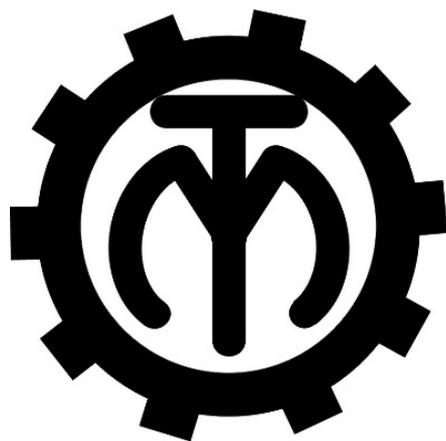


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

# ГИДРАВЛИКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности 1-36 01 04  
«Оборудование и технологии высокоэффективных  
процессов обработки материалов»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 621.5:621.22  
ББК 34.447  
Г46

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения» «09» апреля 2021 г.,  
протокол № 9

Составители: В. М. Шеменков; С. Г. Полторацкий

Рецензент А. П. Смоляр

Приведены методические рекомендации для проведения лабораторных работ  
по дисциплине «Гидравлика и гидравлические машины».

Учебно-методическое издание

## ГИДРАВЛИКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 46 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ.....	5
2 Лабораторная работа № 1. Изучение компонентов ручного управления гидроприводом поступательного и вращательного движений.....	7
3 Лабораторная работа № 2. Изучение способов регулирования скорости выходного звена при помощи дросселя.....	12
4 Лабораторная работа № 3. Изучение способов регулирования давления в гидроприводах.....	16
5 Лабораторная работа № 4. Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель.....	22
6 Лабораторная работа № 5. Изучение компоновок и принципа действия пневмосистем и их компонентов.....	28
Список литературы.....	37

## Введение

Зачастую о гидравлике и ее механизмах слышат, когда речь идет о сложной специализированной и/или тяжелой технике, используемых в различных промышленных сферах деятельности.

Гидравлической системой называют комплекс устройств, способствующих передаче энергии от одних механизмов техники к другим посредством гидравлической рабочей жидкости, находящейся в системе под давлением. Гидравлические системы помогают быстро, без затрат и дополнительных усилий справиться с трудоемкой работой.

Гидросистемы имеются в составе автомобильных транспортных средств, водного, подводного и авиатранспорта. На сегодняшний день уже нельзя представить без участия гидравлической силы работу на крупных строительных объектах, прокладку дорожных полос и сложных транспортных развязок, аграрную деятельность, нефтегазовую промышленность и карьерные работы, жилищно-коммунальную работу в урбанизированных населенных пунктах, а также прочую деятельность, требующую регулярных и активных грузоперевозок. Место гидравлике отведено даже в среде медицинского оборудования.

Целью проведения лабораторных работ по дисциплине «Гидравлика и гидравлические машины» является развитие навыков в разработке и проектировании гидравлических и пневматических систем и машин.

Отчет по лабораторной работе включает следующее:

- цель работы;
- исходные данные, в соответствии со своим вариантом;
- расчеты и их результаты, выполненные в последовательности и записанные в форме, определенной методическими рекомендациями;
- гидравлические и пневматические схемы;
- ответы на контрольные вопросы;
- вывод.

# **1 Инструкция по охране труда при проведении лабораторных работ**

## ***Общие требования безопасности***

1 Допуск студентов к лабораторным занятиям производится только после инструктажа по технике безопасности, о чем делается соответствующая запись в специальном журнале (бланке). Получивший инструктаж подтверждает его прохождение подписью.

2 При проведении лабораторных работ и лабораторного практикума необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, знать места расположения первичных средств пожаротушения.

3 Студентам следует быть внимательными и дисциплинированными, точно выполнять указания преподавателя.

4 Пребывание студентов в лаборатории разрешается только в присутствии преподавателя.

## ***Требования безопасности перед началом работы***

1 Внимательно изучить содержание и порядок проведения лабораторной работы или лабораторного практикума, а также безопасные приемы его выполнения.

2 В случае неисправности оборудования немедленно сообщить об этом преподавателю и до ее устранения к работе не приступать (работать на неисправном оборудовании запрещается).

3 Перед каждым включением оборудования предварительно убедиться, что его пуск безопасен.

## ***Требования безопасности во время работы***

1 Точно выполнять все указания преподавателя при проведении лабораторной работы, без его разрешения не производить самостоятельно никаких работ.

2 Не прикасаться к находящимся под напряжением элементам электрической цепи, к корпусам стационарного электрооборудования, не производить переключений в цепях до отключения источника тока.

3 Постоянно наблюдать за работой оборудования в процессе работы.

4 Запрещается во время работы оборудования снимать ограждения и предохранительные устройства, а также держать их открытыми. Во время работы не касаться руками вращающихся и перемещающихся частей установок, не вводить руки в зону движения.

5 Все подготовительные работы на оборудовании проводить в их обесточенном состоянии или в режиме «Наладка».

6 При обнаружении неисправности в работе электрических устройств, находящихся под напряжением, повышенном их нагревании, появлении искрения, запаха горелой изоляции и т. д. немедленно отключить источник электропитания и сообщить об этом преподавателю.

***Требования безопасности по окончании работы***

- 1 Полностью выключить оборудование.
- 2 Привести в порядок рабочее место.
- 3 Предупредить преподавателя обо всех, даже малейших и незначительных, неисправностях оборудования.

***Требования безопасности в аварийных ситуациях***

- 1 В случае травмирования кого-либо немедленно доложить преподавателю.
- 2 При выходе оборудования из строя (нет освещения, возгорание токопроводов, поломка механических деталей) необходимо:
  - отключить оборудование соответствующим тумблером (обесточить);
  - вынуть вилку из штепсельной розетки;
  - доложить преподавателю о случившемся, а в случае возгорания приступить к немедленной его ликвидации первичными средствами пожаротушения.

## 2 Лабораторная работа № 1. Изучение компонентов ручного управления гидроприводом поступательного и вращательного движений

**Цель работы:** изучение компонентов ручного управления гидроприводом поступательного и вращательного движений.

### Задачи

- 1 Изучение функционального назначения компонентов ручного управления гидроприводами.
- 2 Изучение принципиальных схем и устройства регулирующей гидроаппаратуры.
- 3 Изучение схем управления гидроприводами.
- 4 Сборка стенда согласно гидравлическим схемам и проверка работоспособности.

### 2.1 Основные гидросхемы с ручным управлением

На рисунках 2.1–2.3 изображены принципиальные гидросхемы с ручным управлением возвратно-поступательного и возвратно-вращательного движений при помощи трехпозиционного распределителя с ручным управлением. При установке распределителя в крайние позиции происходит реверсирование выходного звена гидродвигателя, а при установке в нейтральное положение рабочая жидкость заливается в рабочие полости гидродвигателя, вызывая остановку и фиксирование выходного звена гидродвигателя.

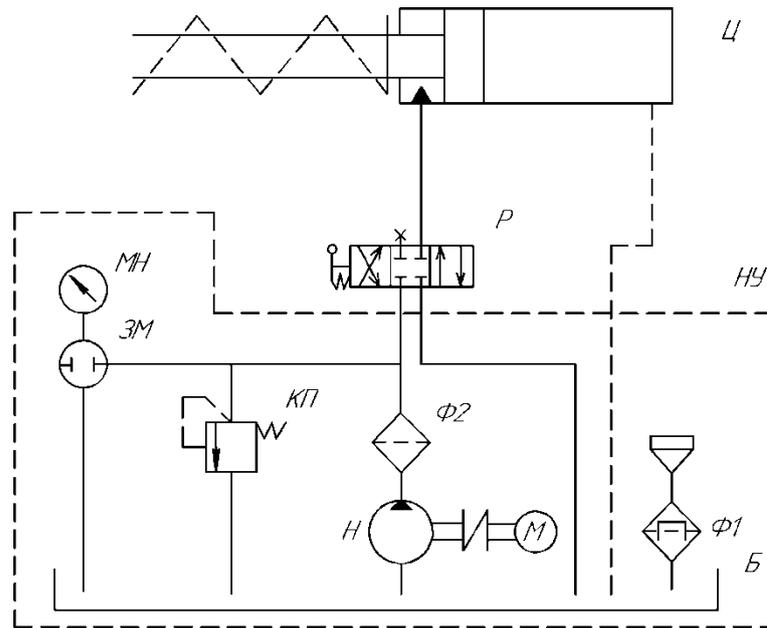
Гидросхема с гидроцилиндром одностороннего действия (см. рисунок 2.1) находит применение в зажимных устройствах. Шток при помощи пружины и при отсутствии давления в штоковой полости производит выдвигание подачей рабочей жидкости в ту же полость. Поршневая полость соединяется дренажной гидролинией с гидробаком.

Трехпозиционный распределитель представлен на рисунке 2.2.

Дифференциальная схема включения одноштокового гидроцилиндра (рисунки 2.3 и 2.4) обеспечивает движение штока с одинаковой скоростью в обе стороны, если  $F_1 = 2F_2$ . В этом случае для преодоления нагрузки  $F_2$  включается правое положение распределителя  $P$ , соединяя штоковую полость гидроцилиндра с напорной линией, а поршневую – со сливом. Для преодоления нагрузки  $F_1$  в случае дифференциальной схемы включения цилиндра включается центральное положение распределителя  $P$ , соединяя обе полости гидроцилиндра с напорной линией; в этом случае за счет разности эффективных площадей поршня шток гидроцилиндра будет выдвигаться. Для свободного выдвигания штока распределитель  $P$  включается в левое положение и поршневая полость соединяется с напорной линией, а штоковая – со сливной магистралью.

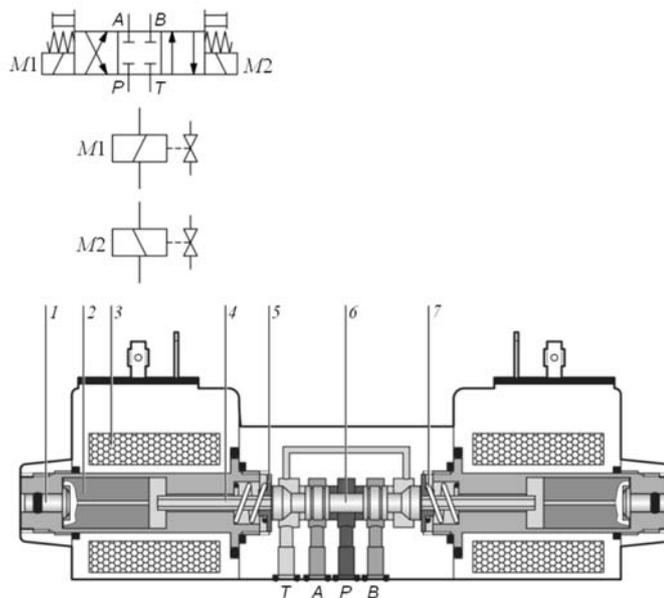
Гидравлическая схема, обеспечивающая вращательное движение при исполь-

зовании гидромотора (рисунок 2.5), предназначена для разного рода установочных поворотных движений.



