

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра "Конструирование и производство приборов"

## ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

*Учебно-методическое пособие*

Рекомендовано учебно-методическим объединением высших  
учебных заведений Республики Беларусь по образованию в области  
приборостроения

М и н с к  
БНТУ  
2010

УДК 681.5 (075.8)  
ББК 32.965я7  
Э 45

Авторы:

М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, Н.Т. Минченя, А.Л. Савченко

Рецензенты:

Р.В. Новичихин, В.Г. Лысенко

Э 45 Элементы автоматизации: учебно-методическое пособие/  
М.Г. Киселев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2010. – 112 с.  
ISBN 978-985-525-276-5.

Предназначено для студентов заочной и дневной форм обучения специальностей 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты», 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства», 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» по дисциплине «Автоматика» при изучении вопросов автоматического управления и регулирования, а также при выполнении курсовой работы.

Изложены основы теории, рассмотрены схемы, конструкции и технические характеристики механических, электрических гидравлических и пневматических датчиков, исполнительных устройств, элементов сравнения.

ISBN 978-985-525-276-5

© БНТУ, 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Предисловие .....   | 5  |
| 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ<br>И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ В АВТОМАТИКЕ .....        | 6  |
| 1.1. Состав системы автоматики .....  | 6  |
| 1.2. Физические основы работы элементов автоматики .....                                | 9  |
| 1.3. Основные характеристики элементов автоматики .....                                 | 17 |
| 2. ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В АВТОМАТИКЕ .....   | 25 |
| 2.1. Классификация датчиков .....   | 27 |
| 2.2. Датчики сопротивления .....  | 27 |
| 2.3. Индуктивные датчики .....  | 36 |
| 2.4. Гальваномагнитные датчики .....  | 37 |
| 2.5. Емкостные датчики .....  | 38 |
| 2.6. Термоэлектрические датчики .....   | 39 |
| 2.7. Пьезоэлектрические датчики .....   | 39 |
| 2.8. Контактные датчики .....   | 40 |
| 2.9. Фотоэлектрические датчики .....  | 41 |
| 2.10. Индукционные датчики .....  | 43 |
| 2.11. Акселерометры .....   | 44 |
| 2.12. Классификация датчиков по виду<br>измеряемой величины .....                       | 45 |
| 3. УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ СИГНАЛОВ<br>В АВТОМАТИКЕ .....                                  | 46 |
| 3.1. Устройства сравнения с использованием<br>механического дифференциала .....         | 48 |
| 3.2. Измерители рассогласования с использованием<br>потенциометрических элементов ..... | 49 |
| 3.3. Измерители рассогласования на сельсинах<br>и вращающихся трансформаторах .....     | 52 |
| 3.4. Выбор устройства измерения рассогласования.<br>Пример расчета .....                | 56 |
| 4. УСИЛИТЕЛИ .....  | 59 |
| 5. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ .....   | 62 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Электропривод .....  | 62  |
| 5.2. Гидравлические и пневматические<br>исполнительные устройства ..... | 86  |
| 6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ .....                             | 103 |
| 6.1. Линии связи .....  | 103 |
| Литература .....  | 112 |

## Предисловие

Настоящее учебно-методическое пособие написано в соответствии с образовательными стандартами по специальностям 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты», 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», 1-52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства», 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности». Этими стандартами предусмотрено изучение дисциплины «Автоматика». Издание может быть полезно студентам других специальностей при изучении основ автоматики.

При изложении материала предполагается, что студенты хорошо усвоили курсы физики, математики, теоретические основы электротехники. В результате изучения курса «Автоматика» студенты должны уяснить физические основы и принципы действия элементов автоматики различных типов, знать их основные технические характеристики и особенности конструкций. В издании приведены формулы, описывающие работу элементов автоматики, а также расчетные соотношения, пригодные для практического использования. Студенты должны уметь технически грамотно и обоснованно выбрать соответствующий поставленной задаче элемент, рассчитать его основные характеристики, правильно использовать его при эксплуатации систем автоматического управления.

Учебно-методическое пособие состоит из шести разделов. В первом разделе приведена классификация элементов автоматики в соответствии с функциями, выполняемыми ими в системе автоматического регулирования. Даны краткие сведения по физическим основам работы элементов, основным измерительным схемам, надежности элементов. В остальных разделах приведены описания элементов и их характеристики в соответствии с предложенной классификацией.

Отличием данного учебно-методического пособия является то, что в нем более полно даются многообразные типы датчиков, усилительно-преобразовательные и исполнительные устройства автоматики.

При изучении курса автоматики студентам следует, прежде всего, твердо усвоить назначение элементов автоматики и их взаимодействие в системе. Для закрепления практических навыков рекомендуется выполнять примеры расчетов и строить графики основных характеристик, прежде всего зависимости выходного сигнала от входного. При выполнении курсовой работы также следует обращаться к соответствующим главам данного учебно-методического пособия.

# 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ В АВТОМАТИКЕ

## 1.1. Состав системы автоматики

Системы автоматики предназначены для получения информации о ходе управляемого процесса, ее обработки и использования при формировании управляющих воздействий на процесс.

В зависимости от назначения различают следующие автоматические системы.

*Системы автоматической сигнализации* предназначены для извещения обслуживающего персонала о состоянии той или иной технической установки, о протекании того или иного процесса.

*Системы автоматического контроля* осуществляют без участия человека контроль различных параметров и величин, характеризующих работу какого-либо технического агрегата или протекание какого-либо процесса.

*Системы автоматической блокировки и защиты* служат для предотвращения возникновения аварийных ситуаций в технических агрегатах и установках.

*Системы автоматического пуска и останова* обеспечивают включение, остановку (а иногда и реверс) различных двигателей и приводов по заранее заданной программе.

*Системы автоматического управления* предназначены для управления работой тех или иных технических агрегатов либо теми или иными процессами.

Важнейшими и наиболее сложными являются системы автоматического управления. Управлением в широком смысле слова называется организация какого-либо процесса, обеспечивающая достижение поставленной цели.

Общие законы получения, хранения, передачи и преобразования информации в управляющих системах изучает кибернетика. Таким образом, изучение систем автоматики также является одной из задач кибернетики.

Технические средства, с помощью которых построены автоматические системы, называются элементами автоматики.

Рассмотрим назначение этих элементов в системе автоматического регулирования.

Работа любого технического агрегата или ход любого технологического процесса характеризуются различными физическими величинами, например температурой, давлением, скоростью, расходом вещества. Эти величины должны поддерживаться на заданном уровне или изменяться по заданному закону.

С помощью системы автоматического регулирования (САР) автоматически решаются задачи изменения какой-либо физической величины по требуемому закону. Физическая величина, подлежащая регулированию (изменению по заданному закону) в САР, называется обычно регулируемой величиной, а технический агрегат, в котором осуществляется автоматическое регулирование, – объектом регулирования. Автоматическое регулирование является частным случаем автоматического управления. Цель управления в этом случае как раз и заключается в обеспечении требуемого закона изменения регулируемой величины.

Обозначим через  $y(t)$  функцию, описывающую изменение во времени регулируемой величины, т. е.  $y(t)$  – регулируемая величина. Через  $g(t)$  обозначим функцию, характеризующую требуемый закон ее изменения. Величину  $g(t)$  будем называть задающим воздействием. Тогда основная задача автоматического регулирования сводится к обеспечению равенства  $y(t) = g(t)$ . Большинство САР решают эту задачу, используя принцип регулирования по отклонению. Функциональная схема такой САР показана на рис. 1.

Суть принципа регулирования по отклонению заключается в следующем. Регулируемая величина  $y(t)$  измеряется с помощью чувствительного элемента (ЧЭ) и в виде сигнала обратной связи  $y_{oc}(t)$  поступает на сравнивающее устройство (СУ). На это же сравнивающее устройство от задающего устройства (ЗУ) поступает сигнал задающего воздействия  $g(t)$ . На выходе СУ формируется сигнал, равный отклонению регулируемой величины от заданной, т. е. ошибка рассогласования  $x(t) = g(t) - y_{oc}(t)$ . Этот сигнал поступает на исполнительное устройство (ИУ), который формирует регулирующее воздействие  $u(t)$  на объект регулирования (ОР). Сигнал ошибки рассогласования обычно мал для дальнейшего преобразования, поэтому перед ИУ может располагаться усилитель. Регулирующее воздействие будет изменяться до тех пор, пока регулируемая величина  $y(t)$  не станет равна заданной  $g(t)$ . На объект регулирования постоянно влияют различные возмущающие воздействия  $f(t)$ : нагрузка на объект, внеш-

ние факторы и др. Эти возмущающие воздействия стремятся изменить величину  $y(t)$ , но САУ постоянно определяет отклонение  $y(t)$  от  $g(t)$  и формирует регулирующий сигнал, стремящийся свести это отклонение к нулю.

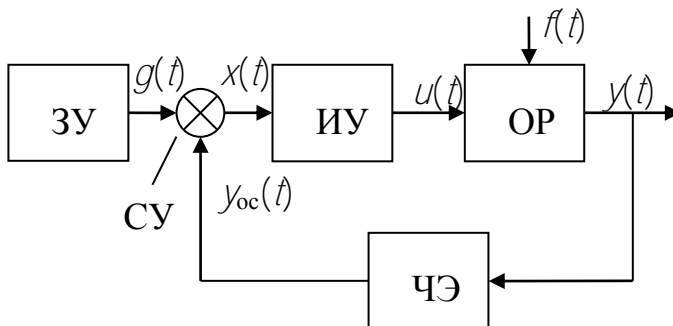


Рис.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования

Таким образом, в любой системе автоматического управления можно выделить следующие основные элементы: чувствительные (измерительные) элементы (датчики), элементы сравнения, усилительные элементы, задающие устройства, корректирующие элементы, исполнительные элементы и т.д. Все эти элементы в системах автоматики выполняют ту или иную функцию, связанную с управлением объектом.

*Чувствительными (измерительными)* элементами в автоматике являются различного типа датчики. Они измеряют регулируемую величину объекта регулирования и вырабатывают на выходе сигнал, пропорциональный этой величине. Входной величиной датчика может быть любая физическая величина: температура, давление, расход, влажность, усилие, механическое перемещение и др. Датчики могут использоваться также и для формирования задающего воздействия.

Согласно приведенной на рис. 1 схеме системы автоматического регулирования сигнал с чувствительного элемента (ЧЭ) поступает на сравнивающее устройство (СУ), в котором происходит сравнение регулируемой и задающей величин. В качестве СУ используются различные измерительные схемы, формирующие сигнал ошибки



(отклонения). Иногда полученный сигнал ошибки недостаточен по мощности и неудобен для создания регулирующего воздействия, поэтому используют различные промежуточные и усилительные элементы.

*Исполнительные элементы* (ИУ) воздействуют на регулирующий орган объекта регулирования в направлении восстановления требуемого значения регулируемой величины. Обычно такое воздействие заключается в перемещении какого-либо регулирующего органа типа заслонки, клапана, реостата и т. п.

Системы автоматики могут быть построены с использованием сигналов различной физической природы: электрических, механических, пневматических, гидравлических.

## **1.2. Физические основы работы элементов автоматики**

### *1.2.1. Электромеханические и магнитные элементы автоматики*

Самое широкое распространение в автоматике имеют электро-механические и магнитные элементы автоматики, т.к. с их помощью подавляющее большинство различных неэлектрических величин может быть преобразовано в электрический сигнал. Электро-механические и магнитные элементы автоматики также получили наибольшее распространение в качестве исполнительных элементов, это различные электромагниты, соленоидные системы, электродвигатели. Для различных переключений в системах автоматики широко применяют коммутационные электро-механические элементы и электронные коммутаторы. Рассмотрим физические основы работы этих элементов.

Работа большинства электро-механических и магнитных элементов, измерительных схем, применяемых в автоматике, основана на электрических и магнитных явлениях. В автоматической системе все они включаются в электрическую цепь и поэтому для описания их работы в основном используются закон Ома и законы Кирхгофа.

*Закон Ома.* Ток в проводнике  $I$  равен отношению напряжения  $U$  на участке проводника к электрическому сопротивлению  $R$  этого участка:

$$I = U/R.$$

*Первый закон Кирхгофа.* В узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю:

$$\sum I = 0.$$

*Второй закон Кирхгофа.* В контуре электрической цепи алгебраическая сумма электродвижущих сил  $E$  равна алгебраической сумме падений напряжений на сопротивлениях, входящих в этот контур:

$$\sum E = \sum IR.$$

Элементы и измерительные схемы в автоматике могут быть использованы в цепях постоянного и переменного тока. Законы Ома и Кирхгофа справедливы для электрических цепей переменного тока, при этом используется символический метод с записью величин, входящих в уравнения, в комплексной форме. Полное сопротивление участка цепи в комплексной форме

$$Z = R + j(X_L - X_C).$$

где  $R$  – активное сопротивление;  $X_L$  – индуктивное сопротивление;  $X_C$  – емкостное сопротивление.

Индуктивное сопротивление пропорционально индуктивности  $L$  и частоте переменного тока  $f$ :

$$X_L = 2\pi fL.$$

Емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости  $C$  и частоте переменного тока  $f$ :

$$X_C = 1/(2\pi fC).$$

Работа многих элементов автоматики основаны на изменении активного, индуктивного или емкостного сопротивлений. Так, для автоматического измерения температуры используется эффект увеличения активного сопротивления металлического проводника с ростом температуры и уменьшения активного сопротивления полупроводниковых материалов. В индуктивных датчиках, магнитных усилителях и некоторых других элементах используется зависимость индуктивности от насыщения магнитопровода или от взаимного перемещения элементов магнитопровода, в емкостных датчиках – зависимость емкости конденсатора от расстояния между его пластинами, площади пластин диэлектрической проницаемости среды между пластинами.

