$$\alpha = 2\pi/(pn) \quad (1.9)$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора;

$n$  – число переключений (тактов) в цикле, равное числу фаз

ШД при симметричной и удвоенному числу фаз при несимметричной коммутации.

Как видно, шаговое перемещение ротора соответствует последовательности управляющих импульсов, при этом каждому импульсу соответствует одно переключение обмотки ШД (один такт коммутации) и один шаг ротора. Суммарный угол поворота ШД пропорционален числу импульсов, а его скорость – частоте коммутации обмоток  $f_k$ .

$$\omega = \alpha f_k \quad (1.10)$$

Для реверса ШД, например, при симметричной схеме коммутации необходимо изменить полярность напряжения обмотки, которая была отключена на данном такте коммутации. Тогда ротор ШД совершит шаг в противоположном направлении.

Основным режимом работы шагового привода является динамический. В отличие от СД ШД рассчитаны на входение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение. Благодаря этому в шаговом ЭП обеспечивается пуск, торможение, реверс и переход с одной частоты управляющих импульсов на другую. Пуск ШД осуществляется скачкообразным или постепенным увеличением частоты входного сигнала от нуля до рабочей, торможение – снижением ее до нуля, а реверс – изменением последовательности коммутации обмоток ШД.

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРИВОД

### 2.1 Роль гидропривода в современном станкостроении

Понятие «машиностроительная гидравлика» является условным и включает в себя широкий комплекс технических сведений по вопросам прикладной гидравлики вязких жидкостей применительно к гидропередачам машин, в частности и станков, а также комплекс сведений по вопросам конструирования, изготовления и эксплуатации этих передач.

В свою очередь под гидропередачей машин или гидроприводом понимается устройство, служащее для передачи посредством жидкости энергии на расстояние, преобразование этой энергии в энергию движения на выходе системы с одновременным регулированием и реверсированием скорости выходного звена гидропривода, а также преобразованием одного вида движения в другой.

По принципу действия гидропередачи или гидроприводы делятся на объемные (статические) и динамические (турбопередачи).

Мы будем рассматривать лишь вопросы, связанные с применением в машинах объемных гидропередач, в которых необходимые геометрические связи обеспечиваются при помощи тех или иных перемещающихся объемов жидкости (жидкости звеньев).

По виду кинематики движения гидропередачи подразделяются на следующие три вида:

1. Гидропередачи вращательного движения, в которых в качестве исполнительного двигателя используется гидромотор.

2. Гидропередачи прямолинейного возвратно-поступательного движения, в которых в качестве исполнительного двигателя используется гидроцилиндр.

3. Гидропередачи непрямолинейного возвратно-поступательного движения, в которых в качестве исполнительного двигателя используется так называемый моментный цилиндр или квадрант.

По признаку регулирования гидроприводы или гидропередачи можно подразделить на два вида:

1. Регулируемые гидropередачи, в которых соотношения скоростей или соотношение моментов может изменяться в более или менее широком диапазоне.

2. Нерегулируемые передачи.

По способу регулирования скорости гидropередачи или гидropриводы можно подразделить на следующие четыре вида:

1. Гидropередачи дроссельного типа, в которых регулирование скорости осуществляется с помощью сопротивлений, установленных в гидравлических магистралях.

2. Гидropередачи объемного типа, в которых регулирование скорости осуществляется путем одновременного или раздельного изменения рабочего объема насоса или гидродвигателя.

3. Гидropередачи дискретного типа, в которых регулирование скорости осуществляется изменением формы подвижного импульса расхода (рис. 2.1).

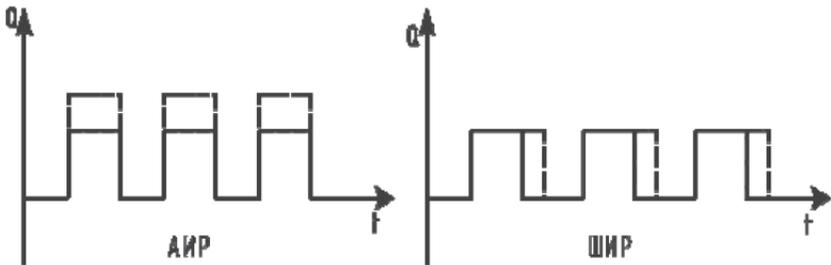


Рис. 2.1. Виды дискретного регулирования:  
АИР – амплитудно-импульсное регулирование;  
ШИР – широтно-импульсное регулирование;  
 $Q$  – расход жидкости;  $t$  – время

Понятия «гидропривод» и «гидropередача» в общем, достаточно близкие. Чаще всего, однако, под гидроприводом понимают устройство, состоящее из той или иной гидropередачи, системы управления, вспомогательных устройств и жидкостных магистралей (трубопроводов).

Энергия жидкости занимает, если можно так сказать, промежуточное положение между электрической и механической энергией. Ее легче передать на значительное расстояние, чем механическую, но гораздо труднее, чем электрическую. Энергия

жидкости так же как и электрическая допускает более точное и простое управление, чем механическая энергия. С точки зрения безопасности все три вида энергии равноценны, если не учитывать того, что защита человека от соприкосновения с механическими элементами несколько сложнее.

С точки зрения коэффициента полезного действия механическая энергия имеет некоторые преимущества, а остальные виды энергии примерно равноценны.

Благодаря легкости передачи на большие расстояния электрическая энергия получила подавляющее распространение. Однако имеется много случаев, когда энергию жидкости применять гораздо более целесообразно, чем электрическую.

Одним из наиболее важных преимуществ гидроприводов перед электроприводами являются малые габариты и высокая весовая отдача (вес, приходящийся на единицу передаваемой мощности). Допустим, мы сравниваем два аналогичных устройства – силовой цилиндр и электромагнит с втягивающимся якорем. Из курса электротехники известно, что любой ферромагнитный материал насыщается при чрезвычайно низкой плотности магнитного потока. Так величина насыщения по плотности магнитного потока для хорошей электротехнической стали составляет 21000 гаусс, что соответствует удельному усилию электромагнита или I «электрическому давлению» 17,5 кг/см. Эту величину нельзя увеличить применением других материалов, даже если использовать очень дорогостоящий сплав пермендюр (сплав кобальта и железа), то эта величина возрастает только до 22 кг/см<sup>2</sup>. Приведенные данные относятся к предельным случаям. Действительные пределы, вероятно, будут составлять половину или даже одну треть этих величин.

Допустимое давление в гидравлическом силовом цилиндре определяется прочностью элементов гидросистемы. В настоящее время гидросистемы, работающие на давлениях 350 кг/см<sup>2</sup> уже не редкость. Таким образом, видно, что удельные силы, получаемые с помощью устройств, использующих энергию жидкости, могут быть в 10–20 раз больше удельных сил, получаемых с помощью электромагнитов. Не следует забывать и такое преимущество гидроцилиндров, как большая длина хода.