$\text{Ц}$  – гидроцилиндр одностороннего действия;  $\text{Р}$  – распределитель;  $\text{НУ}$  – насосная установка;  $\text{Н}$  – насос;  $\text{Ф1}$  – фильтр заливной;  $\text{Ф2}$  – фильтр;  $\text{ЗМ}$  – золотник включения манометра;  $\text{КП}$  – клапан предохранительный;  $\text{Ц}$  – цилиндр одностороннего действия;  $\text{МН}$  – манометр

Рисунок 2.1 – Управление гидроцилиндром одностороннего действия с помощью трехпозиционного распределителя



1 – поршень экстренного ручного переключения; 2 – арматура; 3 – соленоид; 4 – шток; 5 – диск опорный; 6 – золотник; 7 – пружина

Рисунок 2.2 – Распределитель FESTO 544347

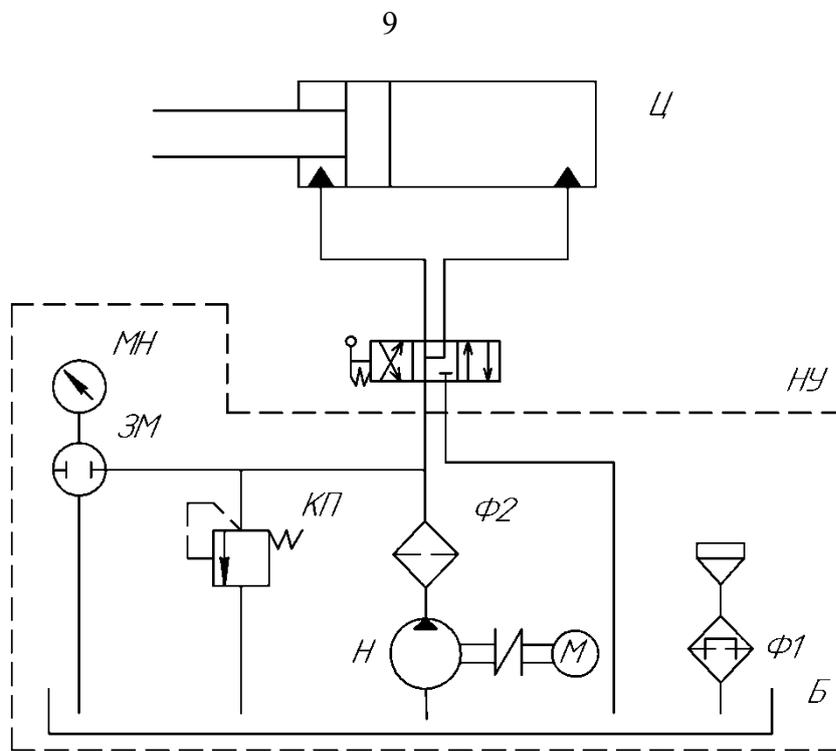
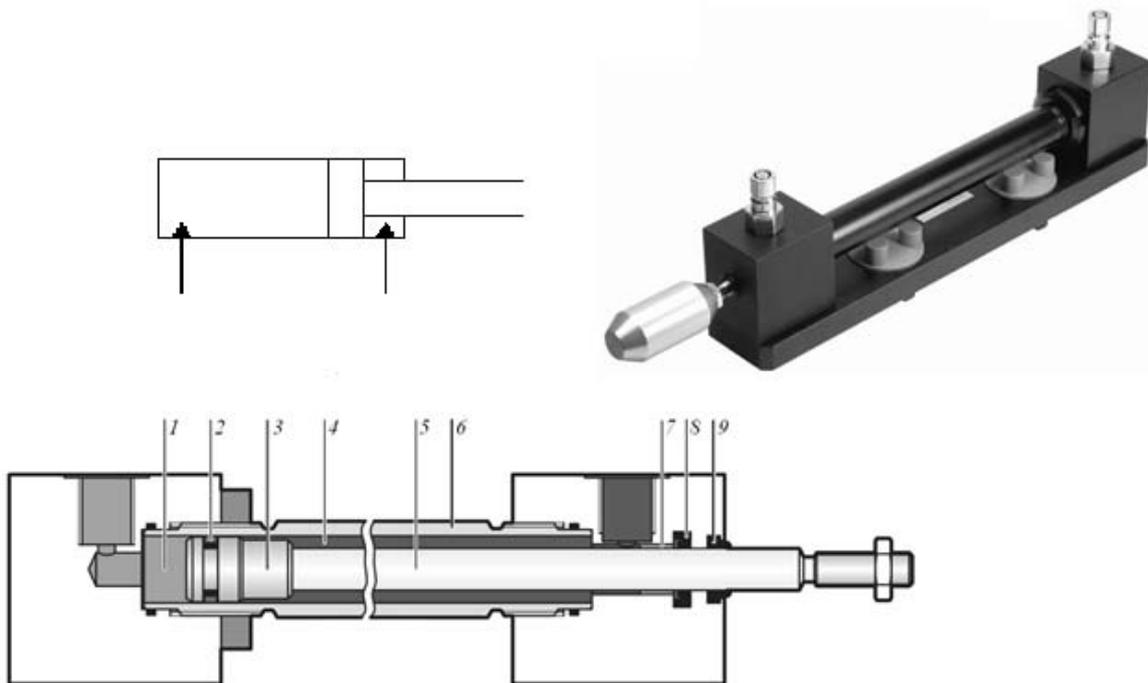
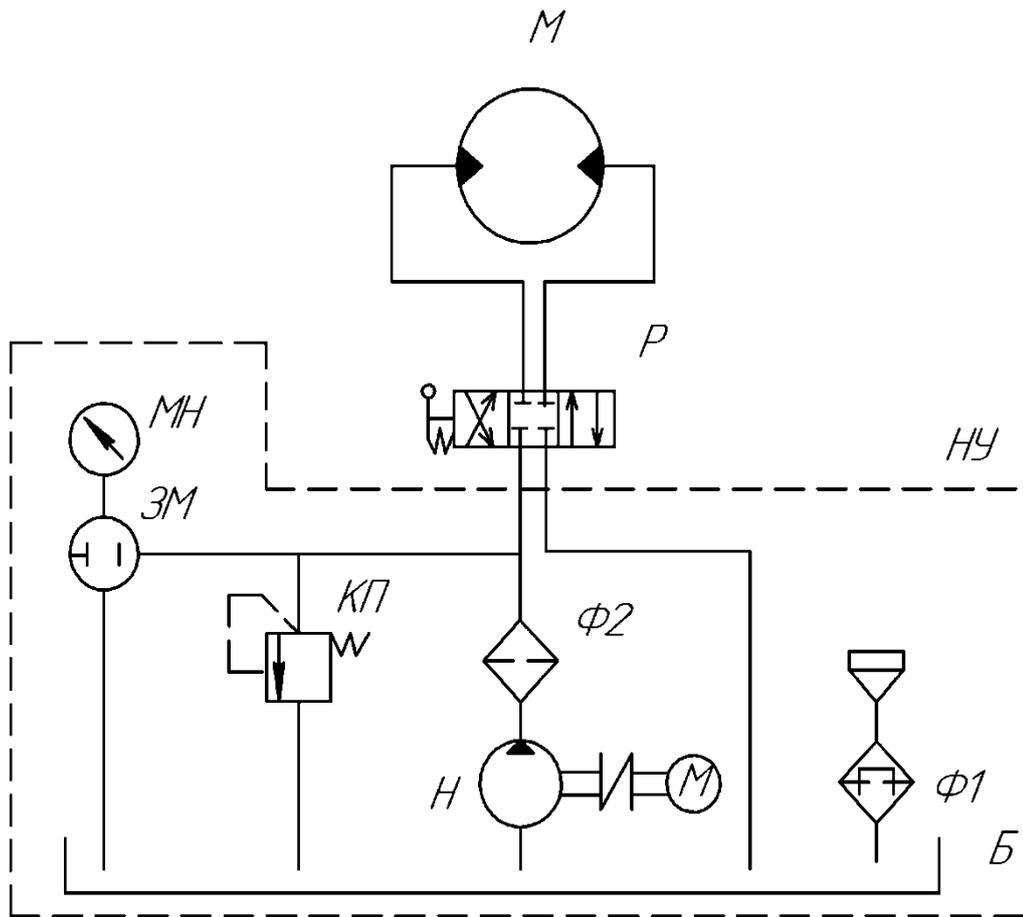


Рисунок 2.3 – Дифференциальная схема включения одноштокового гидроцилиндра



1 – бесштоковая полость; 2 – уплотнение на поршне; 3 – поршень; 4 – штоковая полость; 5 – шток гидроцилиндра; 6 – гильза цилиндра; 7 – направляющая втулка; 8 – уплотнение штока; 9 – пыльник

Рисунок 2.4 – Одноштоковый гидроцилиндр FESTO 152857



*M* – гидромотор

Рисунок 2.5 – Управление реверсивным гидромотором при помощи трехпозиционного распределителя

## **2.2 Порядок выполнения лабораторной работы**

- 1 Ознакомиться с содержанием настоящих методических рекомендаций.
- 2 Смонтировать схемы (см. рисунки 2.1, 2.2, 2.5) на стенде (рисунок 2.6), подключить к насосной установке и убедиться в их работоспособности.
- 3 Изучить движение потоков жидкости в схемах.

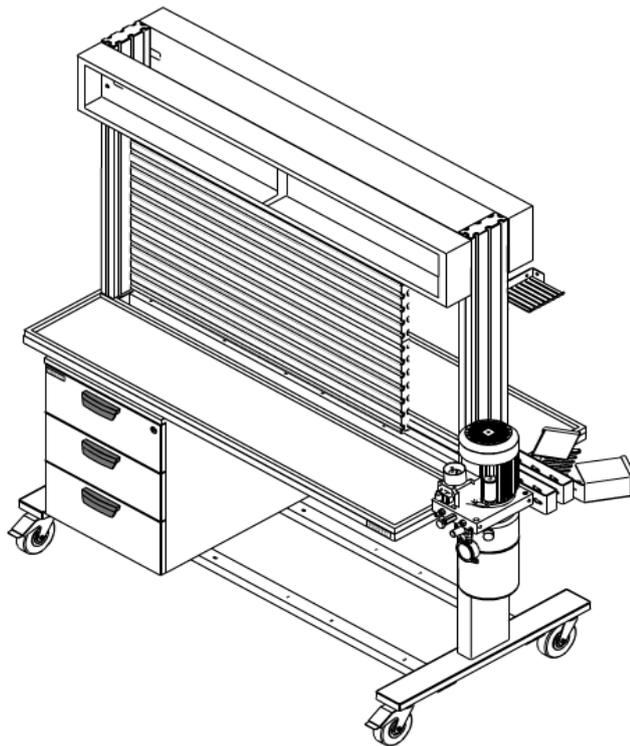


Рисунок 2.6 – Лабораторный стенд

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Движение потоков жидкости в гидросхемах (см. рисунки 2.1–2.3).
- 2 Устройство и принцип работы насоса.
- 3 Устройство и принцип работы гидромотора.
- 4 Устройство и принцип работы гидроцилиндра.
- 5 Устройство и принцип работы гидрораспределителей.
- 6 Дифференциальное подключение гидроцилиндра.

### 3 Лабораторная работа № 2. Изучение способов регулирования скорости выходного звена при помощи дросселя

**Цель работы:** изучение способов регулирования скорости выходного звена при помощи дросселя.

#### Задачи

- 1 Изучение функционального назначения дросселя.
- 2 Изучение принципа действия дросселя.
- 3 Изучение принципа действия обратного клапана.
- 4 Изучение схем возможного подключения дросселя.

#### 3.1 Сведения о дроссельном регулировании

Принцип дроссельного регулирования заключается в том, что часть подачи нерегулируемого насоса отводится через дроссель или клапан на слив, минуя гидродвигатель.

При дроссельном регулировании возможны два принципиально разных способа включения регулирующего дросселя: последовательно с гидродвигателем и параллельно гидродвигателю.

*Конструкция гидравлического дросселя.* Дроссели позволяют изменять расход рабочей жидкости, проходящей через гидролинию.

Дроссель FESTO 152843 состоит из следующих основных компонентов (рисунок 3.1): дроссельный зазор 1, уплотнительный конус 2, пружина 3, шпindel дросселя 4.

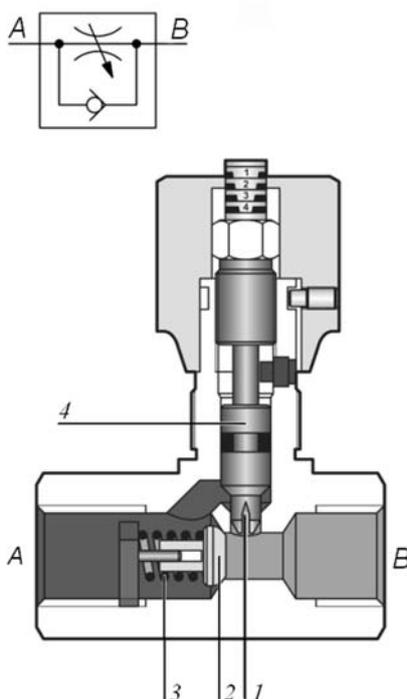


Рисунок 3.1 – Дроссель FESTO 152843

Рабочая жидкость из гидросистемы подводится к отверстию  $A$  аппарата, проходит через дросселирующую щель, образованную фасонным отверстием в корпусе и торцом шпинделя дросселя  $I$ , и отводится через отверстие  $B$ . Расход регулируется путем осевого перемещения шпинделя дросселя с помощью винта. Винт поворачивается от рукоятки с лимбом.