В ряде элементов автоматики используются электромеханические явления, связанные с взаимными преобразованиями электрической и механической энергии. В основе этих явлений лежат в основном следующие физические законы.

*Закон электромагнитной индукции.* В замкнутом контуре при изменении сцепленного с ним магнитного потока  $\Phi$  индуцируется ЭДС  $E$ , равная скорости изменения потокосцепления, взятой с обратным знаком:

$$E = -d\Phi/dt.$$

Так для катушки с числом витков  $w$  ЭДС  $e$  будет в  $w$  раз больше.

*Закон Ампера.* На проводник длиной  $l$  с током  $I$ , помещенный в магнитное поле с индукцией  $B$ , действует электромагнитная сила  $F = BIl$ . Если прямолинейный проводник образует с направлением магнитного поля угол  $\alpha$ , то в эту формулу вводится множитель  $\sin\alpha$ . При перемещении такого проводника длиной  $l$  со скоростью  $v$  в поле с индукцией  $B$  значение ЭДС может быть определено на основании закона электромагнитной индукции:  $E = Blv$ . Если проводник движется под углом  $\alpha$  к направлению магнитного поля, то в этом случае ЭДС можно вычислить по формуле  $E = Blv \sin \alpha$ .

*Магнитная индукция  $B$*  создается под действием напряженности магнитного поля  $H$ . Эти величины связаны между собой зависимостью

$$B/H = \mu_a,$$

где  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость, характеризующая магнитные свойства среды.

Для магнитных материалов величина  $\mu_a$  очень велика, что позволяет получить большие значения индукции  $B$  при сравнительно малых напряженностях  $H$ . В свою очередь, величина  $H$  определяется током, возбуждающим магнитное поле. Свойство тока возбуждать магнитное поле именуется магнитодвижущей силой (МДС). Зависимость напряженности  $H$  от тока  $I$  определяется законом полного тока.

Применительно к сердечнику из ферромагнитного материала с катушкой, закон полного тока может быть записан в таком виде:

$$H = Iw/l,$$

где  $w$  – число витков катушки;  $l$  – длина сердечника. Произведение  $I\mu_a$  называют магнитодвижущей или намагничивающей силой, а иногда числом ампер-витков.

При расчетах магнитных цепей используется аналогия между записью уравнений для тока в электрической цепи и для магнитного потока в магнитной цепи. Ток в электрической цепи можно определить как отношение ЭДС к электрическому сопротивлению, магнитный поток  $\Phi$  в магнитной цепи – как отношение МДС к магнитному сопротивлению, называемое законом Ома для магнитной цепи. Соответственно можно говорить и о законах Кирхгофа для магнитных цепей. При этом вместо тока  $I$  подставляют магнитный поток  $\Phi$ , вместо ЭДС  $E$  – МДС  $Iw$ , вместо электрического сопротивления  $R$  – магнитное сопротивление, пропорциональное длине сердечника  $l$  и обратно пропорциональное абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$  и площади сечения сердечника  $S$ . Таким образом, связь между магнитным потоком  $\Phi$  и магнитной индукцией  $B$  определяется соотношением  $\Phi = BS$ .

Следует отметить, что приведенные выше физические законы являются основными. Для отдельных элементов автоматики используются и другие физические закономерности и явления. Так, например, в магнитных усилителях используется явление одновременного намагничивания сердечника постоянным и переменным магнитными полями. В термоэлектрических датчиках – эффект образования термоЭДС в цепи, состоящей из разных металлов (или полупроводников), при разной температуре мест соединения. В фотоэлектрических

датчиках – эффект зависимости фотоЭДС между двумя контактирующими полупроводниками: от интенсивности освещения, а также вылет электронов из освещенных тел, называемый внешним фотоэффектом. В магнитоупругих датчиках используется зависимость магнитных свойств ферромагнитов от механических напряжений, а в пьезоэлектрических датчиках – эффект появления ЭДС на гранях некоторых кристаллов при их сжатии.

### *1.2.2. Механические элементы автоматики*

В автоматических системах используется большое количество механических элементов, таких как рычаги, пружины, редукторы и т. д. Их работа подчиняется законам Ньютона.

#### *Первый закон Ньютона.*

Его классическая формулировка выглядит следующим образом: существуют такие системы отсчёта, относительно которых любая материальная точка при отсутствии внешних воздействий сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. В автоматике это значит, что в установившемся режиме сумма сил, приложенных к любому механическому элементу равна нулю.

#### *Второй закон Ньютона.*

В инерциальной системе отсчета ускорение, которое получает материальная точка, прямо пропорционально приложенной к ней силе и обратно пропорционально её массе. В автоматике это значит, что в динамическом режиме сумма сил, приложенных к любому механическому элементу, движущемуся прямолинейно равна  $ma$ , где  $m$  – масса тела;  $a$  – его ускорение. Если элемент совершает вращательное движение, сумма сил равна  $J\varepsilon$ , где  $J$  – момент инерции тела;  $\varepsilon$  – его угловое ускорение.

#### *Третий закон Ньютона.*

Тела действуют друг на друга с силами, имеющими одинаковую природу, направленными вдоль одной и той же прямой, равными по модулю и противоположными по направлению. В автоматике закон используется, например, при рассмотрении процесса сравнения сил с помощью пружин в системах с механической обратной связью.

### 1.2.3. Гидравлические и пневматические элементы автоматики

Гидравлические и пневматические устройства получили широкое распространение в автоматике благодаря экономичности, бесшумности и плавности работы. К ним относятся гидро- и пневмоцилиндры, гидро- и пневмодвигатели и т. д. Их работа основана на использовании сил, действующих в рабочей среде.

В качестве рабочих сред в гидравлических и пневматических устройствах используются жидкости (капельные и газы) и дисперсные системы. *Жидкость* – непрерывная среда (континуум), обладающая свойством текучести. Жидкости разделяют на *капельные*, которые считаются несжимаемыми (вода, спирт, керосин, масла, ртуть и др.), и *газы*, считающиеся сжимаемыми (воздух, метан, азот и др.). *Дисперсная система* состоит из двух или более *фаз* (непрерывных сред, свойства которых в каждой точке одинаковы или непрерывно изменяются от одной точки к другой). К дисперсным системам относят *эмульсии* (система из двух взаимно нерастворимых жидкостей, одна из которых распределена в другой в виде мельчайших капелек); *суспензии* (система из жидкости и распределенных в ней мельчайших твердых частиц); *газированные жидкости* (система из жидкости и распределенных в ней мельчайших пузырьков газа); *газожидкостные потоки* (система из жидкости и газа, в которой объемы фаз соизмеримы с размером канала, по которому движется поток); *пены* (система из пузырьков газа, разделенных тонкими слоями жидкости); *туманы* (система из газа и распределенных в нем мельчайших капелек жидкости); *пыль* (система из газа и распределенных в нем мельчайших твердых частиц). Фаза, которая распределена в виде мельчайших частичек, называется дисперсной фазой, которая распределена в дисперсионной среде.

Рабочие среды характеризуются следующими физическими свойствами.

*Плотность* – масса вещества  $m$ , содержащаяся в единице объема  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Плотность капельных жидкостей зависит от температуры и давления:

$$\rho \approx \frac{\rho_0}{1 + \beta_T(T - T_0)} \text{ и } \rho \approx \frac{\rho_0}{1 + \beta_p(p - p_0)},$$

где  $\rho_0$  – плотность при 20 °С и атмосферном давлении,  $\beta_T$  – коэффициент температурного расширения;  $\beta_p$  – коэффициент объемного сжатия;  $T$ ,  $p$  – текущая температура и давление,  $T_0 = 273$  К;  $p_0 = 0,1013$  МПа (нормальное атмосферное давление).

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия называется *изотермический объемный модуль упругости жидкости*:

$$K = 1/\beta_p.$$

Плотность газов также зависит от температуры и давления:

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0Tz},$$

где  $z$  – коэффициент сжимаемости.

*Поверхностное натяжение*  $\sigma$  – энергия образования единицы межфазной поверхности или сила, приходящаяся на единицу длины поверхности раздела фаз. Измеряется в Дж/м<sup>2</sup> или Н/м.

*Вязкость* – свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигающим усилиям. Сила внутреннего трения между слоями движущейся жидкости, расположенными на расстоянии  $dz$ , прямо пропорциональна площади слоев  $S$  и градиенту скорости  $du/dz$ .

$$T = \pm \mu S \frac{du}{dz},$$

где  $\mu$  – *динамическая вязкость жидкости* (измеряется в Па·с). Это уравнение называется *законом Ньютона*. Отношение динамической

вязкости жидкости к ее плотности называется *кинематической вязкостью*:

$$\nu = \mu / \rho.$$

Работа гидравлических и пневматических устройств подчиняется ряду законов и соотношений, приведенных ниже.

*Основное уравнение гидростатики:*

$$p = p_0 + \rho gh,$$

где  $p$  – давление в жидкости на глубине  $h$  от свободной поверхности;  $p_0$  – внешнее давление на свободной поверхности жидкости.

*Закон Паскаля:* внешнее давление, приложенное к поверхности жидкости, находящейся в равновесии, передается всем точкам этой жидкости без изменения.

*Закон Архимеда:* на тело, погруженное в жидкость, действует сила, направленная вертикально вверх и равная весу жидкости в объеме погруженной части тела.

*Уравнение расхода* для потока жидкости (уравнение неразрывности потока при установившемся движении):

$$Q = \text{const},$$

то есть расход жидкости при изменении живого сечения потока остается неизменным. Отсюда следует, что средние скорости потока обратно пропорциональны площадям соответствующих живых сечений.

*Уравнение Бернулли:*

$$z + \frac{p}{\rho g} + \alpha \frac{u^2}{2g} = H = \text{const},$$

где  $z$  – координата слоя жидкости;  $u$  – скорость его движения;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по живому сечению потока. Здесь первое слага-



емое представляет собой *геометрический напор*, второе – *пьезометрический напор*, третье – *скоростной напор*. Вместе они составляют *полный напор*. Сумма первых двух слагаемых называется *потенциальным напором*.

Для изотермического движения газа уравнение Бернулли имеет вид:

$$z + \frac{\rho_0}{\rho_0 g} \ln \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{u^2}{2g} = \text{const} ;$$

для адиабатного:

$$z + \frac{\rho}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + \frac{RT}{(k-1)g} = \text{const} ,$$

где  $T$  – температура газа;  $R$  – газовая постоянная, равная отношению универсальной газовой постоянной к молярной массе газа;  $k$  – показатель адиабаты, равный отношению удельных теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Последнее слагаемое называется *температурным напором*.

### 1.3. Основные характеристики элементов автоматики

#### 1.3.1 Статические характеристики элементов автоматики

При описании работы элементов автоматики, наибольший интерес представляет зависимость выходной величины элемента автоматики от его входной величины. Любая система автоматики состоит из определенным образом соединенных элементов, при этом выходная величина одного элемента подается на вход последующего элемента. Поэтому можно говорить о передаче сигнала в системе. Входную величину обычно называют *входным сигналом* (будем обозначать его через  $x$ ), а выходную величину – *выходным сигналом* (будем обозначать его через  $y$ ). Режим работы, при котором входной и выходной сигналы постоянны, т.е.  $x = x_{уст}$  и  $y = y_{уст}$ , называют статическим или устано-

вившимся режимом. Характеристики, определяемые в этом режиме, называются *статическими*.

Следует отметить, что для многих электромеханических и магнитных устройств автоматики сигналом является напряжение или сила переменного тока. В статическом режиме постоянным является действующее значение напряжения или тока, хотя мгновенное значение при этом, естественно, изменяется по синусоидальному закону.

Для всех элементов автоматики основной характеристикой является *статический коэффициент преобразования*, определяемый из соотношения

$$K = y_{уст} / x_{уст}. \quad (1.9)$$

Коэффициент преобразования может быть определен экспериментально. Для этого устанавливают определенное значение входного сигнала  $x_{уст}$  и измеряют соответствующий ему выходной сигнал  $y_{уст}$ . По результатам нескольких опытов, при различных значениях  $x_{уст}$ , может быть построена статическая характеристика  $y = f(x)$ , представляющая функциональную зависимость выходной величины от входной в статическом режиме. Статические характеристики бывают линейными и нелинейными (рис. 2). Если коэффициент преобразования не зависит от входного сигнала, то статическая характеристика имеет вид прямой линии (рис. 2, а). Элемент автоматики, имеющий такую характеристику, называют линейным. У нелинейных элементов коэффициент преобразования не постоянен и статическая характеристика может иметь вид, показанный на рис. 2, б.