Следующее важное преимущество гидроприводов заключается в их быстродействии. Время, характеризующее инерционность привода вращения, может быть определено, при некоторых допущениях, по формуле:

$$t_0 = \frac{J}{M} \omega$$

где  $J$  – момент инерции всех вращающихся масс, приведенных к валу гидро- или электродвигателя;

$M$  – приведенный момент, равный разности моментов движущихся сил и сил сопротивления;

$\omega$  – угловая скорость гидро- или электродвигателя (установившаяся).

Сопротивление веса, момента инерции и габаритов лопастного гидродвигателя МГ 16-16А и соответствующих по мощности и номинальному крутящему моменту асинхронных электродвигателей А71-6 и А72-6 и электродвигателей постоянного тока ПН-145 (табл. 2.1 и рис. 2.2) показывают, что гидродвигатель имеет в 50–70 раз меньший момент инерции, в 2,5–3,5 раза меньший вес и значительно меньшие габариты, чем соответствующие электродвигатели. Подобное же состояние имеет место и для других типоразмеров двигателей.

В силу гораздо более высокой весовой отдачи гидроприводов по сравнению с электроприводами, инерционность гидропривода во много раз меньше. Ввиду ничтожно малого момента инерции движущихся частей гидродвигателя ничтожно малым будет время реверса и достижения им максимальных оборотов.

Так, время реверса на холостом ходу для гидромотора МГ 151 с 1000 до 1000 об/мин при давлении в системе  $50 \text{ кг/см}^2$  равно 0,01 с.

Таблица 2.1

## Сравнительные характеристики различных двигателей

| Характеристика                     | Электродвигатели асинхронные |        | Электродвигатели постоянного тока ПН-145 | Гидродвигатели лопастные МГ 16-16А |
|------------------------------------|------------------------------|--------|--|------------------------------------|
|                                    | А71-6                        | А72-6  |  |                                    |
| Номинальный крутящий момент, кгм   | 14                           | 20     | 13,5 – 10,6                              | 15                                 |
| Эффективная мощность, кВт          | 14                           | 20     | 21 – 8,5                                 | 15                                 |
| Вес, кг                            | 205                          | 230    | 330                                      | 86                                 |
| Момент инерции, кгс/с <sup>2</sup> | 0,0383                       | 0,0485 | 0,051                                    | 0,000708                           |

К недостаткам гидравлических приводов следует отнести:

1. Потери на трение жидкости в трубопроводах и в местах изменения скорости или направления ее течения. Потери эти резко возрастают с увеличением скорости, понижают КПД установки и ограничивают допускаемую скорость жидкости, применяемую обычно до 10–20 м/сек, а при вращательном движении – не более 3500 об/мин.

2. Внутренние и наружные утечки жидкости через уплотнения и зазоры, снижающие скорости движения и КПД привода и требующие во многих случаях, для избежания утечки, высокой точности изготовления сопрягаемых деталей.

3. Неравномерность подачи жидкости и движений механизмов, вызывающие в некоторых системах необходимость регулирования органов настройки при изменениях температуры и вязкости рабочей жидкости во время работы механизмов.

4. Отсутствие возможности, вследствие утечек и сжимаемости жидкости, простыми механизмами точно координировать движения, например, в кинематических цепях для нарезания резьбы или в делительных цепях зуборезных станков.

5. Проникновение воздуха в рабочую жидкость, вызывающее неравномерное толчкообразное движение.

6. Сжатие и расширение труб при работе гидравлических систем, расшатывающее и ослабляющее соединения и уплотнения.

7. Огнеопасность применяемых в качестве рабочей жидкости минеральных смазочных масел.

Типовая схема гидропривода (рис. 2.4) может быть изображена в следующем виде:

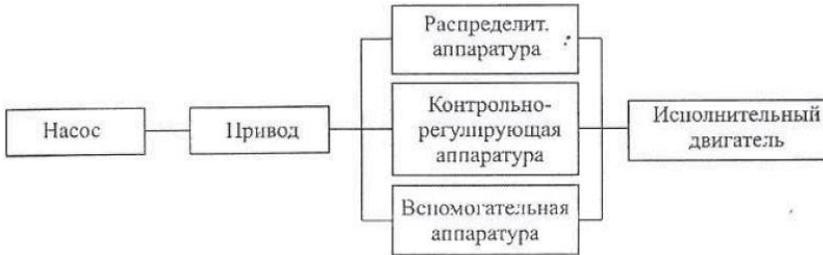


Рис. 2.2. Типовая схема гидропривода

Основным агрегатом гидросистемы является насос, который преобразует механическую энергию привода (входного звена) в энергию потока жидкости.

Другим важнейшим элементом гидросистемы является исполнительный двигатель (гидроцилиндр, гидромотор, квадрант), который преобразует энергию потока жидкости в механическую работу выходного звена (вала или штока).

Распределительная аппаратура – это устройство (золотники, краны, клапаны), предназначенное для распределения рабочей жидкости между отдельными участками и магистралями гидросети и для отвода рабочей жидкости в бак.

Контрольно-регулирующая аппаратура – это устройства (клапаны, дроссели), предназначенные либо для управления изменением важнейших параметров гидропривода – давления и расхода масла, либо для поддержания постоянства значений этих параметров.

К вспомогательной аппаратуре относятся обратные клапаны, гидравлические реле времени и давления, гидравлические демпферы, фильтры, аккумуляторы.

Все агрегаты и аппараты гидропривода соединены гидравлическими магистралями, по которым проходит рабочая жидкость, как правило, масло. Гидравлические магистрали выполняются в виде жестких труб, либо шлангов.

Имеется еще одна группа устройств, которые являются необходимым элементом гидравлических копировальных, или как их еще называют – следящих систем. Сюда относятся копировальные приборы, следящие золотники, гидроусилители.

## 2.2 Статика силового цилиндра

Поскольку диаметр цилиндра и штока были выбраны с помощью упрощенного расчета, не принимавшего во внимание различные потери, в некоторых случаях появляется необходимость в корректировании (некотором увеличении) рабочего давления насоса. Уточненное рабочее давление насоса определяется при анализе статики силового поршня. Имеется в виду, что к этому этапу работы уже имеются принципиальная и монтажная схемы гидрофицированного механизма, т. е. уточнено количество и тип гидравлической аппаратуры, имеется примерная схема разводки трубопроводов по станку.