Зависимость между скоростью поршня и нагрузкой  $F$ , пренебрегая всеми гидравлическими сопротивлениями, кроме дросселя (или окон дросселирующего распределителя), находится из формулы

$$V_{\Pi} = \mu \frac{f_{ДР}}{F_{\Pi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \left( P_H \frac{F}{A_{\Pi}} \right)}, \quad (3.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;

$f_{ДР}$  – площадь проходного отверстия дросселя;

$P_H$  – давление, развиваемое насосом;

$A_{\Pi}$  – рабочая площадь поршня.

*Дроссельное регулирование гидропривода при параллельном включении дросселя.* На рисунке 3.4 дана схема гидропривода при включении регулирующего дросселя параллельно гидродвигателю. В точке  $M$  поток рабочей жидкости разветвляется: один поток через распределитель  $P$  направляется в гидроцилиндр  $Ц$ , а другой – в регулирующий дроссель  $ДР$ . Клапан  $КП$  в этом случае является предохранительным. Он открывается при чрезмерном повышении давления в системе.

Скорость  $V_{\Pi}$  выходного звена – штока гидроцилиндра – регулируется изменением степени открытия дросселя. Чем она меньше, тем большая доля подачи насоса направляется в гидроцилиндр и тем больше скорость  $V_{\Pi}$ . При полном закрытии дросселя скорость  $V_{\Pi}$  наибольшая. При полном открытии дросселя скорость поршня уменьшается до нуля или до минимального значения в зависимости от нагрузки.

Для параллельного включения дросселя, предполагая, что потери в распределителе и гидролиниях отсутствуют, зависимость между скоростью поршня  $V_{\Pi}$  и нагрузкой  $F$  находится из формулы

$$V_{\Pi} = \frac{1}{F_{\Pi}} \left( Q_H - \mu f_{ДР} \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{F}{F_{\Pi}}} \right), \quad (3.2)$$

где  $Q_H$  – подача, развиваемая насосом.

На рисунках 3.2–3.4 изображены принципиальные гидравлические схемы.

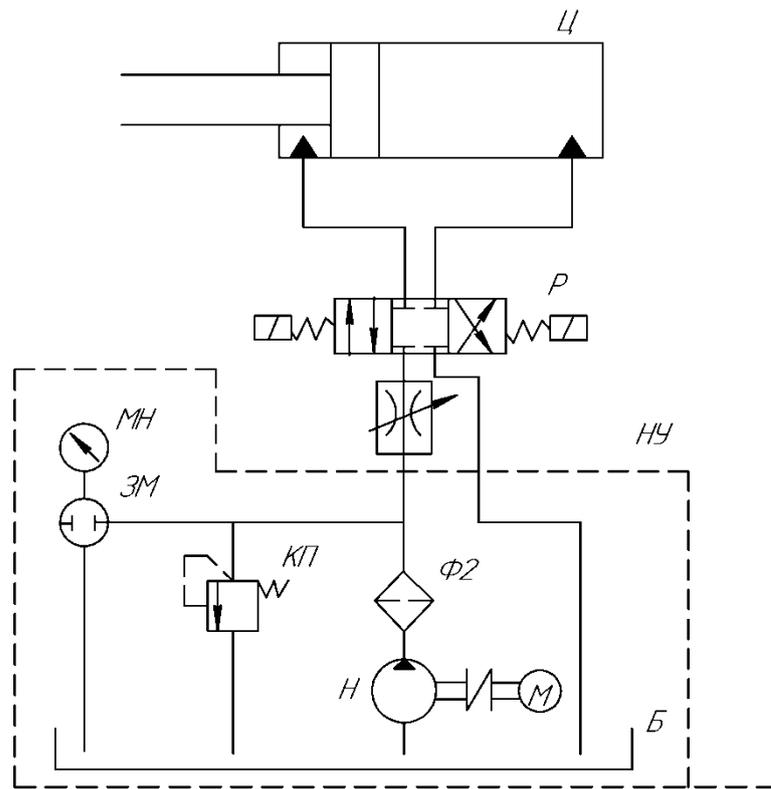


Рисунок 3.2 – Гидравлическая схема с установкой дросселя на напорной магистрали

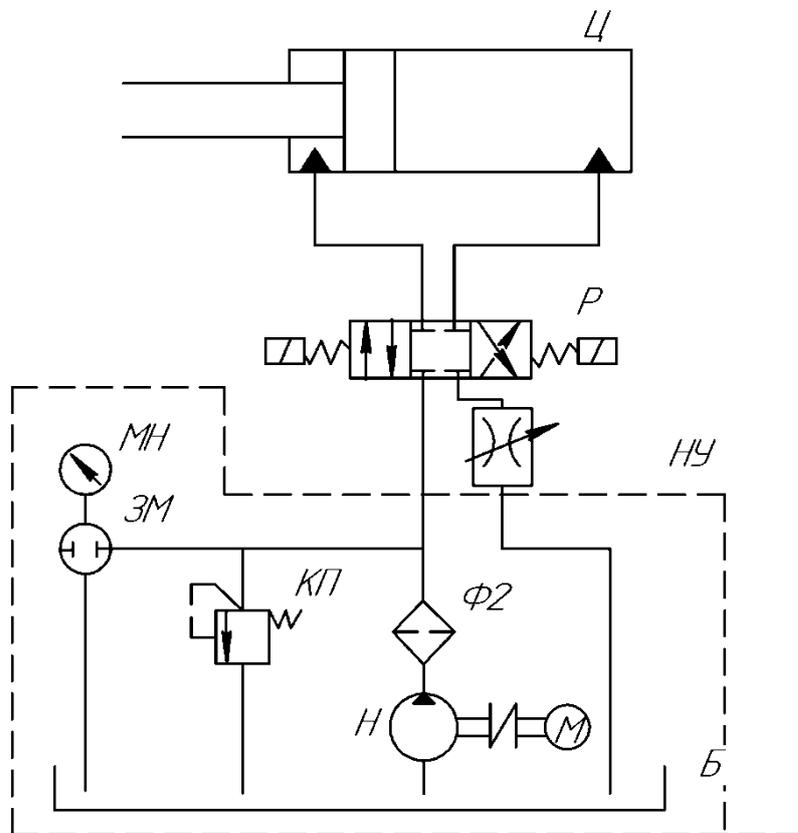


Рисунок 3.3 – Гидравлическая схема с установкой дросселя на сливной магистрали

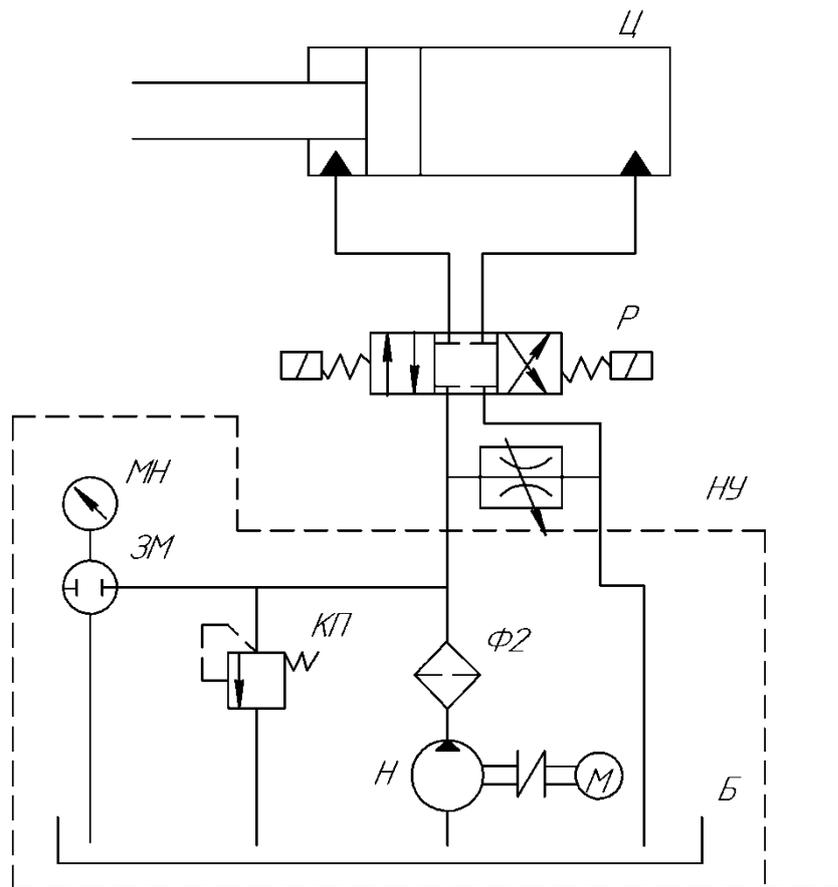


Рисунок 3.4 – Гидравлическая схема с установкой дросселя параллельно гидродвигателю

### 3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с содержанием настоящих методических рекомендаций.
- 2 Смонтировать на стенде схемы по рисункам 3.2–3.4.
- 3 Изучить движение потоков жидкости в названных выше схемах.
- 4 В отчет внести схемы (см. рисунки 3.2–3.4) согласно варианту, выданному преподавателем.

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение и принцип работы гидравлического дросселя.
- 2 Особенности работы гидропривода при различных способах подключения дросселя.

## 4 Лабораторная работа № 3. Изучение способов регулирования давления в гидроприводах

*Цель работы:* изучение способов регулирования давления в гидроприводах.

### *Задачи*

- 1 Изучение способов регулирования давления в гидроприводах.
- 2 Изучение типов гидроклапанов и их назначение.
- 3 Изучение устройства и принципа работы клапанов прямого действия.
- 4 Изучение устройства и принципа работы клапанов непрямого действия.

### *4.1 Общие сведения*

Управление давлением производится гидроаппаратами, носящими название «гидроклапаны давления». Существует много конструкций гидроклапанов давления, но всех их объединяет общий принцип работы – условия протекания рабочей жидкости через клапан давления зависят от давления в каналах управления клапана. Силы, возникающие на запорно-регулирующем элементе клапана от действия давлений управления, сравнивают с усилием пружины, которое также приложено к этому элементу.

В зависимости от того, какие из этих сил больше, запорно-регулирующий элемент перемещается в корпусе клапана в ту или другую сторону и открывает или перекрывает проход рабочей жидкости через гидроклапан. Если пружина клапана действует в сторону перекрытия потока, то такой клапан называют нормально закрытым, если пружина открывает проход для потока жидкости – нормально открытым.

В клапанах прямого действия рабочее проходное сечение изменяется в результате непосредственного воздействия потока рабочей жидкости на запорно-регулирующий элемент. Клапаны непрямого действия представляют собой совокупность двух клапанов: основного и вспомогательного, причем рабочее проходное сечение основного клапана изменяется в результате воздействия потока рабочей жидкости на запорно-регулирующий элемент вспомогательного клапана.

Напорный клапан предназначен для ограничения давлений в подводимом к нему потоке рабочей жидкости. Напорные клапаны разделяют на предохранительные и переливные.

Предохранительные клапаны служат для предохранения гидропривода от давления рабочей жидкости, превышающего установленное. Это клапаны эпизодического действия, т. е. при нормальных нагрузках гидроприводов они закрыты и открываются лишь при давлении рабочей жидкости в гидросистеме, превышающем установленное. Основные технические требования к предохранительным клапанам: высокая герметичность сопряжения седла клапана и стабильность давления настройки клапана.

Переливные клапаны предназначены для поддержания заданного давления и напорной линии путей непрерывного слива рабочей жидкости во время работы. Переливные клапаны отличаются от предохранительных характеристик пружин. Для обеспечения слива рабочей жидкости в большом диапазоне изменения расхода необходимо обеспечить как можно меньшее изменение давления в напорной линии. Для этого используют пружины с возможно меньшей жесткостью. К герметичности переливных клапанов не предъявляют высоких требований. Для промышленного оборудования централизованно не изготавливаются клапаны для работы только в аварийном режиме, в таком случае продолжительные клапаны, как правило, работают в режиме переливных.