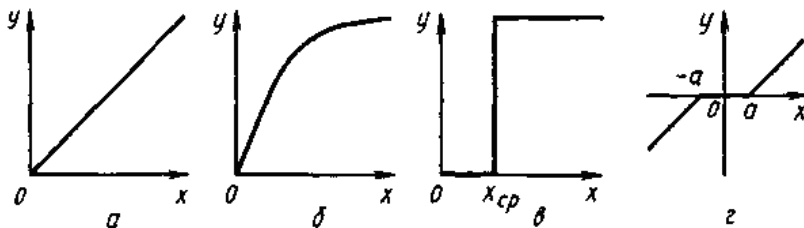


Рис.2. Статические характеристики элементов автоматики

Такая характеристика чаще всего бывает у усилительных элементов, при их насыщении. Сначала при увеличении входного сигнала пропорционально ему растет выходной сигнал, а затем рост его прекращается. В магнитных усилителях это связано, например, с явлением насыщения магнитной цепи. Поэтому про характеристику типа (рис. 2, б) говорят, что она имеет зону насыщения. На рис. 2, в приведена статическая характеристика релейного элемента автоматики. Характеристика релейного элемента представляет собой явно выраженную нелинейность. У релейного элемента при увеличении входного сигнала  $x$  от нуля до некоторого значения, называемого сигналом срабатывания  $x_{ср}$ , выходной сигнал равен нулю, а при  $x = x_{ср}$  выходной сигнал изменяется скачком и при дальнейшем увеличении входного сигнала остается постоянным.

Коэффициент преобразования элементов автоматики имеет размерность, определяемую отношением размерностей выходной величины к входной. Например, датчик, преобразующий перемещение (измеряемое в метрах) в напряжение (измеряемое в вольтах), имеет размерность коэффициента преобразования В/м. Если размерности выходного и входного сигнала одинаковы (например, у усилителей), то коэффициент преобразования будет безразмерной величиной. В этом случае его обычно называют коэффициентом усиления.

На рис. 2, г представлена типовая статическая характеристика элементов автоматики, выходной сигнал у которых равен нулю при малых значениях входного сигнала, т. е. эти элементы нечувствительны к слабым сигналам. Только при  $x \geq |a|$  начинается изменение выходного сигнала  $y$ . В этом случае значение  $x = a$  называют порогом чувствительности элемента автоматики. Диапазон изменения входного сигнала, при котором выходной сигнал равен нулю, называется зоной нечувствительности. Для элемента, характеристика которого показана на рис. 2, г, зона нечувствительности равна  $2a$ .

*Точность* работы датчика характеризуется погрешностью. Различают *абсолютную, относительную и приведенную погрешности*. При определении погрешности сравнивают реальную статическую характеристику датчика с идеальной линейной статической характеристикой. Реальная статическая характеристика отличается от идеальной, поскольку выходной сигнал может изменяться за счет внутренних свойств элемента (износ, старение и т. д.) или за счет изменения

внешних факторов (напряжение питания, температура и т. д.). Абсолютная погрешность представляет собой разность между реальным  $y_p$  и расчетным (идеальным)  $y_n$  выходными сигналами при одном и том же значении входного сигнала  $x$ . Абсолютная погрешность имеет размерность выходной величины, ее называют еще ошибкой:  $\Delta = y_p - y_n$ .

Относительная погрешность представляет собой отношение абсолютной погрешности к расчетному значению выходной величины и определяется в относительных единицах ( $\delta_{от} = \Delta / y_n$ ) или в процентах ( $\delta_{от} = (\Delta / y_n) 100$ ).

Приведенную погрешность определяют как отношение абсолютной погрешности к диапазону возможных значений выходного сигнала. Приведенную погрешность вычисляют в относительных единицах или в процентах. О точности датчика судят обычно по максимальной приведенной погрешности.

### 1.3.2. Динамические характеристики элементов автоматики

*Динамический режим* или *переходной процесс* в элементах автоматики возникает при переходе системы из одного установившегося режима в другой с иными значениями входного и выходного сигналов. В динамическом режиме отношение выходного сигнала к входному может быть не равно коэффициенту преобразования. Поведение элемента или системы автоматики в переходном процессе может быть описано с помощью переходных характеристик. Переходной характеристикой называют зависимость выходного сигнала от времени  $y(t)$  при скачкообразном изменении входного сигнала. На рисунке 3 показаны график изменения входного сигнала (*a*) и соответствующие ему графики (*б, в, г*) переходных характеристик наиболее распространенных элементов автоматики.

В момент времени  $t_0$  входной сигнал скачком изменяется от нуля до  $x_0$  (рис. 3, *a*). Если элемент автоматики является безынерционным, то в тот же момент времени  $t_0$  выходной сигнал скачком изменяется от нуля до  $y_0 = Kx_0$  (рис. 3, *б*). Как правило, электромеханические, механические элементы обладают инерционностью, которая тем больше, чем больше масса подвижных частей или индуктивность обмотки. В этом случае изменение выходного сигнала запаздывает по сравнению с изменением входного (рис. 3, *в*). Переходная характеристика имеет

вид экспоненты, т. е. кривой, стремящейся от нуля к значению  $y_0 = Kx_0$  со скоростью, пропорциональной в каждый момент времени разности между  $y_0$  и текущим значением выходного сигнала. Инерционность переходного процесса характеризуется значением постоянной времени  $T$ , выражаемой в секундах. На графике величину  $T$  можно определить, проведя касательную к кривой  $y(t)$  при  $t = t_0$  и продолжив ее до пересечения с горизонтальной линией  $y_0 = Kx_0$ . За время, равное  $T$ , выходной сигнал достигает 63 % своего нового установившегося значения.

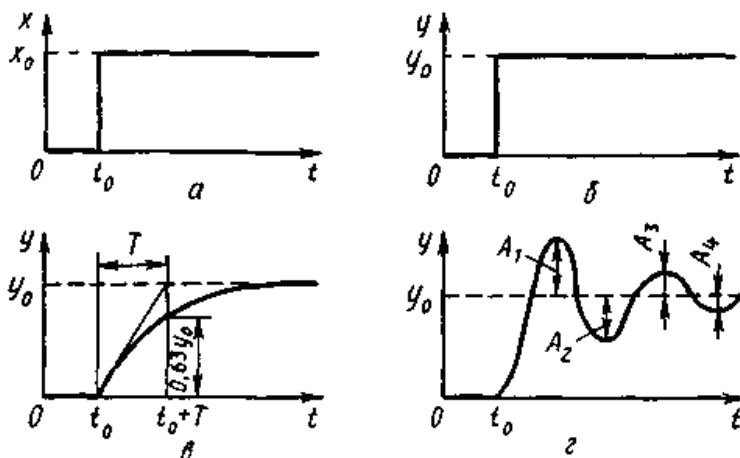


Рис. 3. Переходные характеристики элементов автоматики

Уравнение переходной характеристики имеет следующий вид:

$$y = y_0(1 - e^{-t/T}),$$

где  $e = 2,718$  – основание натурального логарифма.

Обычно на практике считают, что за время  $t = (3 - 5)T$  выходной сигнал достигает нового установившегося значения  $y_0$ . На самом деле за это время выходной сигнал достигает значений соответственно 95–99 %  $y_0$ . Разницу между значениями выходного сигнала в динамическом и установившемся режимах называют динамической погрешностью. Для ее уменьшения стремятся снизить постоянную времени, например, делая более легкими подвижные части элементов автоматики.

Во время переходного процесса могут возникнуть и колебания выходного сигнала. В электрических цепях это обычно связано с процессом обмена энергией между элементами колебательного контура: индуктивностью и емкостью. В механических узлах элементов автоматики колебания возникают обычно в тех случаях, когда одновременно действуют и силы инерции, и силы упругости (например, в пружинах). График колебательного затухающего переходного процесса показан на рис. 3, з. Как видно из приведенной переходной характеристики, изменение выходного сигнала происходит относительно значения  $u_0$ , амплитуда этих колебаний постепенно уменьшается, затухает. Для количественной оценки этого процесса вводят понятие коэффициента затухания  $\xi$ , который определяют по формуле

$$\xi = 1 - A_3/A_1,$$

где  $A_1$  и  $A_3$  – соседние амплитуды колебаний выходного сигнала в одну сторону (т. е. одного знака).

При незатухающем колебательном процессе  $A_3 = A_1$  и коэффициент затухания  $\xi = 0$ . Система автоматики является при этом неустойчивой. Если же коэффициент затухания стремится к единице, то переходный процесс будет аperiodическим (рис. 3, в).

### 1.3.3. Соединение элементов в системах автоматики

В системах автоматики различают *последовательное* и *параллельное* соединения элементов, а также *соединение с обратной связью*. При последовательном соединении выходной сигнал одного элемента является входным сигналом для последующего элемента. При параллельном соединении один и тот же сигнал является входным для двух элементов, а их выходные сигналы суммируются.

Общий коэффициент преобразования двух последовательно соединенных элементов цепи равен произведению коэффициентов преобразования этих элементов:  $K_{06} = K_1 K_2$ . Общий коэффициент преобразования двух параллельно соединенных элементов равен сумме коэффициентов преобразования каждого из этих элементов:

При соединении с обратной связью выходной сигнал одного элемента подается на его вход через элемент обратной связи. На рис. 4 показано соединение с обратной связью. Кругом, разделенным на

четыре сектора, показано устройство, в котором происходит суммирование сигналов. Иногда сектор зачерняют, это означает, что поступающий сигнал берется со знаком минус. В зависимости от знака сигнала обратной связи различают *положительную* и *отрицательную* обратную связь. На рис. 4, а показано соединение с положительной обратной связью, на рис. 4, б – с отрицательной обратной связью.

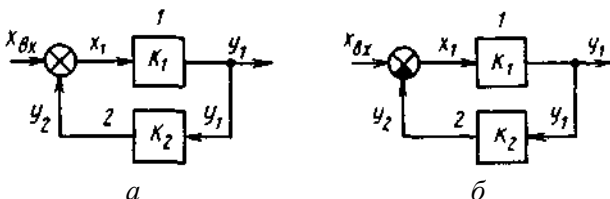


Рис. 4. Соединение элементов с обратной связью

Элемент 1 включен в прямую цепь, элемент 2 – в обратную. Можно сказать, что элемент 1 охвачен обратной связью.

При соединении с обратной связью на вход элемента 1 поступает входной сигнал  $x_1 = x_{вх} \pm y_2$ , где знак плюс соответствует положительной обратной связи, знак минус – отрицательной. Выходной сигнал элемента 1 равен произведению его входного сигнала на коэффициент преобразования:

$$y_1 = E_1 \bar{q}_1 = E_1 \bar{q}_{a0} \pm E_1 \bar{q}_2.$$

Этот сигнал поступает на вход элемента 2, включенного в цепь обратной связи. Следовательно, выходной сигнал элемента 2 можно получить умножив сигнал  $y_1$ , на коэффициент преобразования элемента 2:  $y_2 = K_2 y_1$ . Подставив значение  $y_2$  в выражение для  $y_1$  т. е.

$$y_1 = K_1 \bar{q}_{a0} \pm E_1 K_2 \bar{q}_1 \quad \text{и} \quad \text{преобразовав его, получим} \\ y_1 \pm K_1 K_2 y_1 = E_1 \bar{q}_{a0}, \text{ или } y_1 (1 \pm K_1 K_2) = E_1 \bar{q}_{a0}$$

Общий коэффициент преобразования по определению равен отношению выходного сигнала к входному. В данном случае выходным является сигнал  $y_1$ , а входным –  $x_{вх}$ . Их отношение  $y_1 / x_{a0} = \bar{E}_1 / (1 \mp K_1 K_2)$ . Теперь в этом выражении знак минус со-

ответствует положительной обратной связи, а знак плюс – отрицательной.

Проанализируем на примере выражение для коэффициента преобразования при положительной обратной связи

$$K_{\text{пос}} = \frac{K_1}{1 - K_1 K_2}.$$

Пусть в качестве элемента 1 используется усилитель с коэффициентом усиления 10, т. е.  $K_1 = 10$ . Введем обратную связь, подключив для этого в цепь обратной связи элемент 2 с коэффициентом преобразования  $K_2 = 0,08$ :

$$K_{\text{пос}} = \frac{10}{1 - 10 \cdot 0,08} = 50.$$

Таким образом, благодаря *положительной обратной связи* получен более *высокий коэффициент усиления*. Положительная обратная связь чаще всего используется в усилительных элементах автоматики.

На принципе отрицательной обратной связи основана работа систем автоматического регулирования (САР). Именно благодаря отрицательной обратной связи и обеспечивается автоматическое поддержание регулируемой величины на заданном уровне. Ведь посредством отрицательной обратной связи постоянно определяется отклонение  $y(t)$  от  $g(t)$  и вырабатывается соответствующее этому отклонению регулирующее воздействие. (см. рис. 1, в) В САР в цепь обратной связи включен чувствительный элемент. Усилительные и исполнительные элементы автоматики включены в прямую цепь. Пусть коэффициенты преобразования всех элементов, включенных в прямую цепь, можно учесть, введя общий коэффициент преобразования  $K_{\text{пр}}$ , а чувствительный элемент имеет коэффициент преобразования  $K_{\text{д}}$ . Тогда в установленном режиме общий коэффициент преобразования САР

$$K_{\text{САР}} = K_{\text{пр}} / (1 + K_{\text{пр}} K_{\text{д}}).$$

При достаточно большом усилении можно принять



$$E_{\text{т0}} E_{\text{А}} \gg 1 \text{ и } E_{\text{НАД}} \approx E_{\text{т0}} / (E_{\text{т0}} E_{\text{А}}) = 1 / E_{\text{А}}$$

Как видим, коэффициент преобразования САР полностью определяется коэффициентом преобразования чувствительного элемента. Следовательно, именно от точности чувствительного элемента зависит точность всей работы САР. Поэтому чувствительным элементам в системах автоматики, а также их метрологическим характеристикам, надежности придается особое значение. Наличие же обратной связи имеет важнейшее значение не только в автоматике, но и в биологических, экономических и социальных системах.