Составляем расчетную схему (рис. 2.3) цилиндра для случая равновесия силового поршня:

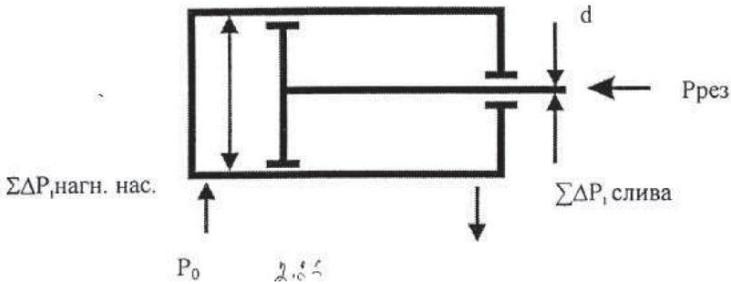


Рис. 2.3. Расчетная схема цилиндра

Сила резания равна:

$$P_{рез} = T_1 + T_2 + T_3$$

где  $T_1$  – сила трения между поршнем и цилиндром, зависит от характера уплотнений, и может быть рассчитана по формулам (см. Хаймович «Гидроприводы и гидроавтоматика станков») или по таблицам (см. Ермаков «Гидравлический привод металлорежущих станков»);

$T_2$  – сила трения в уплотнениях штока также может быть определена по формулам или таблицам в зависимости от вида уплотнения;

$T_3$  – сила трения направляющих станка. Коэффициент трения в направляющих при трогании с места обычно принимается равным  $0,17 \div 0,18$ , а при движении –  $0,07 \div 0,08$ ;

$\sum \Delta P_{i \text{ нагн}}$  – потеря напора в трассе нагнетания не только в трубопроводе и местных сопротивлениях, но и в гидравлической аппаратуре, через которую проходит масло, прежде чем попадает в напорную полость гидроцилиндра. Потери в трубопроводе и местных сопротивлениях определяются по приведенным выше формулам, а потери в аппаратуре – справочным или каталожным данным;

$\sum \Delta P_{i \text{ слив}}$  – аналогичные потери в трассе слива.

Уравнение равновесия силового поршня имеет вид:

$$(P_0 - \sum \Delta P_{i \text{ нагн}}) \frac{\pi D^2}{4} = P_{\text{рез}} + T + \sum \Delta P_{i \text{ слив}} \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (2.1)$$

### 2.3 Динамика гидроцилиндра

Прежде всего, отметим, что динамика гидроцилиндра [3, 4] исследуется далеко не во всех случаях, а главным образом:

- при исследовании быстродействия систем в процессе разгона, торможения, реверса;
- при управлении движением гидроцилиндра по определенному закону;
- при расчете любого копирующего устройства с гидроприводом или плунжером;
- при расчетах любой системы автоматического регулирования с гидроцилиндром.

Расчетная схема гидроцилиндра представлена на рис. 2.4

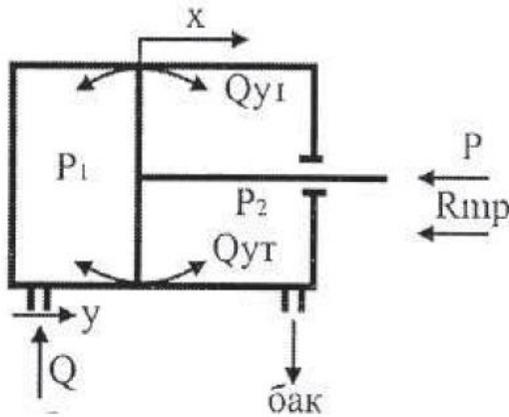


Рис. 2.4. Расчетная схема гидроцилиндра

Здесь:

$x$  – перемещение поршня;  
 $y$  – перемещение сечений рабочей жидкости, находящейся  
 вблизи крайней левой стенки силового гидроцилиндра;

$Q$  – расход жидкости, поступающей в напорную полость  
 гидроцилиндра;

$Q_{ут}$  – утечки в полость слива;

$p_1, p_2$  – давления соответственно в напорной полости и по-  
 лости слива;

$R_{мп}$  – нагрузка в виде трения (считаем эту величину посто-  
 янной);

$P$  – основная рабочая нагрузка на гидроцилиндр. Она может  
 быть трех видов:

- $P$  – сила резания. В этом случае принимают  $P=const$ ;
- пружинная нагрузка  $P=P_0 + cx$ ;
- гидравлическая нагрузка – слив осуществляется через демп-  
 фер (как в любом амортизаторе):

$$P = K \frac{dx}{dt}$$

$M$  – приведенная к гидроцилиндру масса подвижных частей.

Общая формула приведения имеет вид:

$$M = EM_i \left( \frac{V_i}{V_1} \right)^2 + \sum J_i \left( \frac{\omega_1}{V_i} \right)^2$$

В гидроприводах станков с гидроцилиндром вращающиеся элементы, как правило, отсутствуют. Поэтому обычно учитывают массу самого поршня вместе с массой соединенного с ним исполнительного органа (например, суппорта), а также приведенные массы жидкостей, заполняющих напорный и сливной трубопроводы.

Теперь переходим к составлению системы дифференциальных уравнений, описывающих движения силового поршня. Таких уравнений всего три и их нужно рассматривать все вместе.

Первое уравнение – это уравнение сил, составленное в соответствии с принципом Даламбера, а именно: активные силы, реактивные силы и силы инерции в системе взаимно уравновешены.

Активные силы –  $P_1 R_{mp}$

Реактивные силы –  $F(p_1 - p_2)$

Силы инерции –  $M \frac{d_2 x}{dt^2}$

$$F(p_1 - p_2) = M \frac{d_2 x}{dt^2} + P + R_{mp} \quad (2.2)$$

Второе уравнение – это уравнение связи рабочей жидкости и силового поршня. Эта связь осуществляется через упругую среду, поэтому уравнение связи представляет собой уравнение гидравлической пружины:

$$\frac{F(p_1 - p_2)}{K_{ж}} = (y - x) \quad (2.3)$$

Как было показано ранее, величина  $K_{ж}$  не постоянная, а зависит от положения поршня внутри цилиндра. Однако жесткость минимальная в середине хода, именно этот случай часто и принимают в качестве расчетного. Если же необходимо учесть переменную жесткость, то выражают ее через координату  $X$  по формуле, которая приводилась ранее.

Третье уравнение выражает так называемый принцип неразрывности расхода масла. Применительно к гидроцилиндру

этот принцип означает, что расход рабочей жидкости, подаваемой в него:

- 1) перемещает поршень;
- 2) частично поступает в утечки;
- 3) частично компенсирует сжатие масла.

Это можно записать в виде уравнения следующим образом:

$$Q = \frac{dx}{dt} F + \frac{d(y-x)}{dt} F + K_{ym}(P_1 - P_2) \quad (2.4)$$

Решаем совместно уравнения (2.2, 2.3, 2.4):

$$Q = \frac{dx}{dt} F + \frac{d(y-x)}{dt} \cdot \frac{F}{K_{ж}} + K_{ym}(P_1 - P_2)$$

$$Q = \frac{dx}{dt} F + \frac{MF}{K_{ж}} \cdot \frac{d^3x}{dt^3} + \frac{F}{K_{ж}} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{K_{ym}P}{F} + \frac{R_{mp}K_{ym}}{F}$$

$$\frac{MF}{K_{ж}} \cdot \frac{d^3x}{dt^3} + \frac{K_{ym}M}{F^2} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + \frac{1}{K_{ж}} \cdot \frac{dP}{dt} + \frac{K_{ym}(P + R_{mp})}{F^2} = \frac{Q}{F}$$

Обозначим:

$$T = \sqrt{\frac{M}{K_{ж}}}$$

$$\alpha_0 = \frac{P + R_{mp}}{M}$$

$$\xi = \frac{K_m \sqrt{M \cdot K_{ж}}}{2F^2}$$

$$V_0 = \frac{Q}{F}$$

где  $T$  – постоянная времени силового цилиндра;

$\xi$  – коэффициент относительного демпфирования.