Редукционным называется клапан давления, предназначенный для поддержания давления в отводимом от него потоке рабочей жидкости, более низкого, чем давление в подводимом потоке. Редукционные клапаны применяют в гидроприводах, в которых от одного источника питаются несколько потребителей при разных давлениях.

Клапаны давления имеют различные исполнения по конструкции, типу управления, диаметру условного прохода, присоединению и номинальному давлению.

По конструктивному исполнению клапаны давления выпускаются с международными присоединительными размерами.

#### **4.2 Гидроклапаны прямого действия**

В схеме (рисунок 4.1, *а*) гидроклапан давления 4 используется в качестве переливного клапана и служит для поддержания определенного давления масла в линии 3, а клапан 2 – в качестве регулируемого клапана разности давлений, который обеспечивает превышение давления в линии 1 над давлением в линии 3 на величину, определяемую настройкой его пружины.

Клапан обеспечивает в гидросистеме (рисунок 4.1, *б*) блокировку по давлению. Масло от насоса 1 через распределитель 2 поступает в цилиндры зажима 3 и подачи 4, однако первым начинает движение цилиндр 3, а цилиндр 4 – лишь после открытия клапана 5. Гидроклапан (рисунок 4.1, *б*) защищает систему от перегрузки. При выключении электромагнита скорость ограничивается дросселем 5. Гидроклапан давления 4 (рисунок 4.1, *в*) обеспечивает возможность движения цилиндра 3 лишь при заданной частоте вращения гидромотора 2, при которой перепад давлений на дросселе 1 достаточен для преодоления усилия пружины клапана 4. Гидроклапан давления 1 (рисунок 4.1, *г*) настроен на более высокое давление, чем клапан 4, причем давление в линии 2 практически не зависит от давления в линии 3. В гидросистеме (рисунок 4.1, *д*) гидроклапан давления 2 используется в качестве регулируемого клапана последовательности, обеспечивающего начало движения цилиндра 3 лишь после того, как цилиндр 1 доходит до упора, и давление в напорной линии возрастает.

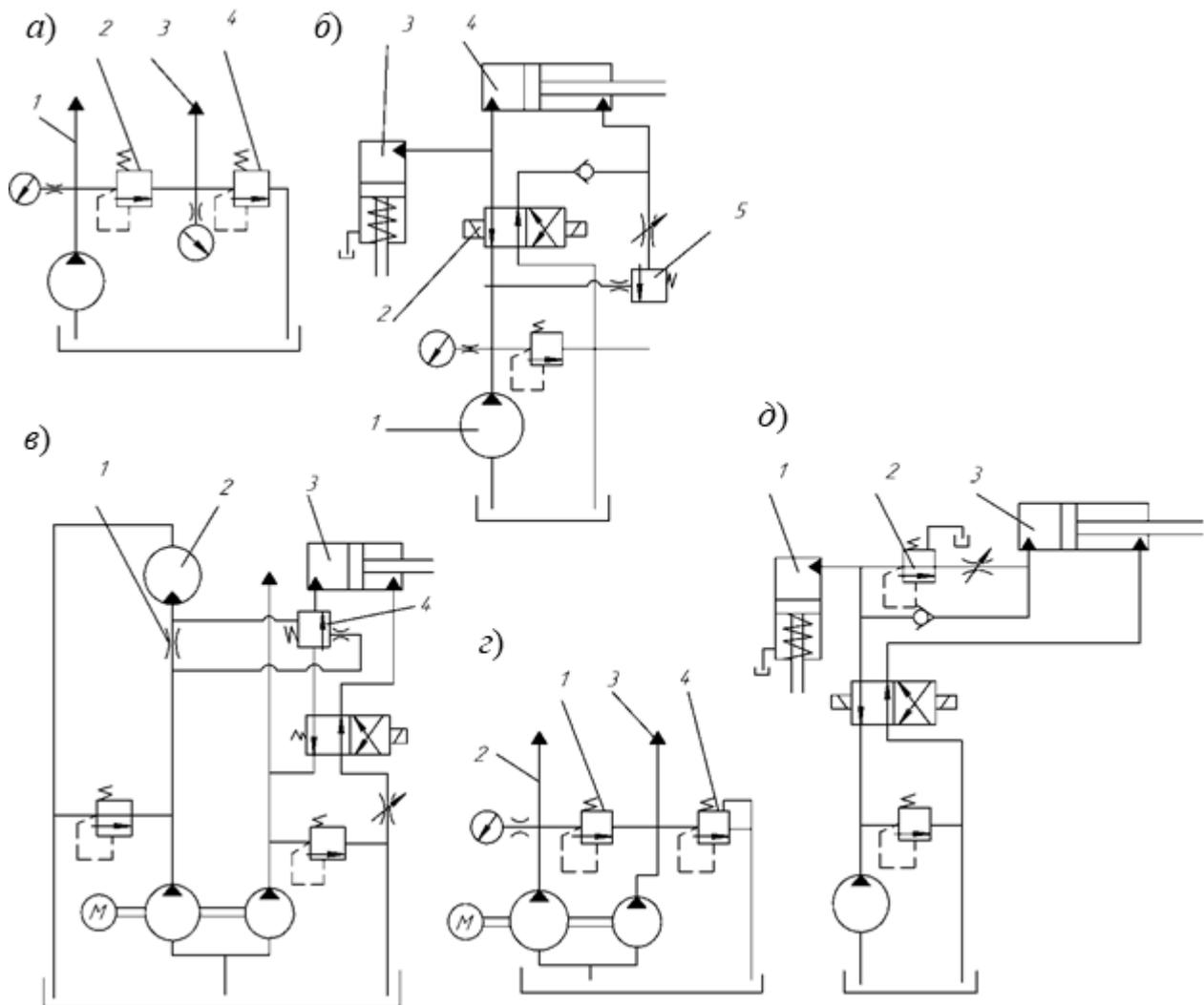


Рисунок 4.1 – Типовые схемы применения гидроклапанов прямого действия

### 4.3 Гидроклапаны непрямого действия

Клапаны непрямого действия бывают предохранительные и редуционные.

Предохранительные клапаны непрямого действия состоят из следующих основных деталей и узлов: корпуса 4 (рисунок 4.2), переливного золотника 5, пружины 9, вспомогательного клапана 13, а в исполнении с электрическим управлением разгрузкой – пилота 16. Масло из напорной линии подводится в полость 6 клапана и отводится из него в сливную линию через отверстие 3. Полость 6 каналом 2 соединена с полостью и через малое отверстие 7 – с полостью 10, откуда масло через клапан 13 может поступать в сливную линию по каналу 11. Если давление в гидросистеме не превышает давления настройки клапана 13 (регулируется винтом 15, сжимающим пружину 14), последний закрыт, давления в торцовых полостях золотника 5 одинаковы, и золотник прижат пружинной 9 к своему конусному седлу, разъединяя напорную и сливную линии.



т. к. дроссель *б* ограничивает поток масла, поступающего от нерегулируемого насоса *1* в цилиндр *5*, а оставшаяся часть масла через клапан *3* возвращается в бак, причем давление в гидросистеме определяется настройкой клапана и практически не зависит от нагрузки на цилиндре. В гидросистеме (см. рисунок 4.3, *в*) насос разгружается от давления при выключении магнита *7* клапана *3* с электрическим управлением разгрузкой.

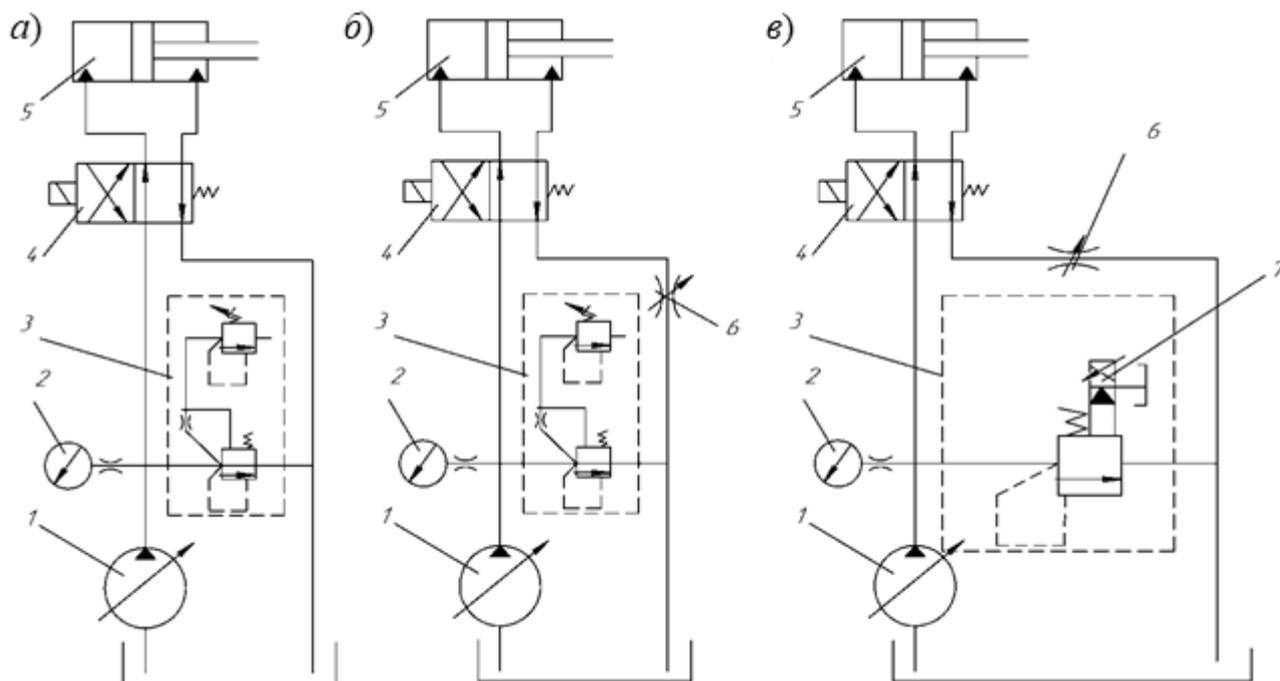


Рисунок 4.3 – Типовые схемы применения предохранительных клапанов непрямого действия

Редукционные клапаны непрямого действия подобны описанным выше предохранительным клапанам, они состоят из тех же деталей (за исключением золотника и корпуса), однако масло из напорной линии *P* подводится в этом случае в отверстие *3* (рисунок 4.4) и далее через дросселирующую щель между гильзой корпуса и рабочей кромкой золотника поступает в полость *б*, связанную с отводной линией *A*, в которой поддерживается пониженное (редуцированное) давление  $p_{ред}$ .

Слив масла из вспомогательного клапана выведен отдельной линией *T<sub>x</sub>*. При работе аппарата масло в небольшом количестве (1...2 л/мин) постоянно течет из полости *б* через малое отверстие *7*, вспомогательный клапан *13* и отверстие *11* в линию слива (поток управления).

При этом давление в полости *10*, поддерживаемое клапаном *13*, будет ниже давлений в полостях *1* и *б* на величину потерь давления в отверстии *7*. Наличие разности давлений на торцовых поверхностях золотника *5* создает осевое усилие, смещающее золотник влево и сжимающее пружину *9*. Золотник рабочей кромкой дросселирует поток жидкости, поступающей из напорной линии в полость *б*, вследствие чего давление в отводной линии понижается по сравнению с давлением в напорной линии. Требуемая величина  $p_{ред}$  настраивается клапаном *13*.

Случайные изменения  $p_{ред}$  вызывают перемещение золотника 5 в направлении уменьшения ошибки; при росте давления увеличиваются расход масла через отверстие 7 и потери давления в нем, в результате чего золотник дополнительно смещается влево, прикрывая дросселирующую щель; при снижении давления пружина 9 смещает золотник вправо, уменьшая дросселирование основного потока. Поскольку поток управления постоянно проходит из линии  $P$  через дросселирующую щель, отверстие 7 и клапан 13 в линию  $T_x$ ,  $p_{ред}$  автоматически поддерживается примерно постоянным во всем диапазоне расходов (от нуля до  $Q_{ном}$ ). Если с помощью специального распределителя отверстие 8 (линия управления  $X$ ) соединить со сливной линией,  $p_{ред}$  падает до минимальной величины.