## 2. ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В АВТОМАТИКЕ

Как уже отмечалось выше, чувствительными элементами в автоматике являются датчики. Датчиками систем автоматики принято называть измерительные устройства, выполняющие функцию измерения регулируемых величин и, если необходимо, функции их преобразования в вид, наиболее удобный для передачи в цепь регулирующего устройства.

Различают датчики перемещения, положения, скорости, ускорения и т.д. По способу получения информации датчики подразделяют на дискретные, фазовые и амплитудные; по способу преобразования информации — на контактные и бесконтактные (резистивные, емкостные, фотоэлектрические, индуктивные и др.). По конструкции датчики подразделяют на линейные и роторные. Роторные датчики кинематически связаны с выходным валом двигателя и осуществляют косвенное измерение величины перемещения рабочего органа. Линейные датчики, расположенные на неподвижной (относительно измеряемого перемещения) части объекта управления, производят прямое измерение линейных перемещений рабочего органа.

Точность датчика определяется конструктивными особенностями самого датчика, структуры электронной схемы преобразователя его сигнала, ее помехозащищенности и др.

Физическая природа регулируемых величин очень разнообразна, поэтому различны и датчики. Однако в большинстве случаев на вы-

ходе датчика будет либо механическая величина (перемещение, сила), либо электрическая величина {напряжение, ток, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др.).

Наиболее легко измерению поддаются электрические величины, поэтому во многих случаях при измерении неэлектрических величин совместно с измерительным органом предусматривается специальное устройство – преобразователь, в котором неэлектрическая величина на его входе преобразуется в электрическую величину на его выходе. Сейчас почти любая величина независимо от ее физической природы может быть преобразована в электрическое напряжение или ток, поэтому при создании систем автоматического регулирования наиболее широкое распространение получили электрические датчики – измерительные устройства с преобразованием неэлектрической величины в электрическую.

Следует отметить, что датчики автоматических систем – это их «органы чувств» и поэтому одна из самых трудных и ответственных проблем при создании систем автоматического управления – это разработка соответствующих датчиков, способных отображать и контролировать регулируемую величину в системе автоматики.

Хотя свойства, которыми должен обладать каждый датчик, чтобы соответствовать своему назначению в автоматической системе, весьма разнообразны, можно выделить основные требования, предъявляемые к ним: однозначность зависимости между входной и выходной величинами, когда конкретному значению входной величины соответствует строго определенное значение выходной; максимально возможная линейность – самая простая наглядная зависимость между выходной и входной величинами; высокая чувствительность к измеряемой величине; достаточная мощность выходного сигнала, обеспечивающая при возможности дальнейшее управление элементами системы без усилителей или с минимальным усилением; стабильность характеристик во времени, то есть в течение определенного периода эксплуатации; отсутствие влияния нагрузки выходной цепи на измеряемую электрическую величину на технологический процесс в целом; малая инерционность, то есть минимальная задержка в передаче сигнала через датчик; наименьшее влияние посторонних факторов на характеристики датчика; устойчивость к воздействиям окружающей среды; надежная и долговечная работа; невысокая стоимость; тех-

нологичность изготовления; удобство эксплуатации; достаточная степень унификации отдельных частей.

## 2.1. Классификация датчиков

Классификации датчиков систем автоматики может быть различной. Наиболее распространенными классификационными признаками датчиков, измеряющих и преобразующих управляемые величины той или иной физической природы в одну из электрических величин, являются вид или тип выходной и измеряемой управляемой величин. В зависимости от выходной величины различают омические, емкостные, индуктивные, и другие датчики, а в зависимости от входной – датчики температуры, давления, уровня, расхода, перемещений, скорости и ускорений, освещенности, влажности, излучений, акустические и т.п.

Так как один и тот же датчик иногда может быть использован для измерения различных неэлектрических величин, то наиболее приемлемой оказывается классификация по выходной величине, которая близко связана с принципом его действия.

## 2.2. Датчики сопротивления

К ним относятся металлические и полупроводниковые терморезисторы (преобразуют изменение температуры в изменение сопротивления); фоторезисторы (преобразуют изменение освещенности в изменение сопротивления); потенциометры (преобразуют линейное или угловое перемещение в изменение сопротивления); тензорезисторы (преобразуют механические деформации в изменение сопротивления).

**Металлические термометры** сопротивления имеют практически линейную характеристику, поэтому коэффициент передачи постоянен во всем диапазоне измерений. Например, для платинового термометра сопротивления со стандартной градуировкой Pt100 при повышении температуры от 0 до 20°C сопротивление изменяется от 100,00 до 107,79 Ом. Коэффициент преобразования:

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{107,79 - 100,00}{20 - 0} = 0,3895 \text{ Ом/}^\circ\text{С.}$$

Для оценки динамических свойств термометров сопротивления нормируется показатель тепловой инерции – время, необходимое для того, чтобы при внесении термометра в среду с постоянной температурой, разность температуры среды и любой точки термометра составила 0,37 значения температуры среды. Так как термометр сопротивления является апериодическим звеном первого порядка, его переходная характеристика при внесении термометра в среду с постоянной температурой описывается уравнением:

$$h(t) = K(1 - e^{-t/T}).$$

Нетрудно рассчитать что переходная характеристика достигнет значения  $h(t) = K(1 - 0,37)$  за время, равное  $T$ , то есть постоянной времени. Следовательно, для термометра сопротивления показатель тепловой инерции и постоянная времени равнозначны.

Например, по паспортным данным термометра сопротивления платинового ТСП-1287 с градуировкой Pt100 показатель тепловой инерции равен 8 с. Следовательно, постоянная времени имеет то же значение, коэффициент передачи рассчитан ранее, и передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{T_p + 1} = \frac{0,3895}{8p + 1}.$$

График изменения сопротивления ТСП-1287 при скачкообразном изменении температуры от 0 до 20 °С (переходная характеристика) показан на рис. 5.

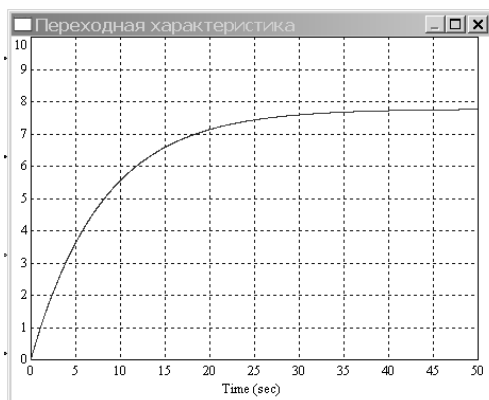


Рис. 5. Переходная характеристика ТСП-1287

**Полупроводниковые терморезисторы** (термисторы) имеют нелинейную характеристику, поэтому коэффициент преобразования зависит от температурного диапазона, в котором работает устройство. Кроме того, при повышении температуры у одних полупроводников сопротивление растет (позисторы), у других падает. Например, у термистора ММТ-4 при повышении температуры от 0 до 20 °С сопротивление изменяется от 1500 до 1000 Ом. Коэффициент преобразования

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{1000 - 1500}{20 - 0} = -25 \text{ Ом/}^\circ\text{С}.$$

Постоянная времени термисторов приводится в их паспортных данных. Для ММТ-4 она равна 115 с. Передаточная функция термистора, как апериодического звена первого порядка, имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} = -\frac{25}{115p + 1}.$$

График изменения сопротивления ММТ-4 при скачкообразном изменении температуры от 0 до 20 °С (переходная характеристика) показан на рис. 6.

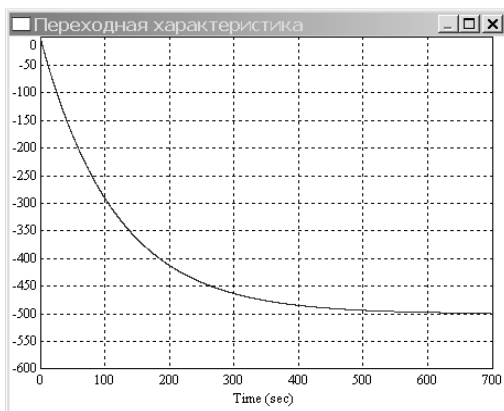


Рис. 6. Переходная характеристика ММТ-4

Типовой схемой включения металлических и полупроводниковых терморезисторов является мост Уитстона.

У фоторезисторов сопротивление падает при изменении освещенности, причем коэффициент преобразования зависит от длины волны излучения. Для расчета коэффициента преобразования необходимы такие параметры, как темновое сопротивление при отсутствии света  $R_T$  и кратность  $R_T/R_{св}$ , где  $R_{св}$  – сопротивление при освещенности 200 лк. Например, для фоторезистора ФСК-2  $R_T = 3,3$  МОм,  $R_T/R_{св} = 100$ , следовательно,  $R_{св} = 33$  кОм. Коэффициент передачи

$$K = \frac{\Delta R}{\Delta \Phi} = \frac{33 - 3300}{200 - 0} = -16,335 \text{ кОм/лк.}$$

Часто выходной величиной фоторезисторов считают изменение фототока в измерительной цепи при рабочем напряжении. В этом случае по справочным данным определяют интегральную чувствительность в А/лм, которая представляет собой отношение фототока к световому потоку. Для получения коэффициента передачи в А/лк требуется умножить интегральную чувствительность на площадь светочувствительной площадки фоторезистора. Например для ФСК-2 интегральная чувствительность составляет 0,5 А/лм, пло-

щадь светочувствительной площадки  $30,6 \text{ мм}^2$ . Коэффициент передачи

$$K = 0,5 \cdot 30,6 \cdot 10^{-6} = 15,3 \cdot 10^{-6} \text{ А/лк.}$$

Постоянная времени по паспортным данным фоторезистора ФСК-2 равна  $0,14 \text{ с}$ . Передаточная функция фоторезистора, как апериодического звена первого порядка, имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{T_p p + 1} = \frac{15,3 \cdot 10^{-6}}{0,14 p + 1}.$$

График изменения фототока в цепи ФСК-2 при скачкообразном изменении освещенности от  $0$  до  $200 \text{ лк}$  (переходная характеристика) показан на рис. 7.

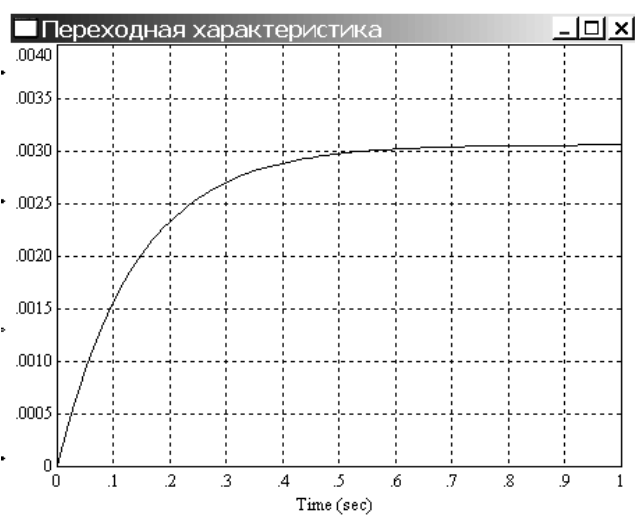


Рис. 7. Переходная характеристика ФСК-2

**Потенциометрические датчики** за счет изменения своего электрического сопротивления преобразуют угловое или линейное перемещение измерительного органа в постоянный или переменный ток.

Различают датчики с угловым (рис. 8, а) и линейным (рис. 8, б) перемещением подвижного контакта, соединенного с подвижной частью объекта, изменение положения которого измеряется. Для датчика каждого вида можно установить зависимость выходной величины от входной.

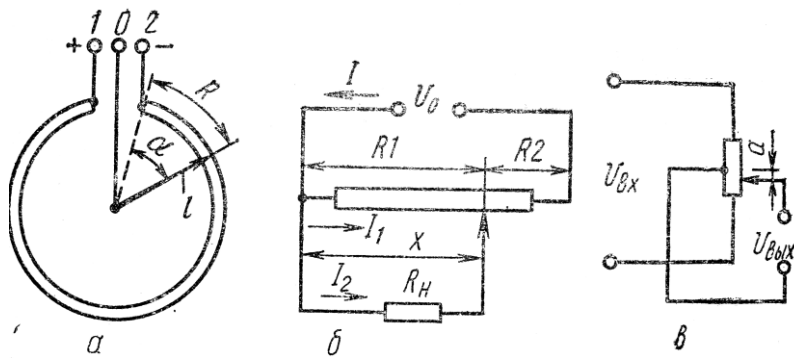


Рис. 8. Потенциометрические датчики:  
 а – с угловым перемещением контакта; б – с линейным перемещением контакта;  
 в – с отводом от средней точки

Если для датчика с угловым перемещением контакта обозначить сопротивление, приходящееся на единицу длины окружности при равномерной намотке, как  $r$ , а радиус датчика –  $l$ , то зависимость сопротивления  $R$  на выходе между клеммами 0 и 2 от угла  $\alpha$  поворота ползунка

$$R = r \alpha l,$$

Чувствительность такого датчика

$$S = dR/dl,$$

то есть она тем выше, чем больше радиус ползунка и чем больше сопротивление, приходящееся на единицу длины окружности (по-



следнее зависит от удельного сопротивления материала и сечения наматываемой проволоки).

Для потенциометрического датчика с линейным перемещением контакта входной величиной является положение подвижного контакта –  $x$ , выходной – напряжение  $U_n$  при постоянном сопротивлении  $R_n$ , которое представляет собой сопротивление устройства, воспроизводящего изменение положения ползунка.