Уравнение предстанет в форме, которая всеупотребительна в теории автоматического регулирования:

$$T^2 \frac{d^3x}{dt^3} + 2\xi T \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + 2\xi T \alpha_0 = V_0 \quad (2.5)$$

Это линейное дифференциальное уравнение несложно решить для случая разгона и иногда для случая торможения поршня гидроцилиндра. Например, кривая разгона поршня при резкой,

мгновенной ступенчатой подаче расхода в напорную полость гидроцилиндра будет выглядеть следующим образом:

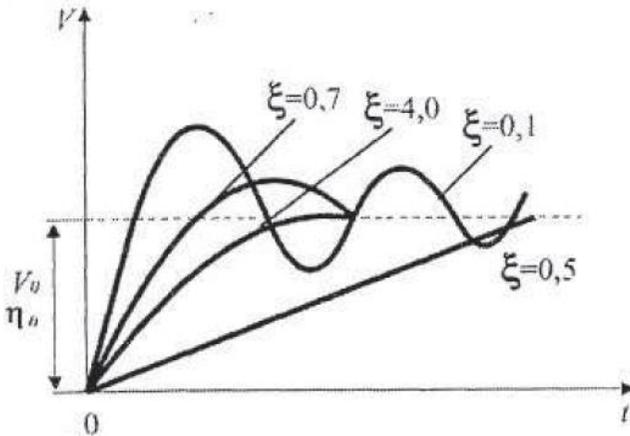


Рис. 2.5. Графики разгона силового цилиндра

Из графиков на рис. 2.5 видно, что величина  $\xi$ , называемая обычно коэффициентом демпфирования системы, полностью определяет форму кривой переходного процесса. Величина  $\xi = 0,7$  называется критическим затуханием, поскольку при любых значениях  $\xi > 0,7$  переходный процесс будет монотонным. Однако большие значения коэффициента демпфирования нецелесообразны, поскольку они затягивают переходный процесс во времени.

## 2.4 Объемное регулирование

Объемное регулирование скорости заключается в изменении производительности насоса либо в изменении объема рабочих камер исполнительного двигателя, либо в том и другом одновременно [5,6]. Для гидроцилиндра без учета различных потерь:

$$V = \frac{Q_{нас}}{F_{цил}} \quad (2.6)$$

поскольку  $F_{цил} = const$  и не изменяется, как правило, то объемное регулирование скорости гидроцилиндра в простейшем

случае осуществляется лишь путем изменения производительности насоса:

$$Q_{\text{нас}} = q \cdot n$$

где  $q$  – объем жидкости за 1 оборот насоса.

При объемном регулировании за счет насоса можно изменять как величину рабочего объема, так и число оборотов приводного электродвигателя. Для ротационного гидромотора без учета потерь:

$$n = \frac{Q_{\text{нас}}}{q_{\text{гидр}}} \quad (2.7)$$

где  $q_{\text{гидр}}$  – количество расхода, необходимое на 1 оборот двигателя. Следовательно, число оборотов ротационного гидромотора может изменяться как за счет производительности насоса, так и за счет изменения объема собственных рабочих камер.

## 2.5 Дроссельное регулирование скорости

Дросселирование – рассеивание (превращение в тепло) энергии потока рабочей жидкости при прохождении ее через местное гидравлическое сопротивление.

Дроссель представляет собой местное сопротивление, устанавливаемое на пути течения жидкости с целью ограничения (регулирования) ее расхода или создания перепада давления, причем под названием «дроссель» понимают местное гидравлическое сопротивление, у которого геометрические размеры рабочего окна или число окон не изменяются от воздействия проходящего через него потока жидкости (в отличие от различных клапанов).

Дроссельный способ регулирования получил широкое распространение потому, что он прост и дешев и не требует применения сложных в изготовлении и эксплуатации регулируемых насосов. Однако он значительно менее экономичный по сравнению с объемным регулированием, поскольку сопряжен с большими или меньшими потерями давления.

Приведем основные схемы включения дросселя при дроссельном регулировании скорости силового поршня (рис. 2.6–2.9).

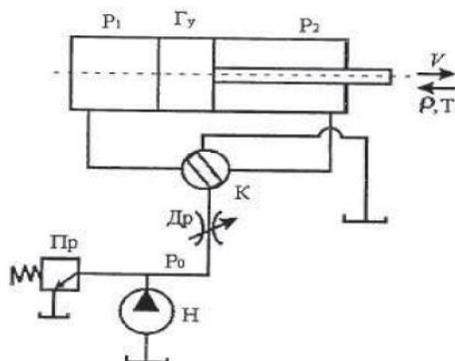


Рис. 2.6. Дросселирование на «входе» (1)

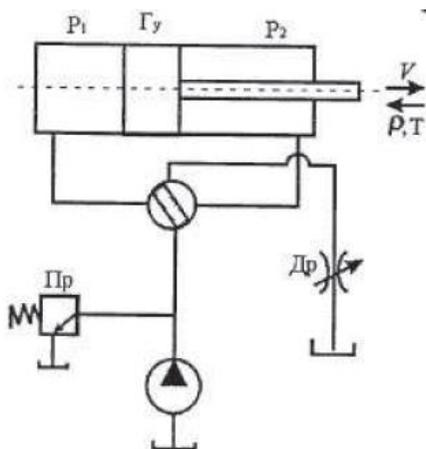


Рис. 2.7. Дросселирование на «выходе» (2)

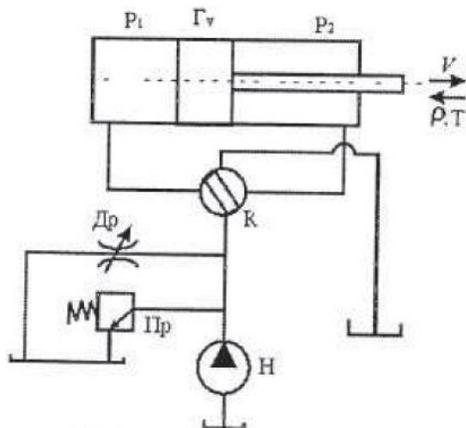


Рис. 2.8. Схема параллельного дросселирования (3)