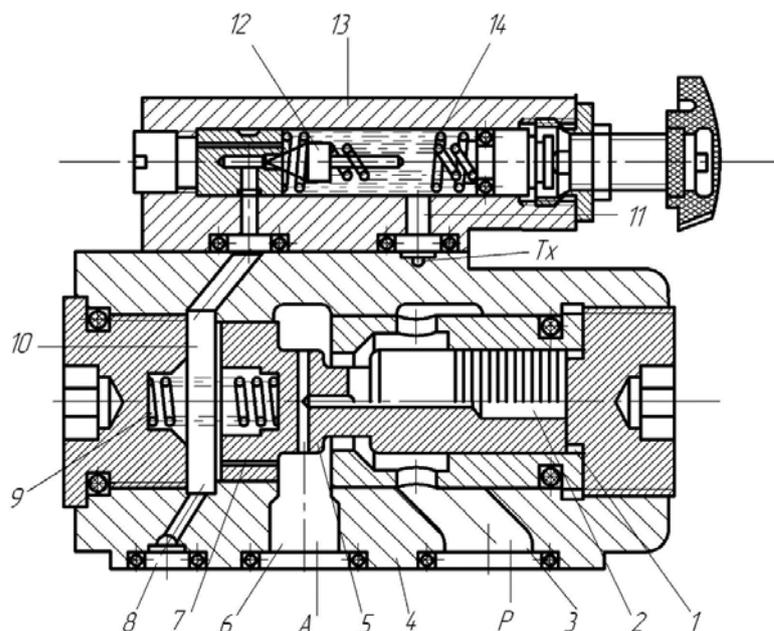


Рисунок 4.4 – Конструкция редукционных клапанов непрямого действия

#### 4.4 Порядок выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с содержанием настоящих методических рекомендаций.
- 2 Смонтировать схемы (см. рисунки 4.1 и 4.3) на стенде, подключить к насосной установке и убедиться в их работоспособности.
- 3 Изучить движение потоков жидкости в схемах.

#### Контрольные вопросы

- 1 Назначение и разновидности гидроклапанов.
- 2 Устройство и принцип работы гидроклапанов прямого действия.
- 3 Устройство и принцип работы гидроклапанов непрямого действия.

## 5 Лабораторная работа № 4. Исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель

**Цель работы:** исследование нестационарных процессов истечения жидкости через гидродроссель.

### Задачи

- 1 Изучение типов гидродросселей.
- 2 Изучение особенностей расчета нестационарных процессов истечения жидкости.
- 3 Экспериментальное исследование нестационарного процесса истечения жидкости через гидродроссель и обработка результатов.

### 5.1 Краткие теоретические сведения

В учебной литературе по гидравлике рассматриваются два случая истечения жидкости через малое отверстие в тонкой стенке: первый – при постоянном напоре, а второй – при переменном [2]. В обоих случаях истечение происходит из резервуара в окружающую среду (или в среду с противодействием). В первом случае истечения напор перед отверстием считают постоянной величиной, а во втором – переменной. Следует отметить, что рассматриваемые случаи истечения имеют ограниченное практическое применение.

Чаще всего в машиностроительной гидравлике встречаются случаи истечения жидкости через гидродроссель. Последний представляет собой разновидность малого отверстия в тонкой стенке. Гидродроссель – это особое местное сопротивление, обладающее чрезвычайно высокими диссипативными свойствами. Устанавливаются гидродроссели во многие гидравлические системы (включая и системы автоматического регулирования) с целью достижения требуемых инерционных свойств и обеспечения желаемых характеристик функционирования систем. Конструкции гидродросселей, а также требования, которые к ним предъявляются, подробно изложены в [2, 4]. Отметим только, что гидродроссели бывают регулируемые и нерегулируемые. Конструктивно нерегулируемые гидродроссели часто выполняют в виде пробки с наружной резьбой, в которой изготавливается осевое отверстие малого диаметра  $d_{др}$  ( $d_{др}$  – диаметр дросселя). Толщина стенки  $l$ , в которой изготавливают отверстие, должна быть связана с диаметром дросселя следующим образом:  $l \leq (1,5 \dots 2,0) d_{др}$ .

Коэффициент местного сопротивления гидродросселя можно определить из следующего выражения:

$$\zeta = \frac{d_k^4}{\mu^2 d_{др}^4},$$

где  $d_k$  – диаметр канала, в котором установлен дроссель;

$\mu$  – коэффициент расхода дросселя, для отверстия круглой формы  $\mu = 0,62 \dots 0,65$ .

Чаще всего встречаются два случая истечения через гидродроссель. В первом случае жидкость от источника энергии через дроссель поступает в торцевую полость подпружиненного золотника или поршня, т. е. рассматривается процесс заполнения рабочей полости, в которой перемещается подпружиненный поршень или золотник. Во втором случае рассматривается процесс опорожнения полости через гидродроссель. При этом линия с установленным в нее дросселем подключается к сливу.

Рассматриваемые процессы относятся к нестационарным, т. к. и при заполнении, и при опорожнении полости через гидродроссель изменяются во времени фазовые координаты – давления и расхода (скорости).

На рисунке 5.1 приведена расчетная схема процессов заполнения и опорожнения через гидродроссель  $ДР$  рабочей полости  $Б$  пружинного гидроаккумулятора.

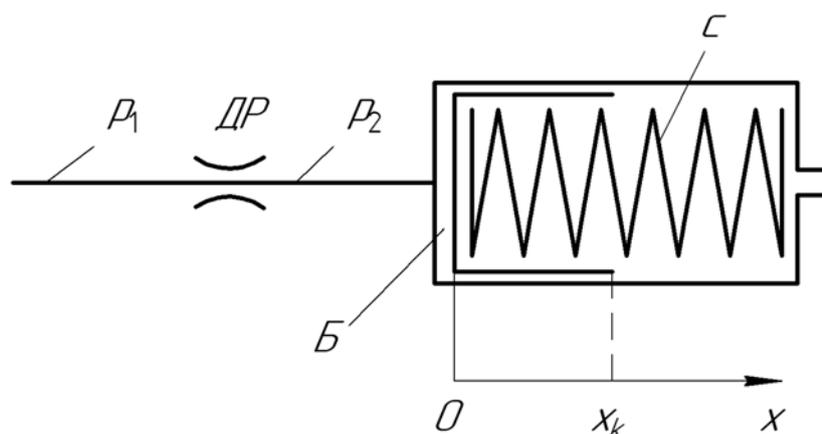


Рисунок 5.1 – Расчетная схема

При рассмотрении указанных процессов решается задача определения времени заполнения  $t_{зан}$  и времени опорожнения  $t_{он}$  полости  $Б$  пружинного аккумулятора.

На схеме (см. рисунок 5.1) приняты следующие обозначения:  $p_1$  и  $p_2$  – давления;  $c$  – жесткость пружины;  $x$  – координата поршня ( $x = x_k$  соответствует полному заполнению полости  $Б$ ).

При математическом описании процессов заполнения и опорожнения полости  $Б$  принимались следующие допущения: силы трения и инерции, действующие на жидкость и поршень, равны нулю; потери энергии при течении жидкости учитываются только на гидродросселе  $ДР$ .

Для процессов заполнения и опорожнения при принятых допущениях были составлены две системы дифференциальных уравнений, в результате решения которых получены следующие выражения:

– процесс заполнения полости  $B$  ( $p_1 = \text{const}$ )

$$t_{зан} = \frac{2A_n^2}{c \mu A_{оп}^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left( \sqrt{p_1 - \frac{F_o}{A_n}} - \sqrt{p_1 - \frac{F_o + c x_k}{A_n}} \right); \quad (5.1)$$

– процесс опорожнения полости  $B$  ( $p_1 = 0$ )

$$t_{он} = \frac{2A_n^2}{c \mu A_{оп}^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \left( \sqrt{\frac{F_o + c x_k}{A_n}} - \sqrt{\frac{F_o}{A_n}} \right), \quad (5.2)$$

где  $A_n$  – площадь поршня,  $A_n = \frac{\pi D_n^2}{4}$  ( $D_n$  – диаметр поршня);

$A_{оп}$  – площадь проходного сечения дросселя;

$\rho$  – плотность рабочей жидкости;

$F_o$  – усилие преднатяга пружины (при  $x = 0$ );

$x_k$  – ход поршня.

Остальные обозначения величин, входящих в выражения (5.1) и (5.2), были приведены выше.

## 5.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Объектом испытаний в данной работе является подсистема стенда, представленная на рисунке 5.2.

Гидродроссель  $ДР2$  установлен на участке  $d-e$ . Для измерения давления в сечении  $e$  применяется электроконтактный манометр  $МН7$ , используемый для управления электронным секундомером. Для подключения аккумулятора к напорной линии насоса (процесс заполнения) или к сливу жидкости в гидробак  $B$  (процесс опорожнения) служит двухпозиционный гидрораспределитель  $P2$ . Устройство пружинного аккумулятора практически полностью соответствует схеме, представленной на рисунке 5.1.

На рисунке 5.3 приведены графики изменения давления  $p_2$  в полости аккумулятора.

Процесс заполнения полости аккумулятора (см. рисунок 5.3,  $a$ ) начинается при  $t = 0$  и достижении давлением величины  $p_{2н.з}$  ( $p_{2н.з} = F_o / A_n$ ). При  $p_2 < p_{2н.з}$  включается электронный секундомер. Затем начинается процесс заполнения рабочей полости аккумулятора. При  $p_2 = p_{2к.з}$  ( $p_{2к.з} = (F_o + c x_k) / A_n$ ) поршень касается ограничения хода ( $x = x_k$ ) и давление практически мгновенно возрастает до линейного давления в системе  $p_l$ . При  $p_2 > p_{2к.з}$  выключается электронный секундомер. На цифровом табло секундомера отображается величина  $t_{зан}$ .

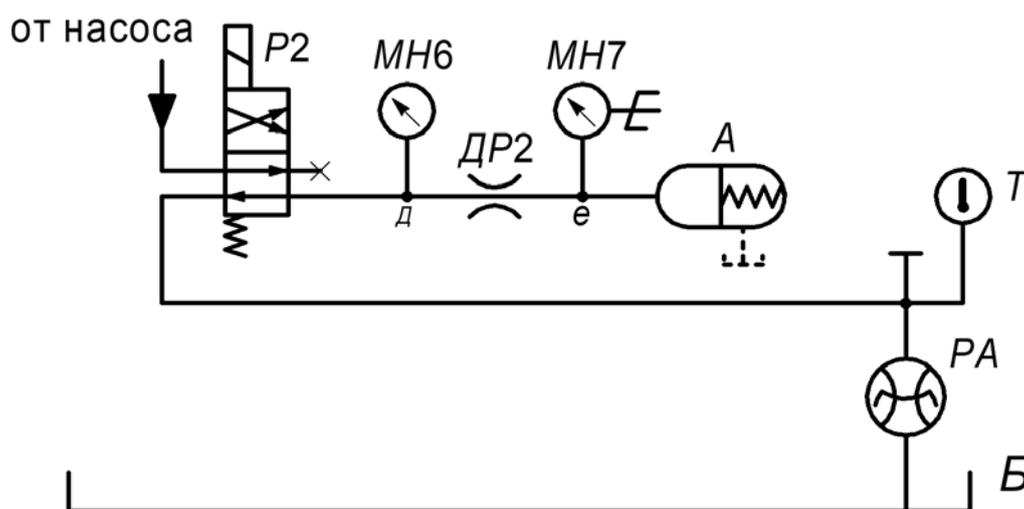
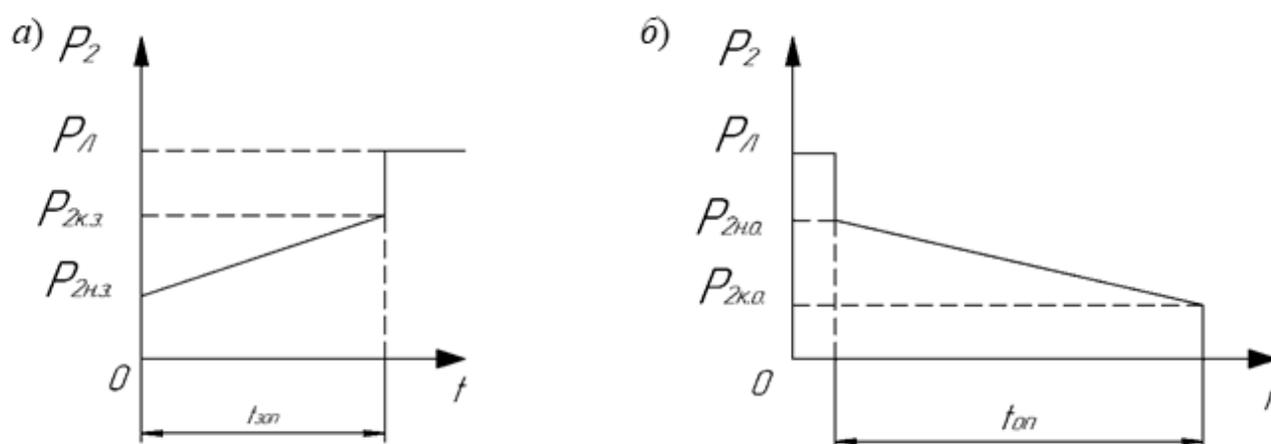