Применительно к схеме, изображенной на рис. 12, б, можно написать следующую систему уравнений:

$$I = I_1 + I_2; \quad I_1 : I_2 = R_n : R_1; \quad R_1 : R_0 = x : l_0;$$

$$U_0 = I(R_0 - R_1) + I_2 R_n; \quad U_n = I_2 R_n,$$

где  $U_0$  – напряжение источника питания (стабилизированное);  $R_0 = R_1 + R_2$  – полное сопротивление потенциометра;  $R_1$  и  $R_2$  сопротивление частей, на которые ползунок делит полное сопротивление потенциометра;  $l_0$  – длина потенциометра;  $I_1$  и  $I_2$  – токи в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ ;  $I$  – ток от источника питания.

Решая эту систему уравнений относительно выходной величины  $U_n$ , получим:

$$U_i = U_0 \frac{R_1}{R_i} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_2 R_1}{R_0 R_i}}.$$

Если  $R_i \gg R_0$ , что практически и бывает, то

$$U_i \cong U_0 \frac{R_1}{R_i} = U_0 \frac{x}{l_0}.$$

Значит, выходная величина  $U_i$  пропорциональна величине  $x$ . Чувствительность такого датчика

$$S = \frac{dU_{\text{н}}}{dx} = \frac{U_0}{l_0}.$$

Заметим, что если у потенциометрического датчика сделать отвод от середины обмотки (рис. 8, в), то такой датчик будет характеризовать не только значение, но и направление перемещения движка.

К недостаткам потенциометрических датчиков можно отнести наличие скользящего контакта и то, что характеристика «выход» от «входа» не всегда получается линейной. Однако простота конструкции и возможность обойтись без усилителей зачастую компенсируют отмеченные недостатки и в настоящее время потенциометрические датчики находят широкое применение в качестве чувствительных и задающих элементов автоматических систем.

**У тензометрических датчиков** или так называемых тензорезисторов, сопротивление повышается при его относительном удлинении. Уравнение преобразования:

$$\Delta R/R_0 = K_{\text{тз}} (\Delta l/l),$$

где  $K_{\text{тз}}$  – коэффициент тензочувствительности.

Коэффициент передачи целесообразно определять не для отдельного тензорезистора, а для схемы его включения, где входной величиной будет относительное удлинение тензорезистора, а выходной – изменение напряжения на выходе схемы. Относительное удлинение тензорезистора может быть определено как отношение напряжений в деформируемом материале, на который наклеен тензорезистор, к модулю упругости этого материала, то есть

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\tau}{G},$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения;  $E$  – модуль упругости первого рода;  $\tau$  – касательные напряжения;  $G$  – модуль упругости второго рода.

Например, для измерения нормальных напряжений в изгибной консольной балке используют два тензорезистора, один из которых при изгибе растягивается, другой сжимается. Их включают в мостовую схему, напряжение на выходе которой

$$U = \frac{U_{\text{пит}}}{2} K_{\text{ТЗ}} \varepsilon,$$

где  $U_{\text{пит}}$  – напряжение питания мостовой схемы. Коэффициент передачи

$$K = \frac{U}{\sigma} = \frac{U_{\text{пит}} K_{\text{ТЗ}}}{2E}.$$

Предположим, что при деформации балки напряжения в ней возросли на 100 МПа. Балка изготовлена из стали с модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Используются константановые тензорезисторы, у которых  $K_{\text{ТЗ}} = 2,1$ . Напряжение питания мостовой схемы  $U_{\text{пит}} = 5$  В. Коэффициент передачи

$$K = \frac{5 \cdot 2,1}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^5} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ В/МПа.}$$

Постоянная времени тензорезисторов близка к нулю, поэтому их считают безынерционными звеньями.

Кроме мостовых схем для тензорезисторов используют также метод PICOSTRAIN, разработанный фирмой Asam (Германия), основанный на преобразовании сопротивления в длительность импульса, а затем в цифровой код.

К недостаткам тензорезисторов можно отнести влияние температуры на сопротивление.

### 2.3. Индуктивные датчики

К ним относятся параметрические индуктивные преобразователи линейных и угловых перемещений с переменным расстоянием между якорем и сердечником, с переменной площадью перекрытия воздушного зазора, в том числе дифференциальные; дифференциально-трансформаторные преобразователи перемещений (выходная величина – переменное напряжение); конечные бесконтактные индуктивные выключатели; магнитоупругие датчики силы.

Для параметрических преобразователей основной схемой включения является мост переменного тока. Коэффициент передачи в этом случае имеет размерность В/м для датчиков линейного перемещения или В/° для углового.

Например, для датчика EDCL50 фирмы Megatron Elektronik AG & Co. (Германия) при перемещении якоря на 50 мм выходной сигнал встроенной схемы составит 10 В. Коэффициент передачи  $K = 10/0,05 = 200$  В/м.

Для дифференциально-трансформаторных преобразователей коэффициент передачи будет иметь такую же размерность.

Например, по паспортным данным датчика МАСТ50 фирмы Megatron Elektronik AG & Co. (Германия) чувствительность составляет 23 мВ/В/мм. То есть при напряжении питания 1В и перемещении якоря на 1 мм выходной сигнал будет равен 23 мВ. Коэффициент передачи при напряжении питания 5 В  $K = 23 \cdot 5 = 115$  мВ/мм = 115 В/м.

Динамические параметры оцениваются постоянной времени, которая может быть определена по приведенной в паспортных данных максимальной частоте изменения входного сигнала. Например, для датчика EDCL50 она равна 100 Гц, то есть  $T = 1/100 = 0,01$  с. Передаточная функция датчиков соответствует передаточной функции апериодического звена первого порядка.

Конечные выключатели индуктивного типа имеют релейную характеристику, где параметр срабатывания – расстояние между датчиком и якорем, выходной сигнал обычно цифровой (высокий уровень +5 В при срабатывании).

Магнитоупругие датчики обычно строятся по трансформаторной или параметрической схеме и преобразуют силу, приложенную к сердечнику в выходное напряжение, то есть размерность коэффи-

циента передачи В/Н. Постоянную времени можно определить как  $T = L/R$ , где  $L$  – индуктивность выходной обмотки,  $R$  – ее активное сопротивление. Датчик является апериодическим звеном первого порядка.

#### 2.4. Гальваномангнитные датчики

В основе их работы лежат гальваномангнитные явления в электропроводных телах при прохождении через них тока в магнитном поле. Наиболее часто используются датчики на основе эффекта Холла. Суть эффекта заключается в возникновении ЭДС  $U$  на гранях пластины, расположенной в магнитном поле с индукцией  $B$ , при прохождении через нее тока  $I$ . ЭДС Холла определяется по формуле

$$U = \frac{\gamma}{1 + R_{\text{вых}}/R_{\text{н}}} IB,$$

где  $\gamma$  – чувствительность датчика;  $R_{\text{вых}}$  – его выходное сопротивление;  $R_{\text{н}}$  – сопротивление нагрузки.

Датчики могут использоваться для измерения параметров магнитных полей или других величин с преобразованием в магнитную индукцию.

Предположим, что датчик Холла типа Х222 используется для измерения перемещения (перемещается экран или постоянный магнит). Датчик работает в магнитном поле с индукцией 10 мТл, причем при перемещении на 4 мм индукция изменяется во всем диапазоне. По паспортным данным чувствительность датчика  $\gamma = 0,6$  В/А·Тл, ток управления  $I = 200$  мА, выходное сопротивление  $R_{\text{вых}} = 5$  Ом. Выход датчика подключен к буферному каскаду с входным сопротивлением  $R_{\text{н}} = 1$  МОм. Коэффициент передачи будет определяться как отношение изменения ЭДС Холла к изменению входного перемещения:

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{\gamma}{\Delta x(1 + R_{\text{вых}}/R_{\text{н}})} I \Delta B = 0,3 \text{ В/м.}$$

Постоянная времени датчика составляет несколько микросекунд, поэтому в расчетах ей пренебрегают и считают датчик безынерционным звеном.

## 2.5. Емкостные датчики

Емкостные датчики представляют собой конденсатор переменной емкости. Как известно, емкость конденсатора определяется уравнением

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / d ,$$

где  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  А·с/(В·м) – диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между пластинами конденсатора;  $A$  – площадь перекрытия пластин;  $d$  – расстояние между ними. Для измерения линейных или угловых перемещений используются конденсаторы с переменной площадью пластин или с переменным расстоянием между ними.

Конденсаторы с переменной площадью пластин имеют высокую линейность характеристики и могут использоваться для измерения сравнительно больших перемещений – до десятков сантиметров. Они могут иметь различные конструкции: для угловых перемещений, для линейных перемещений с подвижной обкладкой, для линейных перемещений с подвижным экраном.

Конденсаторы с переменным расстоянием между пластинами используются для измерения перемещений до 1 мм. Их недостатком является нелинейность характеристики. Для повышения линейности и чувствительности используют дифференциальные конденсаторы.

Емкостные датчики можно также использовать для измерения параметров диэлектрических сред, функционально связанных с их диэлектрической проницаемостью: влажности, концентрации веществ, уровня заполнения и т. п.

Общими недостатками емкостных датчиков являются чувствительность к помехам, высокоомность, необходимость точного механического изготовления.

Для работы с емкостными преобразователями чаще всего используются две основные схемы: емкостной мост переменного тока и резонансная схема. В последнем случае измерительный конденсатор включается в колебательный контур. При изменении емкости изменяется резонансная частота контура, служащая выходным параметром схемы.

## 2.6. Термоэлектрические датчики

К ним относятся термопары, преобразующие температуру в термоЭДС (эффект Зеебека). Они имеют нелинейную характеристику, поэтому коэффициент передачи зависит от диапазона измерений. Например, для термопары на основе металлов платина-платинородий ТПП-761-01 со стандартной градуировкой ПП (R) при изменении температуры от 0 до 100°C термоЭДС изменяется от 0 до 0,643 мВ. Коэффициент передачи

$$K = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{0,643 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,643 \cdot 10^{-5} \text{ В/}^\circ\text{C}.$$

Постоянная времени в паспортных данных термопар называется показателем тепловой инерции и для ТПП-761-01 составляет 50 с.

Термопара является аperiodическим звеном первого порядка. Для рассматриваемого примера передаточная функция

$$W(p) = \frac{K}{T_p + 1} = \frac{0,643 \cdot 10^{-5}}{50p + 1}.$$

## 2.7. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики чаще всего изготавливают из кварца, сегнетоэлектриков, титаната бария, дигидрофосфата аммония и используют их для измерения быстро изменяющихся во времени величин: усилий, давлений, ускорений, вибраций, ориентации рабочих органов машин. Принцип действия пьезодатчиков основан на использовании пьезоэлектрического эффекта - при сжатии кварцевой пластинки некоторой силой F, на ее противоположных поверх-

ностях, а следовательно, на электродах возникают электрические заряды. Величина заряда пропорциональна сжимающей силе  $F$ , т. е.

$$Q = k_{\text{п}}F,$$

где  $k_{\text{п}}$  – коэффициент пропорциональности, называемый пьезомодулем (для кварца  $k_{\text{п}}=2,1 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н).

При изменяющейся силе  $F$  на выходе появляется напряжение, которое зависит от заряда и геометрии размеров кристалла

$$U_{\text{вых}} = Q\delta/\epsilon S,$$

где  $S$  – площадь пластины пьезоэлемента,  $\delta$  – толщина пьезоэлемента;  $\epsilon$  – диэлектрическая постоянная материала.

Из этой формулы видно, что при известном (измеренном) выходном напряжении можно определить силу  $F$ . Если  $F = \text{const}$ , то  $U_{\text{вых}} = 0$ . Для усиления напряжения, снимаемого с выхода пьезодатчика, требуются высокостабильные электронные усилители с входным сопротивлением порядка  $10^{12}$ - $10^{14}$  Ом.

Пьезоэлектрические датчики относятся к дифференцирующим звеньям первого порядка.

## 2.8. Контактные датчики

В контактных датчиках в результате различных воздействий происходит замыкание и размыкание контактов, включенных в какую-либо электрическую цепь, где формируется электрический импульс, который используется в дальнейшем либо для привода исполнительного механизма, либо для приведения в действие его управляющего органа. Контактные датчики бывают одностороннего действия (рис. 9, а) с одним неподвижным и одним подвижным контактами и двухстороннего действия (рис. 9, б) с одним подвижным и двумя неподвижными контактами, а также многопредельными, то есть с несколькими последовательно замыкающимися друг за другом контактами, при изменении размера от  $l_1$  до  $l_3$  (рис. 9, в).



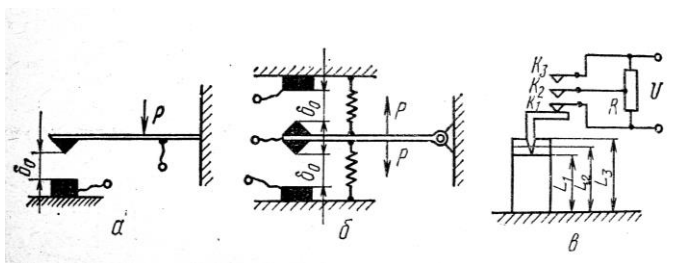


Рис. 9. Контактные датчики:  
 а – одностороннего действия; б – двухстороннего действия;  
 в – многопредельные

Несмотря на простоту, контактные датчики могут контролировать линейные размеры с очень высокой точностью (до одного микрометра и точнее). Все дело в самих контактах и в том, в какую цепь они включены. Чем меньше ток цепи, в которую введен контактный датчик тем выше его точность. Весьма точные результаты можно получить, включая датчик в базовую цепь транзистора. Нечувствительность контактных датчиков определяется начальным зазором  $\delta_0$  между контактами. Выходная величина датчика будет равна нулю до тех пор, пока подвижная часть контактов под действием измеряемой величины  $P$  не преодолеет зазор  $\delta_0$ .