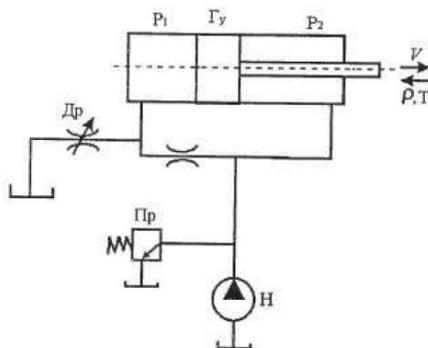


Рис. 2.9. Схема дифференциального регулирования (4)

Итак, во всех случаях дроссельного регулирования перепад давления на дросселе представляет собой функцию нагрузки, причем, чем выше нагрузка, тем меньше перепад давления на дросселе. Формула расхода рабочей жидкости имеет точно такой же вид, как и формула расхода через рабочую щель золотникового распределителя и точно таким же способом она выводится:

$$Q_{др} = \mu f \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P_{др}} \quad (2.8)$$

Из формулы видно, что поскольку перепад давления на дросселе зависит от внешней нагрузки, то расход через дроссель, а, в конечном счете, и скорость гидроцилиндра зависит от внешней нагрузки. Чем выше нагрузка, тем сильнее падает скорость гидроцилиндра.

## 2.6 Дискретное регулирование расхода жидкости

Любой из описанных выше способов регулирования скорости исполнительного двигателя сталкивается с определенными трудностями, если необходимо получить чрезвычайно стабильные расходы рабочей жидкости.

Так, например, при объемном регулировании расхода по мере его уменьшения сильно падает объемный коэффициент полезного действия, что следует из формулы:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{ym}}{Q_0}$$

Утечки жидкости  $Q_{ym}$  остаются неизменными, поскольку они зависят от качества изготовления и сборки гидросистемы, а также и от рабочего давления. При малых расходах исполнительный орган будет перемещаться скачками, с остановками.

Трудность получения малых расходов при дроссельном регулировании связана со следующими его особенностями:

1) при малых площадях рабочих проходных щелей наступает их облитерация. Применение средств, уменьшающих облитерацию, значительно усложняет конструкцию дросселей;

2) дросселирование при малых щелях требует чрезвычайной фильтрации рабочей жидкости;

3) дроссели малых расходов, как правило, должны изготавливаться с более жесткими допусками.

Идея дискретного регулирования заключается в том, чтобы заменить постоянное и малое открытие некоторой рабочей щели периодическим кратковременным открытием этой щели на большую величину. Поясним это на примере. Предположим, необходимо получить некоторый малый расход рабочей жидкости в течение продолжительного времени (рис. 2.10).

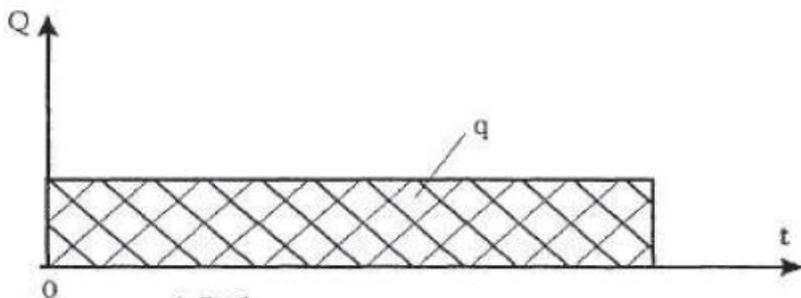


Рис. 2.10. Непрерывная подача расхода

Такой малый расход можно получить с помощью дросселя при малом открытии его рабочей щели. Площадь между прямой расхода и осью абсцисс есть количество рабочей жидкости, поданное в исполнительный двигатель за соответствующее время. Разделим это количество рабочей жидкости на равные порции и изменим форму порций, не меняя их площади, т. е. не меняя среднего за продолжительное время расхода жидкости (рис. 2.11).

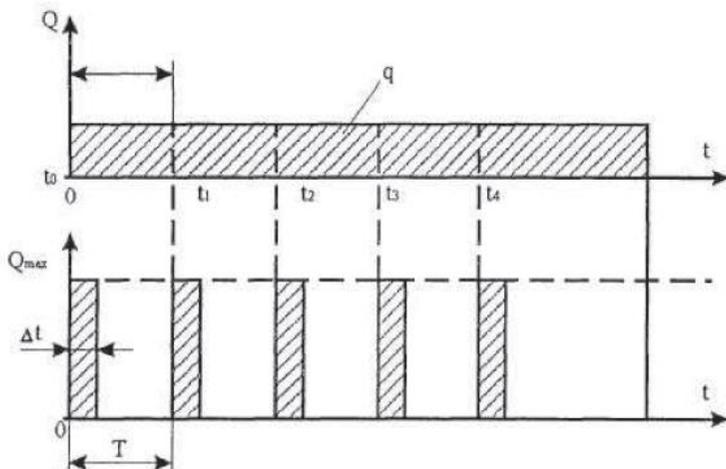


Рис. 2.11. Замена постоянного расхода импульсами расхода

Итак, постоянный расход малой величины заменен импульсами сравнительно большого расхода при неизменном общем ко-

личестве рабочей жидкости, подаваемой в исполнительный двигатель. Вообще говоря, форма этих импульсов могла быть любой, не обязательно прямоугольной, лишь бы сохранялось условие равенства количества жидкости, поданной в гидроцилиндр, в импульсной и непрерывной форме. Однако по ряду соображений, в частности, в отношении простоты реализации, а также и некоторым другим, следует использовать прямоугольную форму импульсов, либо форму, приближающуюся к прямоугольной, например, трапецию с крутыми боковыми сторонами.

Количество жидкости, поданное при дискретном регулировании расхода в гидроцилиндр в импульсной форме, можно оценить по следующей очевидной формуле:

$$q = Q_{max} \frac{\Delta t}{T} t \quad (2.9)$$

где  $Q_{max}$  – амплитудное значение расхода;

$\Delta t$  – длительность импульса;

$T$  – период подачи импульса;

$\frac{\Delta t}{T}$  – плотность заполнения одного периода или так называемая скважность периода  $T$ .

$$S = \frac{\Delta t}{T}$$

Средний расход рабочей жидкости, подаваемой в исполнительный двигатель составит:

$$Q = \frac{q}{t}$$

Теперь получим:

$$Q = Q_{max} \cdot S \quad (2.10)$$

Из формулы видно, что расход, подаваемый в исполнительный двигатель при дискретном импульсном регулировании, пропорционален амплитуде импульса расхода и скважности импульсов. Отсюда вполне понятно, что регулирование расхода может осуществляться как за счет изменения амплитуды так и за счет изменения скважности. Следовательно, принцип дискретного ре-

гулирования расхода в самой своей основе гораздо богаче иных методов регулирования.

Регулирование величин  $Q_{max}$  и  $S$  теоретически возможно в любых пределах, на практике – с некоторыми оговорками, на которых мы сейчас и остановимся.