Рисунок 5.2 – Схема объекта испытаний



*a* – процесс заполнения; *б* – процесс опорожнения

Рисунок 5.3 – Характеристики процессов функционирования пружинного гидроаккумулятора

Процесс опорожнения полости аккумулятора (см. рисунок 5.3, б) начинается после выключения распределителя  $p_2$ . При этом давление  $p_2$  резко понижается с  $p_{л}$  до  $p_{2н.о.}$  ( $p_{2н.о.} = (F_o + c x_k) / A_n$ ); когда  $p_{л} > p_2 > p_{2н.о.}$ , включается электронный секундомер. Процесс опорожнения происходит под действием усилия пружины, действующего на поршень аккумулятора. При достижении давлением значения  $p_{2к.о.}$  ( $p_{2к.о.} = F_o / A_n$ ) поршень касается ограничения хода ( $x = 0$ ) и давление  $p_2$  резко падает. При  $p_2 < p_{2к.о.}$  отключается электронный секундомер и на табло отображается время опорожнения полости аккумулятора  $t_{он}$ .

*Подготовка установки к работе.* Перед включением установки необходимо убедиться, что:

- тумблеры управления гидрораспределителями  $P_1$  и  $P_2$  установлены в положение «Выкл.»;
- тумблер установки режима работы электронного секундомера установлен

в положение «Авт.», а тумблер включения питания секундомера – в нижнее положение.

*Проведение эксперимента.* Включить электрическое питание стенда («Сеть»), электродвигателя  $M$  (кнопка «Пуск»), питание электронного секундомера (тумблер установить в положение «Вкл.»). Дать возможность поработать стенду в течение 3...5 мин. Включить тумблер управления секундомером в положение «Счет».

После того, как закончился процесс заполнения полости аккумулятора и зафиксировано время  $t_{зан}$ , необходимо сбросить (обнулить) показания табло секундомера и перейти к определению времени опорожнения полости аккумулятора. Для этого нужно тумблер управления гидрораспределителем  $P2$  установить в положение «Выкл.». При этом рабочая полость аккумулятора через дроссель  $ДP2$  будет подключена к сливу. Результаты исследования процессов заполнения и опорожнения необходимо записывать в таблицы 5.1 и 5.2 соответственно.

После считывания значения  $t_{он}$  (по секундомеру) показание табло секундомера обнуляется и может снова переходить к исследованию процесса заполнения полости.

После выполнения всех опытов необходимо тумблер управления гидрораспределителем  $P2$  установить в положение «Выкл.», отключить электрическое питание секундомера, электродвигателя и стенда.

Таблица 5.1 – Результаты исследований процесса заполнения полости аккумулятора

Номер опыта	Давление на входе $p_1$ , МПа	Время заполнения полости $t_{зан}$ , с	Среднее значение времени $t_{зан\ ср}$ , с	Расчетное значение $t_{зан\ p}$ , с
1				
2				
3				
4				
5				

Таблица 5.2 – Результаты исследований процесса опорожнения полости аккумулятора

Номер опыта	Время опорожнения полости $t_{он}$ , с	Среднее значение времени $t_{он\ ср}$ , с	Расчетное значение $t_{он\ p}$ , с
1			
2			
3			
4			
5			

### 5.3 Обработка результатов

Среднее значение времени заполнения полости аккумулятора определяется как среднее арифметическое:

$$t_{зан.ср} = \left( \sum_{i=1}^n t_{зан.i} \right) / n,$$

где  $n$  – количество опытов,  $n = 5$ .

Аналогично определяется и среднее значение времени опорожнения полости аккумулятора  $t_{оп.ср}$ .

Для определения расчетным путем времени заполнения  $t_{зан.p}$  нужно воспользоваться формулой (5.1), а для определения времени опорожнения  $t_{оп.p}$  – формулой (5.2).

При определении  $t_{зан.p}$  в формулу (5.1) нужно подставлять среднее значение  $p_1$  (определенное по результатам измерений в пяти опытах, см. второй столбец таблицы 5.1).

Остальные параметры, необходимые для вычисления  $t_{зан.p}$  и  $t_{оп.p}$ , следующие:

- диаметр поршня аккумулятора  $D = 0,06$  м (60 мм);
- диаметр дросселя  $d_{др} = 1 \cdot 10^{-3}$  м (1 мм);
- коэффициент расхода дросселя  $\mu = 0,62$ ;
- усилие преднатяга пружины  $F_0 = 450$  Н;
- жесткость пружины  $c = 8000$  Н/м (8 Н/мм);
- ход поршня  $x_k = 0,065$  м (65 мм);
- плотность масла  $\rho = 890$  кг/м<sup>3</sup>.

#### Контрольные вопросы

- 1 Устройство лабораторного стенда.
- 2 Назначение, устройство и характеристики гидродросселя.
- 3 Как определяется коэффициент местного сопротивления гидродросселя?
- 4 Поясните обоснованность допущений, принимаемых при моделировании процессов заполнения и опорожнения рабочей полости аккумулятора.
- 5 Методика экспериментального определения характеристик заполнения и опорожнения рабочей полости аккумулятора.
- 6 Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

## 6 Лабораторная работа № 5. Изучение компоновок и принципа действия пневмосистем и их компонентов

**Цель работы:** изучение компоновок и принципа действия пневматических систем и их компонентов.

### *Задачи*

- 1 Изучение функционального назначения компонентов пневматических систем.
- 2 Изучение принципа построения пневматических схем.

### *6.1 Компоненты пневматических систем*

**Компрессор** – это устройство, предназначенное для сжатия и подачи воздуха под давлением. В пневмосистемах энергия подается винтовыми или поршневыми компрессорами с выходным давлением 700...800 кПа (7...8 бар).

**Фильтры сжатого воздуха** выполняют очистку воздуха от конденсата, твердых частиц грязи и масла. Они располагаются централизованно или децентрализованно в системах сжатого воздуха. Качественная очистка воздуха играет важную роль в продлении срока службы элементов, располагающихся в направлении протекания воздуха.

**Регулятор давления** компенсирует колебания в сетях сжатого воздуха. Установленное давление остается постоянным до тех пор, пока входящее превышает его не более чем на 50 кПа (0,5 бар).

**Клапаны включения-выключения** разделяют отдельные сети сжатого воздуха.

**Распределители** служат для распределения потоков сжатого воздуха на рабочие элементы.

**Пневматические цилиндры** – рабочие элементы с высокой прочностью и долгим сроком службы. Цилиндры стандартных размеров могут достигать больших скоростей. Для надежной работы цилиндры должны быть правильно подобраны по размерам и смонтированы.

### *6.2 Пневматические цилиндры*

#### **Цилиндры одностороннего действия.**

В цилиндры одностороннего действия воздух поступает только с одной стороны, где у них есть для этого вход. Они могут работать только в одном направлении. Полость цилиндра должна быть пустой до того, как поршень вернется, после чего встроенная пружина или приложенная сила втягивает шток поршня (рисунок 6.1). Опустошение проходит через отверстие в крышке цилиндра.

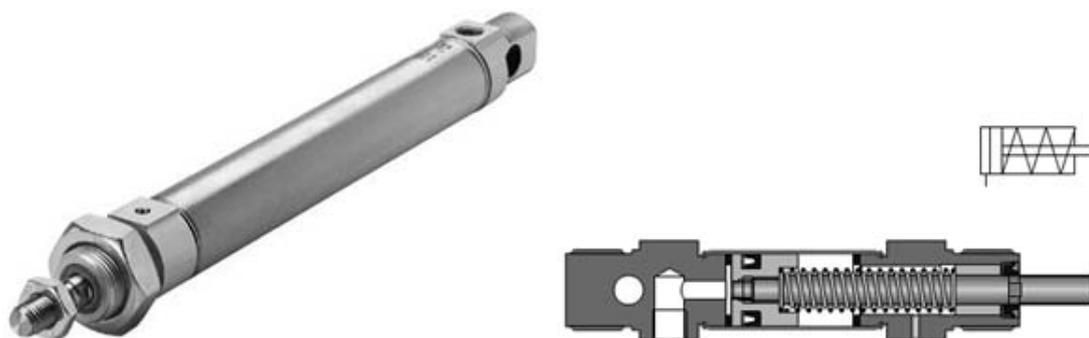


Рисунок 6.1 – Пневматический цилиндр одностороннего действия с пружинным возвратом

### **Цилиндры двухстороннего действия.**

В цилиндры двухстороннего действия воздух попадает с двух сторон, т. е. они могут работать в двух направлениях. Сила, действующая на поршень, перемещает его вперед, в то время как сила, действующая непосредственно на поршень со стороны штока, обеспечивает его возвратное движение (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Пневматический цилиндр двухстороннего действия

В цилиндре двухстороннего действия в каждой камере давления есть отверстия. Перед включением в обратном направлении соответствующая камера (поршня или штока) должна быть опустошена.

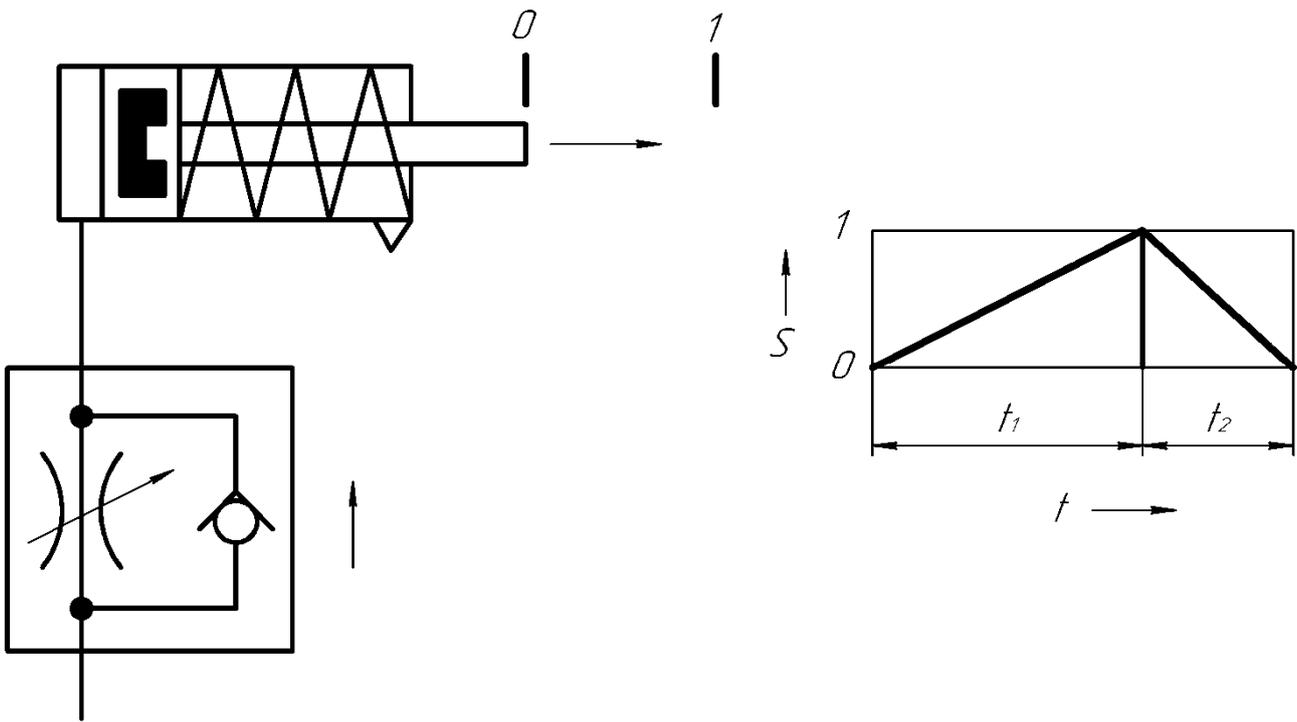
### **6.3 Дроссели**

Для регулирования скорости поршня со штоком пневматических цилиндров применяют дроссели, устанавливаемые в непосредственной близости от цилиндра.