Основной недостаток контактных датчиков – ограниченный срок службы контактов, которые подвергаются действию электрической дуги, обгорают, изменяют свои свойства и размеры. В системе автоматики контактные датчики используются в виде датчиков положения, концевых выключателей и др.

## 2.9. Фотоэлектрические датчики

В настоящее время широкое распространение получили фотоэлектрические датчики, в которых использован принцип модуляции светового потока с помощью растрового сопряжения. В зависимости от величины расположения в пространстве линейки и диафрагмы растровое сопряжение может быть нониусным, обтюраторным или муаровым. Оптическая форма представления информации сигнала наиболее удобна для отображения величины угла поворота

вала, так как съём информации не нагружает вал каким-либо моментом, а точность элементов оптических преобразователей может быть достигнута весьма высокой. Цифровая форма представления информации гарантирует высокую точность и помехоустойчивость. Работа фотоэлектрической части формирова­телей (преобразователей) основана на использовании явления фотоэффекта, возникающего при попадании светового потока, прошедшего через прозрачные участки кодовых шкал, на фотоэлементы, преобразующие изменение светового потока в фототок, служащий исходным электрическим сигналом для последующих схем. Такие преобразователи получили широкое распространение, так как при относительно небольших размерах позволяют добиться высокой точности преобразования информации. Если на диск нанесена маска, соответствующая одному из кодов, применяемых для повышения помехоустойчивости и надёжности считывания, то в схеме предусматривают декодирующее устройство, преобразующее этот код в обычный, двоичный код. Кодирование дисков фотоэлектрических преобразователей выполняют из оптического стекла, на которое фотохимическим способом наносят маску в виде концентрических дорожек с прозрачными и непрозрачными для светового излучения участками. Количество таких дорожек и ширина кодовых участков определяются разрешающей способностью преобразователей и видом выбранного кода. При кодировании устанавливается соответствие между каждым уровнем квантования и некоторой кодовой комбинацией или группой. Кодирование ведётся либо по методу последовательного счёта элементарных приращений преобразуемого сигнала, либо по методу позиционного считывания кода, формируемого для каждой выборки преобразуемого сигнала. При кодировании по методу позиционного считывания кодовые комбинации для всех уровней шкалы воспроизведены заранее. При этом преобразователь должен иметь число кодовых дорожек, равное разрядности считываемого двоичного числа.

Оптические преобразователи угловых и линейных величин в цифровую форму делят на две основные группы: последовательного счёта штрихов и позиционного считывания кодов по кодовой маске. Точность в первой группе ограничивается числом штрихов на измерительной линейке или лимбе, во второй группе – числом кодовых дорожек, соответствующих числу разрядов.

Повышение точности достигается использованием системы штрихов на двух лимбах, образующих растровый интерполятор. Растровый принцип основан на появлении муаровых колец, расположение которых вдоль направления штрихов позволяет проводить интерполяцию в увеличенном масштабе по сравнению с расстоянием между штрихами. Обычно в растровом интерполяторе производится измерение фазы периодической функции освещенности муаровой полости по методу позиционного считывания. Число муаровых полос, измеренное по методу последовательного счета, также может нести информацию об опорных точках функции, подлежащей последующей интерполяции. Преобразователи, использующие метод последовательного счета числа приращений непрерывного сигнала, можно разделить на два типа – циклические и накапливающие. Преобразователь накапливающего типа реагирует не угловое положение, а приращение углового положения вала. При этом реверсивный счетчик, присоединенный к преобразователю, управляется сигналами с нескольких фотоприемников, позволяющих учесть направление вращения вала, а угол поворота определяется по алгебраической сумме импульсов, принятых счетчиком.

При кодировании линейного перемещения используют широко применяемые в оптике дифракционные решетки, разрешающая способность которых в настоящее время достигает 1000 штрихов на 1 мм и выше. Преобразователи позиционного растрового считывания имеют кодовую шкалу, механически связанную с входным валом, и набор фотоэлементов. Цифровой код, сформированный на выходе преобразователя, снимается с фотоэлементов для последующей обработки.

## 2.10. Индукционные датчики

Преобразуют скорость линейного или вращательного движения в электрическое напряжение и, следовательно, являются дифференцирующими устройствами по входному перемещению или углу поворота. Линейные индукционные датчики используются в вибропреобразователях для измерения виброскорости. К датчикам скорости вращения относятся тахогенераторы.

Для линейных датчиков ЭДС на выходе

$$U = Blv,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля;  $l$  – длина витка катушки;  $W$  – число витков;  $v$  – относительная скорость перемещения витка и магнитного поля.

*Тахогенератор* преобразует скорость вращения вала в напряжение. Коэффициент передачи в этом случае измеряется в В·с. В паспортных данных приводится значение крутизны выходного напряжения в В/об/мин, которое и является коэффициентом передачи. Например, для тахогенератора ТП-212-0,20-0,5-01 крутизна выходного напряжения 0,20 В/об/мин. Для получения коэффициента передачи в единицах СИ скорость вращения представляется в радианах в секунду, то есть  $K = 0,20 \cdot 60 / 2\pi = 1,91$  В·с. Постоянная времени тахогенератора обычно невелика, и ей пренебрегают, считая тахогенератор безынерционным звеном.

Если тахогенератор используется для создания обратной связи по углу поворота, он является дифференцирующим звеном с уравнением

$$\Delta U = K \frac{d\alpha}{dt} \text{ или } \Delta U = Kp\Delta\alpha.$$

Передаточная функция тахогенератора  $W(p) = Kp$ .

### 2.11. Акселерометры

Конструктивно представляют собой массу  $m$ , подвешенную на упругом элементе жесткостью  $k$ , движению массы создается сопротивление демпфером с коэффициентом демпфирования  $c$ . Реакция системы на внешнее воздействие в виде перемещения точки подвеса пружины у описывается уравнением

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -y.$$

Если внешнее воздействие изменяется по гармоническому закону  $y = y_0 \sin \omega t$ , перемещение подвижной массы определяется уравнением вынужденных колебаний:

$$x = y_0 \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \sin(\omega t - \varphi),$$

где  $\beta = \omega/\omega_0$ ,  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  – собственная частота системы;

$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}$  – относительный коэффициент демпфирования;

$\varphi = \arctg \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2}$  – фазовый сдвиг.

При  $\beta \gg 1$ , а  $\xi \ll 1$

$$x \approx y_0 \sin \omega t,$$

то есть смещение массы пропорционально амплитуде виброперемещения, в случае измерения индукционным датчиком выходной сигнал будет пропорционален виброскорости.

При малых значениях  $\beta$

$$x = y_0 \omega^2 \frac{1}{\omega_0^2} \sin(\omega t - \varphi),$$

то есть смещение массы будет пропорционально виброускорению. Система с такими параметрами, собственно, и называется акселерометром.

## 2.12. Классификация датчиков по виду измеряемой величины

На основе рассмотренных преобразователей могут быть созданы датчики различных величин. Их примеры приведены в табл. 1.

Таблица 1.

## Виды датчиков

| Измеряемая величина           | Датчик   |
|-------------------------------|--|
| Температура                   | Терморезисторы, термопары, полупроводниковые датчики с цифровым выходом          |
| Уровень вещества              | Поплавковые, емкостные   |
| Скорость (линейная и угловая) | Тахогенераторы, индукционные датчики   |
| Параметры вибраций            | Акселерометры  |
| Давление                      | Мембранные датчики с преобразователями деформации в электрический сигнал         |
| Расход                        | Турбинные с индукционными датчиками, расходомеры переменного перепада, ротаметры |
| Параметры излучения           | Фоторезисторы, фотоэлементы, ПЗС   |
| Параметры ориентации          | Гироскопы, в том числе твердотельные   |
| Акустические сигналы          | Микрофоны  |
| Перемещения и расстояния      | Ультразвуковые, оптические   |

### 3. УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ СИГНАЛОВ В АВТОМАТИКЕ

Устройства сравнения сигналов в автоматике (чаще всего называются элементами сравнения ЭС или измерителями рассогласования ИР) предназначены для сравнения значений управляемой величины  $\alpha$  с заданным значением  $\beta$  и определения отклонения (сигнала рассогласования) между ними:  $\delta = \beta - \alpha$ . В элементе сравнения сравниваются сигналы одинаковой физической природы.

В структурных схемах устройства для измерения рассогласования сигналов изображаются так, как приведено на рис. 10 ( $K_\delta$  – коэффициент преобразования (чувствительность) измерительного устройства).

Основными характеристиками и параметрами элементов сравнения являются статическая характеристика, представляющая собой зависимость выходного сигнала от ошибки рассогласования, коэффициент преобразования (чувствительность)  $K_\delta = U_\delta/\delta$ , погрешность измерительного устройства, мощность выходного сигнала.

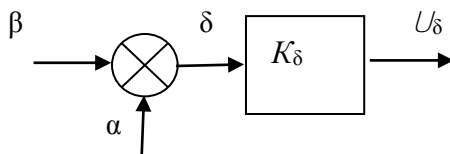


Рис. 10. Условное обозначение элемента сравнения в структурной схеме

К элементам сравнения предъявляют следующие основные требования:

высокая точность измерения и преобразования ошибки рассогласования сигналов; линейность и большая крутизна статической характеристики; малая мощность потребления электрической энергии; безынерционность; надежность, минимальные размеры и масса.

Особо высокие требования предъявляются к чувствительности и точности измерения, поскольку точность автоматической системы не может быть выше точности устройства, измеряющего и преобразующего ошибку рассогласования.

В качестве элементов сравнения в автоматике используют измерители рассогласования с использованием мостов переменного и постоянного токов для активных сопротивлений  $R$ , индуктивностей  $L$ , емкостей  $C$ , механические дифференциалы, измерители рассогласования на потенциометрах, измерители рассогласования на сельсинах и вращающихся трансформаторах и др.

Устройства для измерения активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей достаточно часто применяются в системах автоматического регулирования. Это определяется тем, что во многих случаях требуется управлять величиной данных параметров, а также и тем, что многие параметры неэлектрических процессов и систем однозначно связаны с одним из параметров электрических процессов и управление величиной неэлектрического параметра производится в соответствии с величиной используемого параметра электрической цепи. Например, изменение температуры создает изменение активного сопротивления, и регулирование температуры какого-либо процесса может производиться по величине сопротивления. Устройства для измерения параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$  обычно создаются на основе использования электрических мостовых или дифференциальных схем.

### 3.1. Устройства сравнения с использованием механического дифференциала

В следящих системах с механической обратной связью в качестве элемента сравнения находят применение механические дифференциалы (МД). По конструкции МД можно подразделить на конические шестерчатые и винтовые.

Типовая конструкция конического МД (рис. 11, а) состоит из двух независимых приводных конических зубчатых колес 1 и 4, связанных соответственно с задающей и исполнительной осями следящей системы, и двух сателлитов 2, 3, жестко соединенных крестовиной, ось 5 которой свободно проходит через втулку колеса 4 и является выходной осью устройства. Если направления вращения колес 1 и 4 противоположны, а скорости их одинаковы, то сателлиты и связанная с ними ось 5 будут неподвижны. Но если одному колесу отстать или опередить другое, на выходной оси выделяется разность, углов поворота, т.е. ошибка рассогласования  $\delta = \beta - \alpha$ .

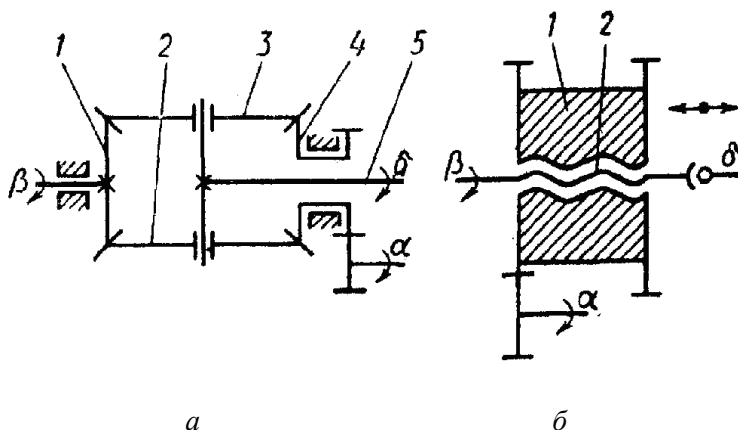


Рис. 11. Механический дифференциал, как элемент сравнения

Винтовой МД (рис. 11, б) состоит из гайки 1 и винта 2, перемещающегося при вращении относительно закрепленной в горизонтальном направлении гайки и являющегося выходным звеном диф-



ференциала. Винт и гайка жестко связаны с задающей и исполнительной осями следящей системы и передают их движения. При одинаковых угловых скоростях указанных осей перемещение винта отсутствует и ошибка рассогласования равна нулю. При преобладании скорости одной из осей винт будет перемещаться вправо или влево, выявляя знак и значение ошибки рассогласования.