Амплитуду импульсов  $Q_{max}$  целесообразно делать большей. При этом в значительной степени уменьшается возможность засорения рабочих щелей, а рабочие элементы, образующие щель, могут изготавливаться с пониженными допусками. Кроме того, уменьшаются местные потери, т. е. падение давления рабочей щели. Таким образом, величина  $Q_{max}$  ограничена некоторым образом снизу. Сверху же эта величина может быть ограничена лишь конструктивными особенностями дискретного регулятора расхода.

Определенным недостатком дискретного способа регулирования расхода следует считать некоторую неравномерность скорости движения исполнительного двигателя. Эта неравномерность особенно существенна при низких частотах подачи импульсов. Чем выше частота, тем меньше неравномерность скорости, поскольку высокочастотные колебания демпфируются, т. е. сглаживаются в исполнительном двигателе. Практически в качестве нижнего предела частоты подачи импульсов можно рекомендовать частоту 20 герц. Увеличение частоты сверх этого значения будет всегда благоприятным.

Итак, изобразим графически возможные способы дискретного регулирования расхода.

1. Амплитудно-импульсное регулирование (АИР) – за счет изменения амплитуды (рис. 2.12).

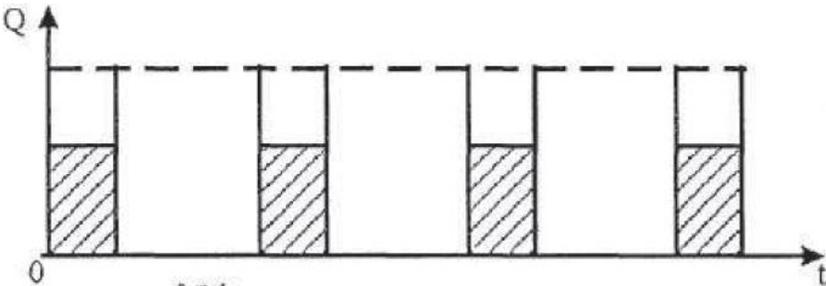


Рис. 2.12. Амплитудно-импульсное регулирование

2. Широтно-импульсное регулирование (ШИР) – за счет изменения скважности (рис. 2.13).

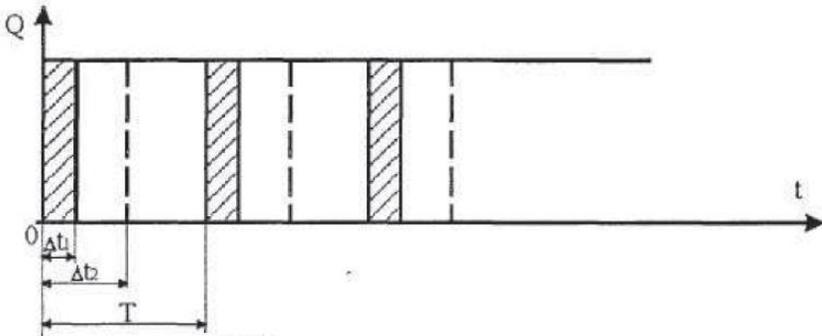


Рис. 2.13. Широтно-импульсное регулирование

### 3. ПНЕВМОПРИВОД

Пневматические системы управления (ПСУ) наряду с электрическими и гидравлическими системами являются одними из наиболее эффективных средств автоматизации и механизации производственных процессов. Достаточно сказать, что в наиболее развитых капиталистических странах около 30% всех автоматизированных процессов оснащено ПСУ.

Оснащение ПСУ машин и оборудования составляет (от общего выпуска): упаковочных машин до 90%; сварочных и литейных машин до 70%; автоматических манипуляторов до 50%; кузнечнопрессовых машин более 40%; угледобывающих машин более 30%; прачечного оборудования до 40%; текстильных и обувных машин, деревообрабатывающего и пищевого оборудования 20%.

Преимущества ПСУ особенно проявляются при механизации и автоматизации следующих наиболее массовых операций: зажима деталей, их фиксации, кантовании, сборке, контроле линейных размеров, транспортировании, упаковке и других, что позволяет исключить или свести до минимума участие человека в тяжелых и монотонных работах, при этом производительность труда на этих операциях возрастает в 1,5–4 раза.

Широкому внедрению ПСУ в машиностроении способствуют их положительные качества: относительная простота конструкции и эксплуатационного обслуживания, а следовательно, низкая стоимость и быстрая окупаемость затрат; надежность работы в широком диапазоне температуры, высокой влажности и запыленности окружающей среды; пожаро- и взрывобезопасность; большой срок службы, достигающий 10 000–20 000 ч (10–50 млн циклов): высокая скорость перемещения выходного звена пневматических исполнительных устройств (линейного до 15 м/с, вращательного до 100 000 об/мин); легкость получения и относительная простота передачи энергоносителя (сжатого воздуха), возможность снабжения им большого количества потребителей от одного источника; отсутствие необходимости в защитных устройствах при перегрузке (пневмодвигатели могут быть заторможены до полной остановки без опасности повреждения и могут оставаться под нагрузкой практически без потребления энергии).

К основным недостаткам ПСУ следует отнести сравнительно малую скорость передачи сигнала на значительные расстояния, сложность обеспечения плавного перемещения рабочих органов пневматических исполнительных устройств при колебаниях нагрузки и относительно высокую стоимость энергоносителя (сжатого воздуха). Однако для большинства автоматизируемых объектов в машиностроении параметры ПСУ приемлемы, кроме того, указанные недостатки могут быть частично или полностью устранены путем применения комбинированных пневмоэлектрических или пневмогидравлических систем управления.

В отечественном машиностроении используются системы, реализованные на пневматической технике трех уровней давления: высокого 0,2–1,6 МПа, среднего 0,1–0,25 МПа и низкого 0,001–0,01 МПа.

Характерной чертой развития ПСУ в современном машиностроении является использование пневматических устройств не только в силовых приводах, но и в системах управления для программирования, контроля и управления рабочими процессами в автоматических линиях, манипуляторах и других машинах.

Пневматические устройства делят на следующие основные группы.

*Исполнительные устройства*, предназначенные для преобразования энергии сжатого воздуха в механическую энергию выходного звена привода, воздействующего на рабочий орган машины. В машиностроении исполнительными устройствами в большинстве случаев являются пневмодвигатели.

*Распределительные устройства*, предназначенные для изменения направления потоков сжатого воздуха в линиях (трубопроводах и каналах), соединяющих устройства в приводе.

*Управляющие устройства*, предназначенные для обеспечения заданной последовательности перемещения исполнительных устройств в соответствии с заданным законом их движения. Совокупность управляющих устройств, т. е. логических элементов и элементов обратной связи (ЭОС) составляет пневматическую систему.

### **3.1 Общие сведения о пневматических устройствах и системах**

Рабочим телом в пневматических системах управления является сжатый воздух, представляющий собой механическую смесь азота, кислорода (по объему примерно 78 и 21% соответственно) и других газов, содержащихся в небольшом количестве (аргон, углекислый газ и т. д.), а также водяного пара.