#### **Регулирование скорости цилиндра одностороннего действия.**

*Дроссель с обратным клапаном.* Данный клапан работает только в одном направлении, для изменения направления регулирования используется обратный клапан. На корпусе клапана направление потока указывается стрелкой.

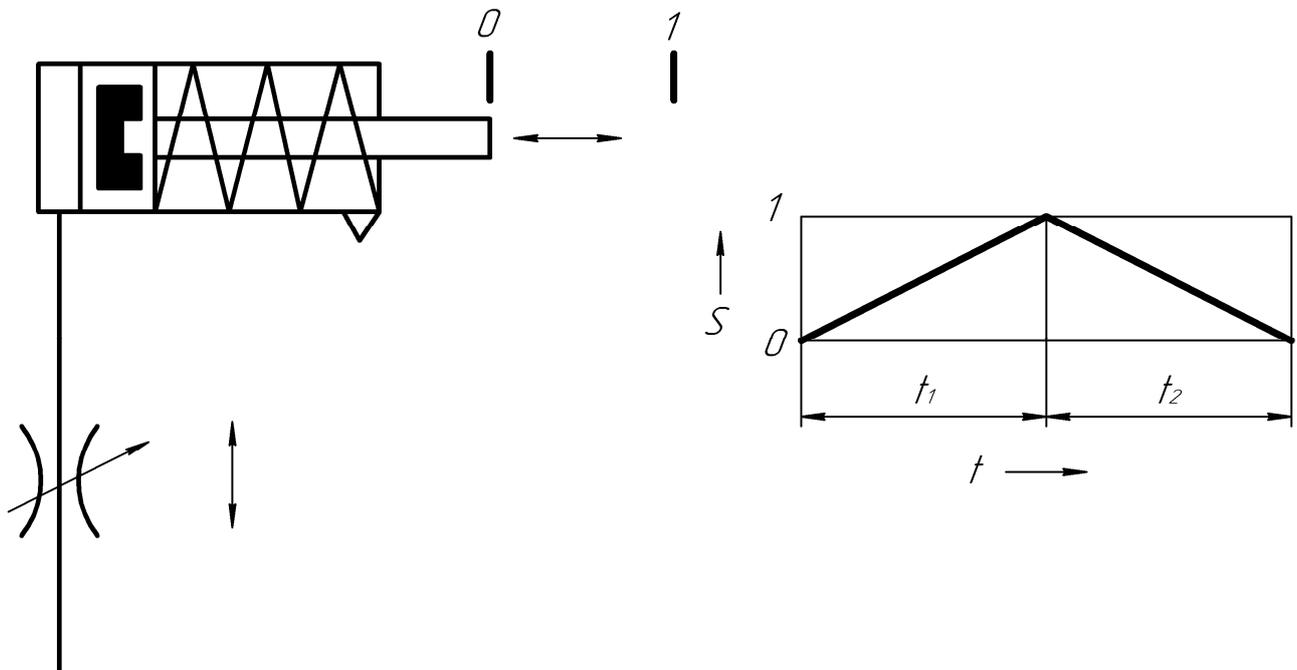
*Прямой ход.* Подача воздуха уменьшается посредством дросселя с обратным клапаном. Регулирование скорости возможно только при прямом ходе, для обратного хода поток направляется через обратный клапан (рисунок 6.3).



$t_1$  – регулируется,  $t_2 = \text{const}$  (не регулируется)

Рисунок 6.3 – Принципиальная схема регулировки скорости цилиндра при прямом ходе

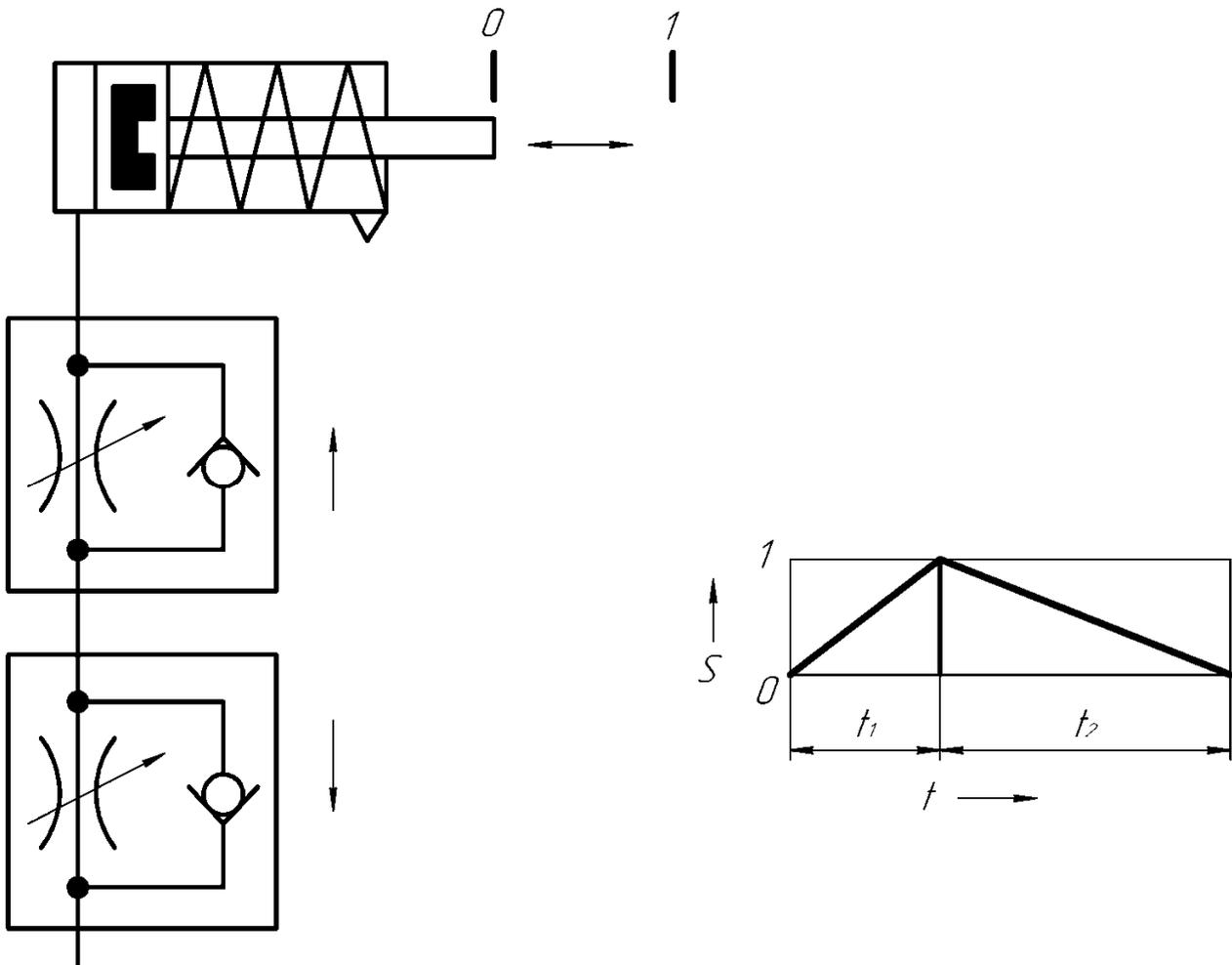
*Прямой и обратный ход.* Дроссель устанавливается в месте входа-выхода сжатого воздуха. Регулирование скорости возможно как для прямого, так и для обратного хода (рисунок 6.4).



$t_1 = t_2$  – регулируется

Рисунок 6.4 – Принципиальная схема регулировки скорости цилиндра при прямом и обратном ходе

Использование двух дросселей с обратным клапаном. Скорость можно устанавливать отдельно для прямого и обратного хода (рисунок 6.5).



$t_1$  – регулируется,  $t_2$  – регулируется

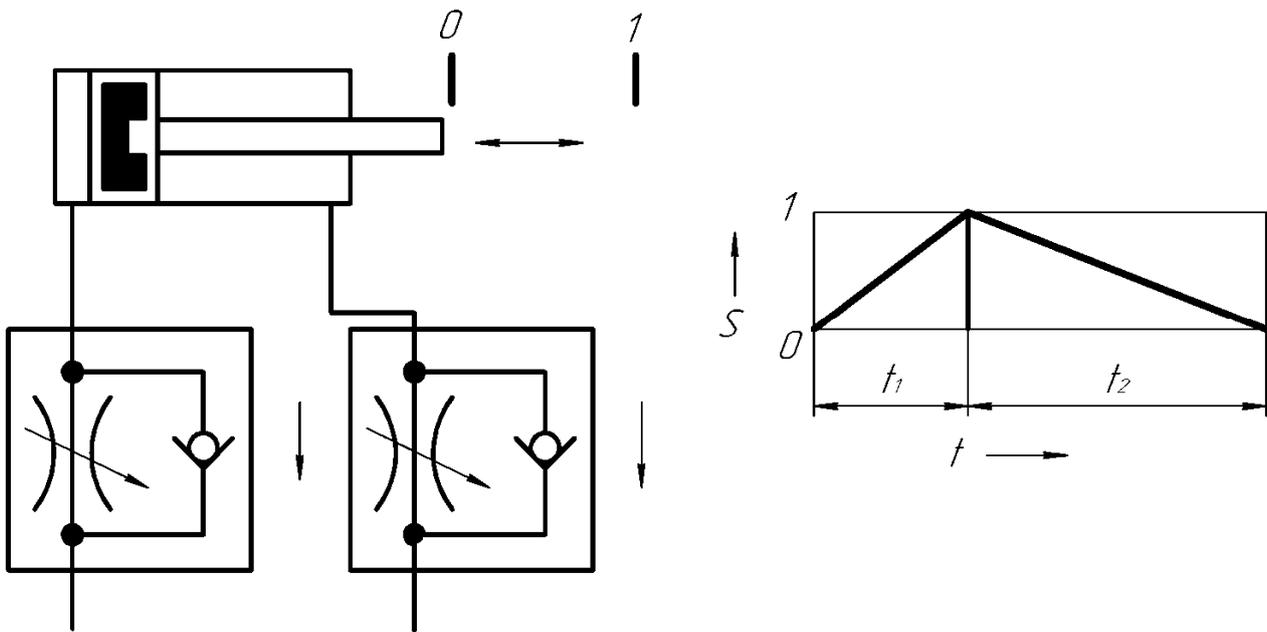
Рисунок 6.5 – Принципиальная схема регулировки скорости цилиндра двумя дросселями

### Регулирование скорости цилиндров двухстороннего действия.

*Прямой ход* (регулирование выходящего и входящего потоков). Для регулирования выходящего потока дроссель с обратным клапаном устанавливается в месте выхода сжатого воздуха. Как правило, регулирование выходящего воздуха осуществляется цилиндрами двухстороннего действия. Регулирование скорости не зависит от нагрузки.

Для регулирования входящего потока (не подходит для цилиндров, установленных вертикально) дроссель с обратным клапаном располагается в месте входа сжатого воздуха. Регулирование скорости возможно только при прямом ходе. Небольшие изменения нагрузки на штоке поршня приводят к большим колебаниям скорости перемещения. Нагрузка в направлении движения цилиндра увеличивается выше установленного значения.