Конструкция МД должна полностью исключать возможность непосредственной передачи энергии и реактивных крутящих моментов со стороны выходного звена на вход элемента сравнения. Достоинствами МД являются высокая надежность и наличие двух видов движения выходного элемента (вращательного и поступательного). Однако МД свойственны все недостатки механических редукторов: трение в местах зацепления колес, низкая износоустойчивость и ограниченный ресурс работы, низкая точность, обусловленная зазорами и технологическими погрешностями изготовления зубчатых колес и несовершенством сборки (несовпадение осей вращения с геометрическими осями, отклонение от перпендикулярности). Кроме того, с помощью МД нельзя осуществить дистанционную передачу, так как для его работы требуется непосредственная близость задающей и исполнительной осей системы. Поэтому МД находят применение в основном в гидравлических следящих системах для создания внутренних обратных связей, например в гидроприводе с объемным управлением или электрогидравлическом усилителе. Механические дифференциалы могут использоваться как усилители мощности при ручном задании координаты перемещения объектов большой массы с целью уменьшения усилия прикладываемого рукой к задающему элементу. В остальных случаях применения МД дополнительно требуется устройство для преобразования механического сигнала в электрический.

### **3.2. Измерители рассогласования с использованием потенциометрических элементов**

Потенциометрические схемы предназначены для измерения линейного и углового рассогласования с преобразованием на постоянном или переменном токе. С этой целью используют потенциометры однооборотные с ограниченным (в пределах  $350^\circ$ ) и неограниченным углами поворота, а также многооборотные.

При местном управлении для формирования сигнала рассогласования применяют один потенциометр, корпус которого механически соединяют с исполнительным валом, а движок – с задающим устройством. Схема подключения потенциометра постоянного тока изображена на рис. 12, а. Для использования потенциометра на переменном токе можно применить трансформатор со средней точкой (рис.12, б).

Для дистанционного управления используют два потенциометра, кинематически связанных с задающей и исполнительной осями следящей системы, которые электрически могут быть включены по мостовой (рис. 13, а) или трехпроводной (рис. 13, б) измерительным схемам сравнения. При согласованном положении задающей и исполнительной осей ( $\beta = \alpha$ ) мост, образованный передающим  $BC$  и принимающим  $BE$  потенциометрами, уравновешен, и выходное напряжение  $U_{\delta}$ , снимаемое с измерительной диагонали моста (со щеток), равно нулю. При перемещении щетки потенциометра  $BC$  на угол  $\beta$ , а щетки потенциометра  $BE$  на угол  $\alpha = \beta + \delta$ , где  $\delta$  – ошибка рассогласования, мост выходит из равновесия, и на выходе схемы появляется сигнал, пропорциональный ошибке рассогласования.

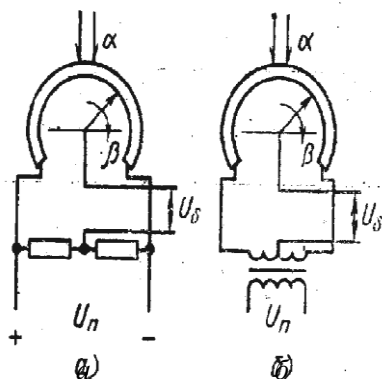


Рис. 12. Устройства сравнения на потенциометрических преобразователях для постоянного (а) и переменного (б) токов

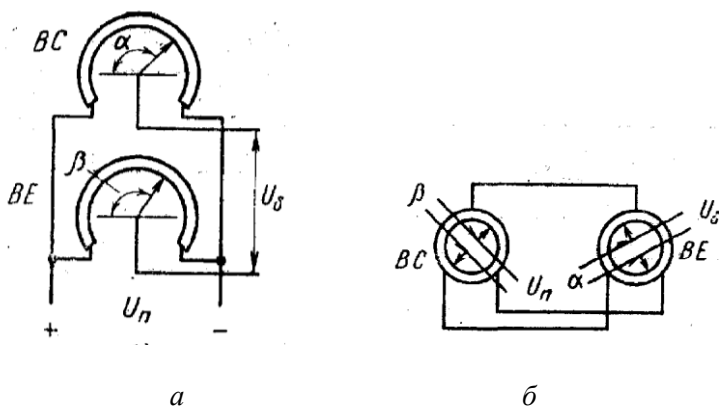


Рис. 13. Схемы включения устройств сравнения для дистанционного управления

На рис. 13, б приведена трехпроводная измерительная схема на потенциометрах с питанием через подвижные контакты потенциометра-датчика, связанные с задающей осью следящей системы. Благодаря равномерности намотки потенциометра диаграмма распределения потенциалов по секциям потенциометра *BC* симметрична (рис. 14, а), а положение максимума потенциала соответствует плюсу источника питания, если за точку с потенциалом, равным нулю, принят минус источника питания.

Трехпроводная схема обеспечивает аналогичное распределение потенциалов и на потенциометре *BE*. Очевидно, что снимаемое со щеток *BE* напряжение  $U_\delta$  будет равно нулю только в том случае, если щетки потенциометра находятся в равнопотенциальных точках.

Погрешности потенциометрических устройств сравнения зависят от многих причин и носят статический и динамический характер. Статическая погрешность складывается из методической и инструментальной составляющих.

**Методическая погрешность** появляется при условии, что сопротивление нагрузки  $R_n$  соизмеримо с сопротивлением потенциометров и оказывает шунтирующее действие. Для схемы, представленной на рис. 13, а, выходное напряжение в этом случае определяется соотношением

$$U_{\delta} = \frac{U_{\text{п}}/\beta_m}{2\beta/\beta_m \cdot \xi(1 - \beta/\beta_m) + 1} \delta,$$

где  $\beta$  – угловое положение щетки потенциометра  $BC$ ;  $\xi = R_{\text{н}}/R_m$  – коэффициент нагрузки;  $R_m$  – максимальное сопротивление потенциометров.

Статическая характеристика носит нелинейный характер. Погрешность от несогласованности сопротивлений потенциометра и нагрузки  $\Delta U$  растет с уменьшением  $\xi$ .

Методическую погрешность можно уменьшить включением на выходе сравнивающего элемента с высоким входным сопротивлением (усилитель, эмиттерный повторитель).

Статическая инструментальная погрешность обусловлена производственными допусками и конструктивными факторами: зазорами, неравномерностью намотки, ступенчатостью характеристики, зоной нечувствительности.

**По инструментальной погрешности** назначаются классы точности потенциометров. Для получения необходимых характеристик рекомендуется в качестве датчика и приемника выбирать потенциометры одного класса точности.

**Динамическая погрешность** проявляется в виде шумов, возникающих за счет мгновенного нарушения контакта при переходе движка с витка на виток и при больших скоростях отработки управляющего воздействия.

### 3.3. Измерители рассогласования на сельсинах и вращающихся трансформаторах

В качестве измерителей рассогласования переменного тока широкое применение получили устройства трансформаторной синхронной передачи на электрических индукционных микромашинах типа сельсинов и вращающихся трансформаторов (ВТ). Измеритель рассогласования на сельсинах (рис. 14, а) состоит из двух сельсинов: сельсина-датчика  $BC$  и сельсина-приемника  $BE$ . К источнику питания переменного тока подключена только обмотка возбуждения сельсина-датчика. Сельсин-приемник возбуждается переменным магнитным потоком  $\Phi_{\text{в}}$ , создаваемым фазными напряжениями сель-

сина-датчика, передаваемыми сельсином-приемником по трехпроводной цепи синхронизации. Однофазная обмотка сельсина-приемника служит для выработки сигнала рассогласования.

В момент согласования, характеризуемого взаимно перпендикулярным расположением осей однофазных обмоток сельсинов, суммарный магнитный поток приемника перпендикулярен оси выходной обмотки сельсина-приемника, и напряжение рассогласования  $U_{\delta} = 0$ . При наличии рассогласования механический поворот ротора сельсина-датчика преобразуется в поворот магнитного потока сельсина-приемника.

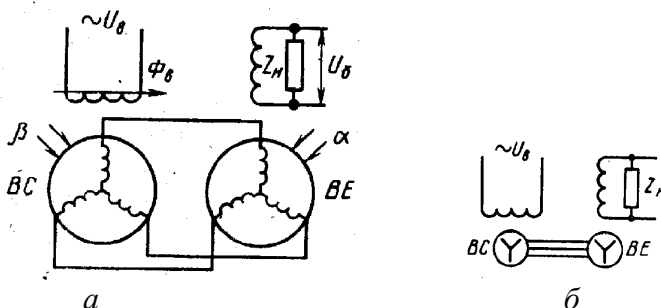


Рис. 14. Схема включения сельсинов в качестве измерителей рассогласования (а) и условно-графическое изображение схемы (б)

Этот поток пронизывает однофазную управляющую обмотку. С этой обмотки снимается напряжение, характеризующее отклонение сельсинов от положения согласования

$$U_{\delta} = U_m \sin \delta,$$

где  $U_m$  – максимальное напряжение синхронизации.

Применение ВТ в качестве формирователей сигнала ошибки обусловлено повышением требований к точности систем, так как схемы на ВТ обеспечивают более точное преобразование угла рассогласования. Чаще всего измерение осуществляется с помощью двух ВТ (BC и BE), включенных по трансформаторной схеме (рис. 15, а) и работающих аналогично схеме на сельсинах. Устройство на ВТ вырабатывает напряжение рассогласования

$$U_{\delta} = U_{\text{п}} k_{\text{T}} \sin \delta,$$

где  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания;  $k_{\text{T}}$  – коэффициент трансформации между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой.

Разновидностью включения ВТ является схема сравнения (компенсационная схема), представленная на рис. 15, б.

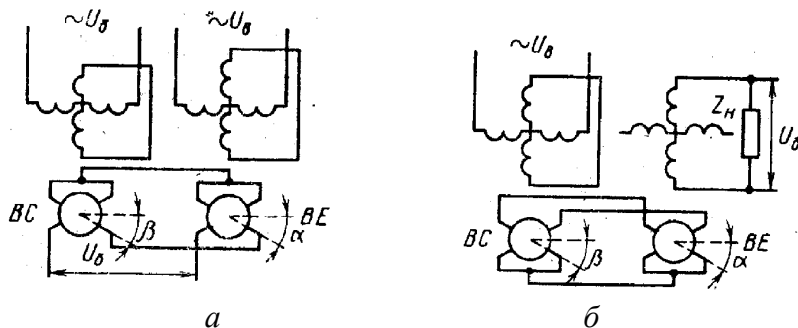


Рис. 15. Схемы включения вращающихся трансформаторов в качестве измерителей рассогласования: а – трансформаторная схема включения; б – компенсационная схема сравнения

Напряжение питания в данной схеме подается на оба датчика, а выходной сигнал формируется как разность напряжений, вырабатываемых синусными обмотками датчика  $BC$  и приемника  $BE$ . При согласованном положении  $\beta = \alpha$  оба напряжения  $U_1 = U_{\text{п}} k_{\text{T}} \sin \alpha$  и  $U_2 = U_{\text{п}} k_{\text{T}} \sin \beta$  компенсируются за счет встречного включения обмоток синхронизации, и напряжение на выходе равно нулю. При рассогласовании эффект компенсации нарушается, и с выхода ИР снимается переменное напряжение  $U_{\delta}$ , амплитуда и фаза которого определяются величиной и знаком ошибки рассогласования.

Выпускаются сельсины и ВТ в контактном и бесконтактном исполнении, корпусные и бескорпусные с различными напряжениями возбуждения и частотой. Повышение частоты питания позволяет уменьшить размеры датчиков.

Выходное напряжение измерителей рассогласования на сельсинах и ВТ является непрерывной функцией угла рассогласования  $\delta$  и содержит информацию, необходимую для управления следящей системой. Статическая характеристика индукционного измерителя

рассогласования носит нелинейный характер. Измерители рассогласования использующие индукционные микромашины, обладают свойством самосинхронизации в пределах  $\delta = \pm 180^\circ$ , однако наличие в системе таких больших рассогласований практически исключается самим режимом следящих систем. Любая следящая система уже при малых рассогласованиях стремится уничтожить возникшую ошибку. Поэтому при рассмотрении нормального режима работы следящей системы можно ограничиться рабочей зоной индукционных преобразователей  $\delta = \pm 10^\circ$ , в пределах которой характеристика линейна и обладает наибольшей крутизной и при этом допустима замена  $\sin \delta = \delta$ .

Заменяя  $\sin \delta = \delta$ , получаем

$$U_\delta = k_\delta \delta,$$

где  $k_\delta$  – коэффициент преобразования, определяемый как приращение выходного напряжения при изменении угла рассогласования на  $1^\circ$ :

$$k_\delta = \left. \frac{dU_\delta}{d\delta} \right|_{\delta \rightarrow 0}.$$

Для сельсинов  $k_\delta = U_m$  В/рад; для ВТ  $k_\delta = U_m k_O$  В/рад.

Обычно чувствительность сельсинов находится в пределах 50–70 В/рад, а иногда может достигать 100 В/рад.

Погрешности трансформаторных схем измерения рассогласований, характеризуемые остаточным напряжением на выходной обмотке при  $\delta = 0^\circ$ , так же, как и погрешности потенциометрических схем, носят статический или динамический характер.

Выпускаемые промышленностью ВТ обеспечивают большую инструментальную точность по сравнению с сельсинами благодаря особой технологий изготовления пластин магнитопровода.

Для повышения точности работы индукционных измерителей рассогласования в автоматике используют двухканальную систему, используя две пары сельсинов. Одна пара сельсинов связана с задающим и исполнительным валами следящей системы непосредственно, а другая пара – через редуктор. Редуктор позволяет уменьшить влияние неточности изготовления сельсинов. Переда-

точное отношение редуктора выбирают таким образом, чтобы сельсины второй пары вращались быстрее, образуя канал точного отсчета.