Основными и наиболее распространенными параметрами, характеризующими состояние сжатого воздуха, являются давление, температура и удельный объем (или плотность).

Давление  $p$  представляет собой силу, действующую по нормали к поверхности тела и отнесенную к единице площади этой поверхности. Атмосферным давлением условно принято считать давление, которое уравнивается столбом ртути высотой 760 мм, что соответствует среднему давлению атмосферы на уровне моря. Давление, отсчитываемое от величины атмосферного давления, называют избыточным или манометрическим. Его измеряют манометрами и указывают в технических характеристиках пневматических устройств.

В теоретические зависимости всегда подставляют абсолютное давление, которое равно сумме избыточного и атмосферного (барометрического) давлений и является параметром состояния газа.

В системе СИ единицей измерения давления служит паскаль (Па). Паскаль равен давлению, вызываемому силой в 1 Н (ньютон), равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м<sup>2</sup>. 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>.

Удельный объем представляет собой объем, занимаемый единицей массы вещества

$$v = V/m$$

где  $V$  и  $m$  – соответственно объем и масса газа.

Величину, обратную удельному объему, называют плотностью

$$\rho = 1/v = m/V$$

Иногда используют понятие удельного веса, под которым понимают вес вещества в единице его объема

$$\gamma = \rho g$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

### 3.2 Структура пневматических систем и устройств

Пневматическая система – это техническая система, состоящая из устройств, находящихся в непосредственном контакте с рабочим газом (воздухом).

Энергию сжатого воздуха промышленных пневматических систем используют для приведения в движение механизмов и машин, автоматического управления технологическими процессами, пескоструйной очистки, перемешивания растворов, распыления красок, транспортирования сыпучих материалов, дутья в доменные печи и т. п. Наибольшее применение энергия сжатого воздуха получила в пневмоприводах.

Классификация промышленных пневмоприводов по различным признакам приведена на рис. 3.1 [18]. В компрессорном пневмоприводе сжатый воздух подается в пневмодвигатель компрессором. В аккумуляторном приводе сжатый воздух поступает в пневмодвигатели из пневмоаккумулятора, предварительно заряженного от внешнего источника, не входящего в состав привода. Наиболее широкое распространение в промышленности нашли магистраль-

ные пневмоприводы, в которых сжатый воздух подается в пневмодвигатели от пневмомагистрали (заводской, цеховой и т. п.), не входящей в состав привода. Пневмоприводы, в которых сжатый воздух из пневмодвигателя поступает в атмосферу, называют приводами с разомкнутой циркуляцией. В пневмоприводах с замкнутой циркуляцией сжатый воздух из пневмодвигателя поступает во всасывающую пневмолинию.



Рис. 3.1. Классификация пневмоприводов

Основные элементы, входящие в состав пневмоприводов, приведены на рис. 3.2.

### 3.3 Пневмодвигатели

В пневмодвигателях энергия сжатого воздуха преобразуется в энергию движения выходного звена. Они предназначены для приведения в движение рабочих органов машин, выполнения различных вспомогательных операций и т. п. Различают пневмодвигатели с поступательным движением выходного звена; поворотные с ограниченным углом поворота выходного звена; пневмодвигатели с неограниченным вращательным движением выходного звена (пневмомоторы).

Пневмодвигатели с поступательным движением выходного звена разделяют на поршневые, мембранные, сильфонные, камерные

и шланговые. Наибольшее распространение получили поршневые пневмодвигатели, которые называют также пневмоцилиндрами. Различают двухпозиционные и многопозиционные двигатели.

Поворотные пневмодвигатели могут быть поршневыми или пластинчатыми. Пневмомоторы по конструктивным признакам разделяют на поршневые, мембранные, пластинчатые, винтовые и турбинные.

Остановимся подробнее на некоторых наиболее распространенных типах двигателей.

### **3.4 Поршневые пневмодвигатели**

В пневмоцилиндрах происходит преобразование потенциальной энергии сжатого воздуха в механическую энергию поршня.

**В пневмоцилиндрах одностороннего действия** давление сжатого воздуха действует на поршень только в одном направлении, в другую сторону поршень со штоком перемещается под действием внешних сил или пружины. Такие пневмоцилиндры с пружинным возвратом обычно используют для выполнения небольших перемещений (0,8–1,5) D так как встроенная пружина, сжимаясь, значительно снижает усилие, развиваемое поршнем.

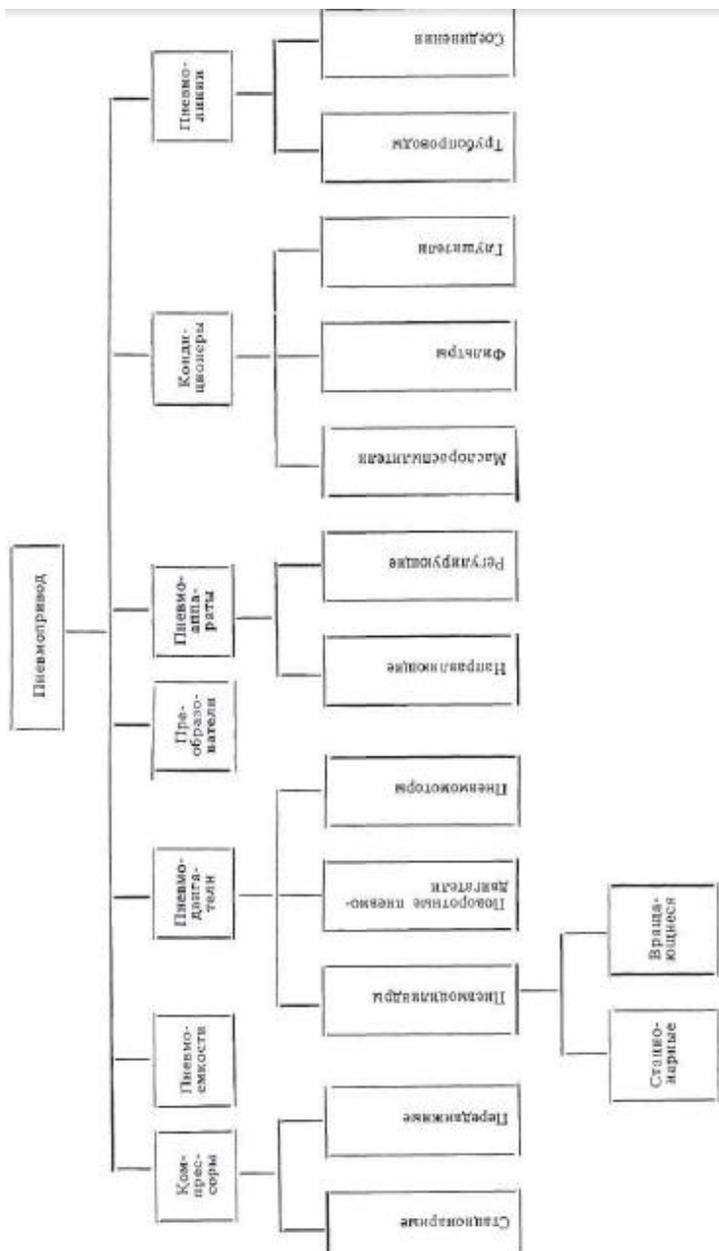


Рис. 3.2. Основные элементы пневмопривода

## **4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДАМИ**

Как правило, автоматическая система управления приводами составляется интуитивно на основе опыта, но, все же отметим, что применение того или иного аппарата управления зависит от конкретного привода.