*Прямой и обратный ход.* Регулирование выхода сжатого воздуха при прямом и обратном ходе осуществляется с помощью дросселей (рисунок 6.6). Скорость можно устанавливать отдельно для прямого и обратного хода.



$t_1$  – регулируется,  $t_2$  – регулируется

Рисунок 6.6 – Принципиальная схема регулировки скорости цилиндра двухстороннего действия при прямом и обратном ходе

#### 6.4 Пневматические распределители

Пневматические распределители регулируют направление движения сжатого воздуха. Направление потока обозначается стрелкой. Запуск может быть произведен вручную, механически, пневматически или электрически. В автоматизированных системах обычно используются распределители с электромагнитным управлением, которые создают связь между пневматическим и электрическим управлением. Они переключаются посредством выходных сигналов из системы управления и перекрывают или открывают соединительные линии в силовой части пневмопривода. Назначение распределителей с электромагнитным приводом:

- подключение или прекращение подачи сжатого воздуха;
- втягивание и выдвигание приводов цилиндра.

В таблице 6.1 представлены основные виды распределителей.

#### Управление цилиндром одностороннего действия.

На рисунке 6.7 показан распределитель с электромагнитным приводом, который управляет перемещением цилиндра одностороннего действия, в котором три канала и два переключаемых положения:

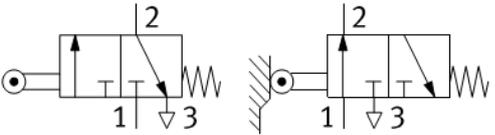
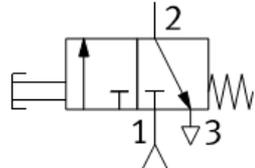
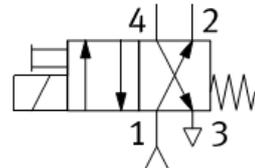
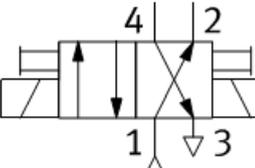
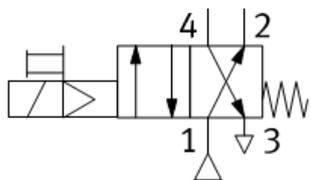
- когда электромагнит распределителя обесточивается, камера цилиндра разгружается от давления через распределитель. Шток поршня втягивается;
- когда на катушку подаётся ток, распределитель переключается, и камера цилиндра заполняется жидкостью. Шток выдвигается;
- когда ток перестает поступать на электромагнит, клапан снова переключается. Камера цилиндра разгружается от давления и шток втягивается.

Таблица 6.1 – Условные обозначения пневматических распределителей

Условное обозначение	Название	Функция
	2/2-распределитель (нормально замкнутый и нормально разомкнутый)	Клапан с двумя переключаемыми положениями и двумя каналами
	2/3-распределитель (нормально замкнутый и нормально разомкнутый)	Распределитель с двумя переключаемыми положениями и тремя каналами
	4/2-распределитель	Распределитель с двумя переключаемыми положениями и четырьмя каналами
	5/2-распределитель	Распределитель с двумя переключаемыми положениями и пятью каналами
	5/3-распределитель, в средней позиции рабочие линии разгружены от давления	Поршень цилиндра не оказывает воздействие на шток. Шток может двигаться свободно
	5/3-распределитель, в средней позиции каналы закрыты	Шток поршня останавливается, даже если остановка не определена
	5/3-распределитель, в средней позиции каналы связаны с источником давления	Шток цилиндра с несимметричным штоком поршня выдвигается с ограниченной силой

Основные способы включения распределителей представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Способы включения пневматических распределителей

Условное обозначение	Название	Функция
	Распределитель с роликовым переключением, возвратная пружина, электромагнит	Включается посредством цилиндрических кулачков или чем-то аналогичным. В основном используется для контроля конечных положений
	Ручное переключение, возвратная пружина, электромагнит	Распределитель с ручным переключением и возвратной пружиной
	Распределитель с электромагнитным и ручным управлением, возвратная пружина	Распределитель приводится в действие электромагнитом и возвращается пружиной, как только подача тока прекращается
	Распределитель с двумя электромагнитами и ручным управлением	Распределитель приводится в действие электромагнитами и остается в таком положении до тех пор, пока включен другой электромагнит
	Электромагнитный клапан с пневматическим дистанционным управлением	Распределитель приводится в действие электромагнитом. Электромагнит управляет дополнительным контуром, который включает золотник распределителя

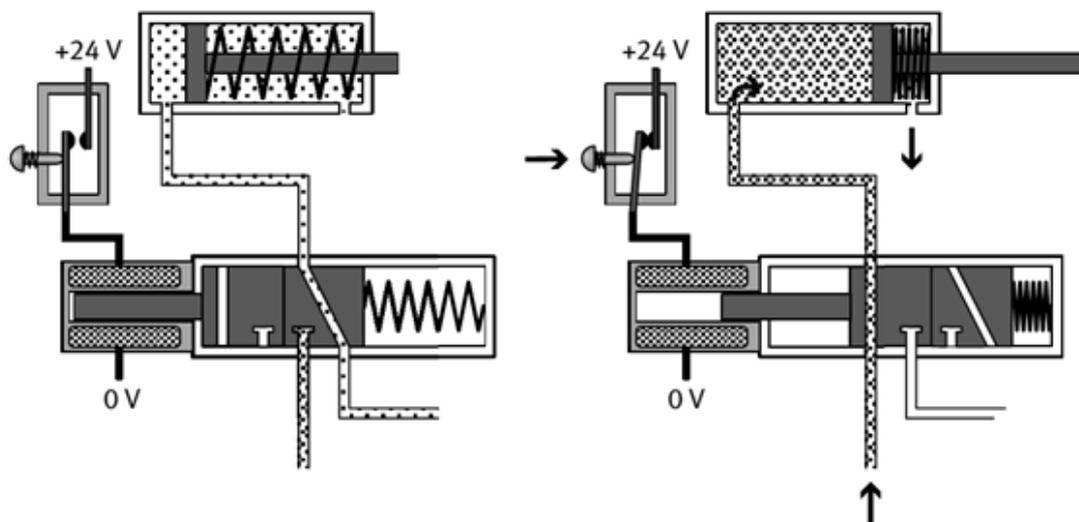


Рисунок 6.7 – Управление цилиндром одностороннего действия с помощью электромагнитных распределителей

### Управление цилиндром двухстороннего действия.

Цилиндр двухстороннего действия, изображенный на рисунке 6.8, приводится в действие распределителем с пятью каналами и двумя переключаемыми положениями:

- когда электромагнит обесточивается, левая камера цилиндра разгружается от давления, а правая заполняется жидкостью. Шток вытягивается;
- когда ток подаётся на электромагнит, клапан переключается. Левая камера цилиндра заполняется жидкостью, а правая разгружается от давления. Шток выдвигается;
- когда ток перестает поступать на катушку, клапан переключается и шток вытягивается.

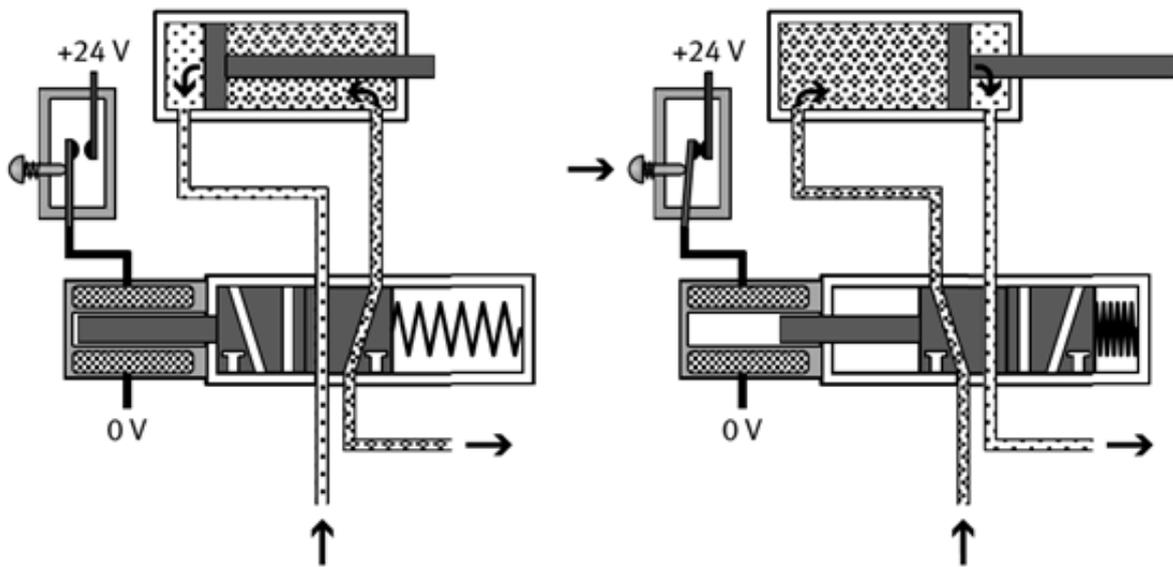


Рисунок 6.8 – Управление цилиндром двухстороннего действия с помощью электромагнитных распределителей

### 6.5 Пневматические приводные элементы

Пневматические поворотные двигатели используются везде, где требуется вращательное или поворотное движение.

Цилиндры с направляющими, как правило, используются в манипуляторах. В зависимости от конструкции они могут быть с направляющими с подшипниками скольжения для простых операций с низкой нагрузкой и ограниченной точностью или с высокоточными шарикоподшипниковыми направляющими, поглощающими значительные нагрузки и крутящие моменты, и более дорогими.

Другим видом передаточных механизмов являются бесштоковые цилиндры. В них нет штока, а потому ход поршня может быть больше.

Пневматические захваты используются для манипулирования заготовками. Существуют различные виды захватов: параллельный захват; угловой захват; радиальный захват; трехточечный захват. Выбор типа захвата, его размера и вида губок зависит от формы и веса заготовки.

### ***6.6 Условные обозначения в принципиальных схемах***

Структура пневматических принципиальных схем и расположение символов, а также обозначения и нумерация элементов определены в стандарте DIN/ISO 1219-2. Состояние переключения распределителя – это исходное положение (нормальное положение). Блок исполнительных элементов (цилиндры с силовыми распределителями) изображается в верхней части, а блок управления с устройствами ввода сигналов – в нижней.

#### ***Контрольные вопросы***

- 1 Перечислите основные компоненты пневматических систем.
- 2 Опишите назначение пневматических цилиндров, их разновидности.
- 3 Опишите назначение пневматических дросселей.
- 4 Опишите назначение пневматических распределителей, их разновидности.
- 5 Какие существуют разновидности пневматических приводных элементов?

## Список литературы

- 1 **Свешников, В. К.** Станочные гидроприводы: справочник / В. К. Свешников, А. А. Усов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1995. – 448 с.: ил.
- 2 **Башта, Т. М.** Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.
- 3 Гидроприводы и гидропневмоавтоматика станков / В. А. Федорец [и др.]; под ред. д-ра техн. наук В. А. Федорца. – Киев: Вища школа, 1987. – 375 с.
- 4 **Егоров, О. Д.** Мехатронные модули. Расчет и конструирование: учебное пособие / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – Москва: СТАНКИН, 2004. – 360 с.: ил.
- 5 Автоматизация в промышленности: практикум: в 4 ч. Ч. 1: Пневмоавтоматика и гидроавтоматика / Е. В. Пашков [и др.]; под ред. Е. В. Пашкова. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – 156 с.
- 6 **Шишмарев, В. Ю.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / В. Ю. Шишмарев. – Москва: Академия, 2007. – 368 с.
- 7 Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / Под ред. Н. М. Капустина. – Москва: Высшая школа, 2007. – 415 с.
- 8 **Фельдштейн, Е. Э.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебное пособие / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Москва: ИНФРА-М; Новое знание, 2016. – 264 с.
- 9 **Схиртладзе, А. Г.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / А. Г. Схиртладзе, В. Н. Воронов, В. П. Борискин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 612 с.