Сформулируем основные требования при составлении реальной схемы автоматического управления:

1. Схема системы управления приводами должна обеспечивать нормальное применение технологического процесса.

2. Количество применяемых аппаратур должно быть минимальным, что дает значительный экономический эффект: низкая стоимость, малый вес и габариты, высокая надежность (уменьшение вероятности выхода из строя системы).

3. Аппаратуры должны быть стандартными и нормализованными в пределах отрасли, количество оригинальных устройств должно быть минимальным, что дает уменьшение времени на проектирование, удешевляет его стоимость и гарантирует работоспособность системы, поскольку стандартные устройства не нуждаются в экспериментальной проверке.

4. Решать вопросы компоновки таким образом, чтобы выполнялись следующие условия: малые массы и габариты, устройство управления, настройки, возможность быстрой переналадки автоматической системы на другой режим.

5. Необходимо стремиться по возможности, к использованию одного вида энергоносителя, например, электрического или компилированной системы – электромеханическая, электрогидравлическая, используя преимущества электрического (высокая скорость передач команд управления) и гидравлического (высокое быстрдействие, большие усилия и момент).

6. Предусмотреть возможность наладочных операций, то есть возможность работы элементов системы самостоятельно.

7. При конструировании оригинальных элементов следует обращать внимание на простоту конструкции, технологии изготовления, простоту монтажа, настройки и ремонта.

8. Рабочие характеристики приводов – это сравнение таких качеств, как точность, надежность, быстродействие, малые величины статических и динамических ошибок регулирования и устойчивость объекта при различных режимах работ.

## **5. НАЗНАЧЕНИЕ, СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект является завершающим этапом в овладении студентами дисциплиной «Основы приводов» и представляет собой самостоятельную работу, посвященную разработке, расчету и проектированию различных приводов и систем управления технологическими процессами, происходящими в объектах.

Выполнение курсового проекта позволяет студенту получить: навыки разработки приводов к конкретным объектам, умение производить сравнения нескольких схем и обосновать выбранную, производить расчет и выбор его элементов, навыки разработки конструкции, рабочих чертежей оригинальных элементов и умения проведения теоретических исследований, подтверждающих их работоспособность.

Объем курсового проекта: 2 листа А1 графики, содержащих принципиальную схему привода и автоматического управления математических моделей отдельных элементов и всей системы, конструкции оригинальных элементов и связь объекта с автоматической системой управления.

Расчетно-пояснительная записка с объемом страниц – 30/40, в которой содержится постановка задачи, ее актуальность, рассмотрение различных решений данной задачи, обоснование выбранного варианта, описание его принципиальной схемы, обоснование выбора и расчета основных элементов с использованием ГОСТов и стандартов, и исследование процессов при их работе.

В связи с тем, что темы каждого курсового проекта, выдаваемые студентам, отличаются друг от друга, не представляется возможности в данном пособии осветить все вопросы, возникающие в процессе проектирования. Однако в данном методическом пособии даны основы проектирования и расчета основных эле-

ментов и в целом управления, которые могут быть использованы для выполнения заданий студентами.

## 6. ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

| №  | Наименование темы  | Подлежит разработке   |
|----|--|---|
| 1  | Автоматическое регулирование асинхронного электродвигателя                                       | Информационное измерительное устройство                                   |
| 2  | Разработка шагового электропривода для дискретного перемещения инструмента станка                | Система управления подачей инструмента                                    |
| 3  | Разработка электродрели для сверления отверстий с однофазным электродвигателем                   | Конструкция электродрели  |
| 4  | Разработка синхронного электропривода и его применение в машиностроении                          | Принципиальная схема применения привода в станках                         |
| 5  | Разработка силового сдвоенного цилиндра и расчет их параметров                                   | Статика и динамика сдвоенного силового цилиндра                           |
| 6  | Разработка плунжерного силового цилиндра и его применение в станках                              | Разработка математической модели и расчет параметров                      |
| 7  | Разработка суммирующего силового цилиндра и его применение для автоматизации цикла работы станка | Расчет скоростей перемещения и усилий для трех случаев рабочих движений   |
| 8  | Разработка силового цилиндра мультипликатора и его применение в машиностроении                   | Расчет основных параметров привода  |
| 9  | Статика и динамика гидромотора   | Разработка математических моделей, определение динамических характеристик |
| 10 | Разработка гидропривода с объемным регулированием  |   |

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев В.П., Сабинин Ю.А.* Основы электропривода. М., Л.: Госэнергоиздат, 1993.
2. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода: учебник для вузов. 8-е изд. М.: Энергоиздат, 2002.
3. *Башарин А.В., Новиков В.А.* Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1990.
4. *Зимин Е.Н., Яковлев В.Н.* Автоматическое управление электроприводами. М.: Высшая школа, 1998.
5. *Сабинин Ю.А., Грузов В.Л.* Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Л.: Энергоиздат, 1995.
6. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Б.А. Ивоботенко, В.П. Рубцов и др.; под ред. М.Г. Ципикина. М.: Энергия, 1985.
7. *Ермаков В.В.* Гидравлический привод металлорежущих станков. М.: Машгиз, 1984.
8. *Богданович Л.Б.* Объемные гидроприводы. Киев: Техника, 1981.
9. *Баишта Т.М.* Гидропривод и гидропневмоавтоматика. М.: Машиностроение, 1984.
10. *Гамынин Н.С.* Гидравлический привод систем управления. М.: Машиностроение, 1982.
11. *Муслимов А.П., Нифадьев В.И., Пахомов П.И.* Расчет и проектирование гидравлических систем машин. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2006.
12. *Моль Р.* Гидропневмоавтоматика / пер. с франц. М.: Машиностроение, 1995.
13. Гидравлические и пневматические силовые системы управления / пер. с англ; под ред. Дж. Блэкборна, Г. Рихтора, Дж. Л. Шереда. М.: Изд-во иностр. литер., 1982.

Составитель:  
*А.П. Муслимов*

## ОСНОВЫ ПРИВОДОВ

Методические рекомендации  
по выполнению курсового проекта  
для студентов по направлениям  
12.03.01, 680100 – «Приборостроение»

Редактор *Е. С. Свиридова*  
Компьютерная верстка – *Э. А. Галяутдинова*

Подписано в печать 06.05.2021.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Офсетная печать.  
Объем 3,25 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 133

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Анкара, д. 2а