### 3.4. Выбор устройства измерения рассогласования. Пример расчета

При выборе измерителей рассогласования (ИР) необходимо учитывать следующие факторы: 1) физическую природу регулируемой величины; 2) диапазон работы и характер изменения задающего и выходного сигналов (поступательное или угловое); 3) требуемые точность преобразования, чувствительность, зону нечувствительности; 4) быстродействие; 5) влияние на работу ИР внешних эксплуатационных условий: температуры, давления, влажности, вибраций; 6) допустимые размеры, массу, срок службы, надежность.

Очевидно, что при выборе конкретных ИР могут быть учтены только некоторые из перечисленных факторов, так как отдельные из них противоречивы. Так, при удовлетворении требования повышенной надежности пренебрегают технологическими и экономическими факторами, предпочитая более сложный по технологии изготовления бесконтактный сельсин контактному. И так как точностные параметры у бесконтактных элементов ниже, то точность преобразования сигнала при этом также уменьшается. Следуя общей тенденции микроминиатюризации аппаратуры, повышают требования к размерам датчиков. Однако с уменьшением размеров элементов точность индукционных микромашин также понижается.

Из всей совокупности факторов и требований при выборе ИР необходимо выделить главные применительно к конкретной следящей системе. Однако нужно отметить, что основным критерием выбора ИР является точность, определяемая инструментальной погрешностью изготовления элементов. Эта погрешность не поддается компенсации и непосредственно входит в статическую ошибку всей системы. При проектировании принимают, что на долю ИР приходится 30–60 % результирующей статической ошибки системы, т. е.

$$\delta_{\text{ИР}_{\text{доп}}} = (0,3 - 0,5)\delta_{\text{ст}}$$



Если одноканальные схемы на потенциометрах, имеющих собственную инструментальную погрешность  $\pm(0,25-1)^\circ$ , не удовлетворяют заданной точности, применяют трансформаторные дистанционные передачи на сельсинах и ВТ. Предпочтение при этом отдается прецизионным ВТ, позволяющим снизить погрешность передачи угла до  $\pm(2-10)'$  по сравнению с погрешностью  $\pm(20-30)'$ , характерной для сельсинов. Уменьшения погрешности до  $\pm(2-6)'$  можно добиться применением двухканальных систем передачи угла на сельсинах и ВТ с механическим редуктором, создавая канал грубого (ГО) и канал точного (ТО), отсчета для которых можно записать

$$\delta_{\text{ИР}_{\text{доп}}} = i_p (0,3-0,5)\delta_{\text{ст}},$$

где  $i_p$  – коэффициент передачи редуктора.

Так как дальнейшее увеличение точности ограничено ростом погрешностей механической передачи, то при проектировании следящей системы для повышенной точности следует применять многополюсные ВТ. Электрическая редукция, при которой исключаются погрешности зубчатой передачи и моменты трения, обеспечивает точность до 1".

После предварительного определения типа ИР (индукционного, потенциометрического) переходят к окончательному выбору датчика и приемника из числа рекомендуемых для применения, основные технические данные рекомендуемых сельсинов и ВТ приведены в литературе [4, 5]. Поскольку погрешность ИР складывается из погрешностей датчика и приемника, то для повышения точности передачи угла рассогласования оба элемента выбирают одного класса точности, так чтобы инструментальная погрешность была меньше или равна допустимой погрешности:

$$\delta_{\text{ИР}} \leq \delta_{\text{ИР}_{\text{доп}}}$$

Пары для сельсинов и ВТ подбирают с учетом напряжения питания, частоты, коэффициент трансформации; максимальное напряжение синхронизации.

Для двухканальной системы передачи угла на сельсинах и ВТ передаточное отношение редуктора  $i_p$  определяют по формуле

$$i_p = \delta_{\text{аі}} / \delta_{\text{ЕД}_{\text{аіі}}}$$

где  $\delta_{\text{аі}} = \delta_{\text{ЕД}}$  – погрешность в канале грубого отсчета, определяемая классом точности сельсинов и ВТ.

Параметрами сопряжения для потенциометрических устройств сравнения являются напряжение питания  $U_n$ , крутизна статической характеристики, зависящая от диапазона изменения рабочего угла. Если диапазоны работы потенциометров неодинаковы, то идентичности характеристик добиваются введением в цепь потенциометров добавочных резисторов.

При выборе потенциометров особое внимание уделяют подбору сопротивления реостатов потенциометров для согласования с сопротивлением нагрузки и уменьшения методической погрешности. Для облегчения согласования потенциометры каждой серии выпускают с разными номиналами сопротивлений. Номинал сопротивления выбирают по погрешности от нелинейности характеристики, определяемой классом точности потенциометра.

**Пример.** Подобрать пару сельсинов для системы, статическая погрешность которой не должна превышать 25'. Рассчитать точность передачи угла и чувствительность схемы.

1. Полагая, что  $\delta_{\text{ЕД}_{\text{аіі}}}$  составляет 30 % от заданной погрешности привода, находим  $\delta_{\text{ЕД}_{\text{аіі}}} = 25 \cdot 0,3 = 7,5'$ .

2. Выбираем пару сельсинов (по табл. в [4]) типа НД-404П и БС-155А 4-го класса точности, погрешность следования которых составляет 40',  $U_m = 100$  В,  $f = 400$  Гц.

3. Так как погрешность сельсинов превышает допустимую, применяем двухканальную систему с механическим редуктором. Передаточное отношение редуктора

$$i_0 \geq \delta_{a\bar{i}} / \delta_{ED_{a\bar{i}}} = 40 / 7,5 = 5,3.$$

Выбираем  $i_p = 10$ .

4. Определяем точность преобразования угла, полагая  $\delta_p(i_p) = 2'$ ,  $\delta_\zeta = 0,5'$ :

$$\delta_{го} = \frac{\delta_{го}}{i_p} + \delta_p(i_p) + \delta_\zeta = \frac{40}{10} + 2 + 0,5 = 6,5'.$$

Передаточное отношение редуктора рассчитано правильно, так как погрешность преобразования угла не превышает допустимую погрешность, равную  $7,5'$ .

5. Определяем коэффициент преобразования (чувствительность) для канала грубого отсчета:

$$k_{\delta_{го}} = 100 \text{ В/рад, или } k_{\delta_{го}} = 1,74 \text{ В на } 1^\circ.$$

6. Чувствительность по каналу точного отсчета (ТО) с учетом редуктора

$$K_{\delta_{то}} = K_{\delta_{го}} / i_p = 1000 \text{ В/рад, или, } K_{\delta_{то}} = 17,4 \text{ В на } 1^\circ.$$

#### 4. УСИЛИТЕЛИ

*Усилитель* – это устройство, с помощью которого осуществляется усиление мощности входного (управляющего) сигнала за счет дополнительной энергии источника питания. Усилительные устройства САР в зависимости от вида энергии, получаемой от дополнительного источника, бывают электрические, пневматические, гидравлические, струйные и др. Наибольшее применение в схемах автоматики нашли электронные усилители, к которым относят ламповые, полупроводниковые, магнитные. Усилители могут функционировать либо в качестве самостоятельного узла, либо в составе регуляторов и исполнительных механизмов.

Основные характеристики и параметры усилителей, входящих в состав автоматических систем, следующие:

наличие требуемого коэффициента усиления по мощности;

необходимое быстродействие (т. е. постоянная времени усилителя должна быть малой по сравнению с другими элементами САУ);

линейность статической характеристики;

требуемое значение порога чувствительности.

Один из основных параметров усилителя – коэффициент усиления по мощности

$$k_p = \frac{\Delta P_{\text{ВЫХ}}}{\Delta P_{\text{ВХ}}},$$

где  $\Delta P_{\text{ВХ}}$  и  $\Delta P_{\text{ВЫХ}}$  – приращение мощности на входе и выходе усилителя.

Для некоторых видов электрических усилителей практическое значение имеют коэффициент усиления по напряжению (усилители по напряжению)

$$k_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$$

и коэффициент усиления по току (усилитель по току)

$$k_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}},$$

где  $\Delta U$  и  $\Delta I$  – соответственно приращения напряжения и тока на входе и выходе усилителя. При этом каждый из усилителей является усилителем по мощности, т. е. у них  $P_{\text{ВЫХ}} > P_{\text{ВХ}}$ . В автоматике используются также усилители с существенно нелинейными характеристиками - релейные усилители, которые могут иметь зону нечувствительности, гистерезис. В качестве усилительного элемента в электронных усилителях используют полупроводниковые приборы, электронные лампы, ионные приборы. Электронные лампы и ионные приборы сейчас практически не применяют. Полупроводнико-

вые усилители обеспечивают высокий КПД при низких напряжениях питания и больших токах, имеют малые габариты, высокую механическую прочность и мгновенную готовность к работе.

К недостаткам транзисторов следует отнести зависимость их параметров от температуры. Из полупроводниковых усилителей наиболее широко применяют транзисторные и тиристорные. В схемах автоматики используют транзисторные усилители переменного и постоянного тока (напряжения), импульсные усилители.

В связи с усложнением задач управления и регулирования появился новый класс усилителей, которые не только усиливают входной сигнал, но и осуществляют ряд функциональных преобразований с сигналами управления. Такие усилители называют операционными.

*Усилители переменного* тока на транзисторах применяют широко. Они, например, используются для управления двухфазными исполнительными двигателями переменного тока. С целью максимального усиления по мощности оконечные каскады усиления обычно выполняют по схеме с общим эмиттером.

*Фазочувствительные усилители* предназначены для усиления по мощности и одновременного преобразования переменного напряжения в постоянное (пульсирующее) напряжение. При этом величина и полярность напряжения зависит от угла сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением входного сигнала и напряжением питания. По существу схема фазочувствительного усилителя представляет собой управляющий усилитель (выпрямитель) или усилитель среднего значения тока. Основным условием работы фазочувствительного усилителя является равенство частот входного сигнала и напряжения питания.

*Усилители постоянного тока* часто используют в схемах автоматического регулирования при работе с измерительными приборами, на выходе которых формируется сигнал постоянного тока малого уровня, например с термоэлектрическими датчиками.

Операционные усилители (ОУ) – усилители постоянного тока, выполненные на основе интегральной технологии, называют операционными. Они обладают высокой чувствительностью, малым дрейфом напряжения от температуры, высоким быстродействием. С помощью ОУ можно не только усиливать сигналы управления, но и реализовать различные функциональные и вычисли-

тельные устройства – суммировать, умножать, дифференцировать, интегрировать. Операционные усилители имеют большой коэффициент усиления (порядка 1000–100 000 и более), очень большое входное сопротивление (до 1000 МОм). Выходное сопротивление мало (порядка 1000 Ом и меньше). Усилитель имеет дифференциальный вход и усиливает разность напряжений, приложенных к обоим входам.

*Тиристорные усилители* выполняются на базе тиристора, который выполняет функции управляющего (усилительного) элемента. Тиристор может находиться только в двух устойчивых состояниях: включенном и выключенном. Включается он практически мгновенно ( $t_{\text{вкл}} = 1\text{--}5$  мкс) по цепи управляющего электрода напряжением  $U_y$ , а выключается по анодной цепи снятием анодного напряжения  $U_a$ . Время отключения тиристора 5–50 мкс.

Тиристорные усилители – преобразователи постоянного тока. Они обеспечивают изменение выходного напряжения за счет задержки момента отпирания тиристора. Изменяя угол отпирания (включения) тиристора  $\alpha$ , можно изменять среднее значение тока нагрузки  $I_{\text{н ср}}$ . Для регулирования среднего значения выходного напряжения применяют, однофазные и многофазные схемы включения тиристоров.

По динамическим свойствам тиристорные усилители можно отнести к апериодическим звеньям первого порядка.

## 5. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

### 5.1. Электропривод

#### 5.1.1. Двигатели постоянного тока

*Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с якорным управлением [3].* Скоростью вращения двигателя управляют путем изменения напряжения на якоре. Схема управления показана на рис. 16.

Уравнения, описывающие процессы в схеме управления, выглядят следующим образом:

$$U = E + ir + L \frac{di}{dt};$$

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

$$E = c\Phi\omega;$$

$$M = c\Phi i,$$

где  $U$  – напряжение в цепи питания якоря;  $L, r$  – индуктивность и сопротивление якорной цепи;  $i$  – ток якоря;  $c$  – постоянный коэффициент;  $M$  – момент, развиваемый двигателем;  $M_c$  – момент сопротивления на валу двигателя;  $J$  – суммарный момент инерции;  $\omega$  – скорость вращения якоря;  $\Phi$  – магнитный поток в двигателе;  $E$  – величина противоэлектродвижущей силы.

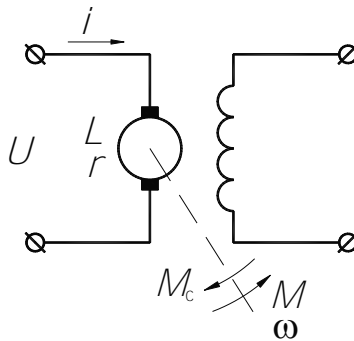


Рис. 16. Схема якорного управления двигателем постоянного тока

Эти уравнения можно переписать в виде:

$$U = c\Phi\omega + ir + L \frac{di}{dt};$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = c\Phi i - M_c.$$

Из второго уравнения определим:

$$i = \frac{J}{c\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_c}{c\Phi} = \frac{J}{c\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt} + i_c,$$

где  $i_c$  – ток якоря, соответствующий моменту сопротивления  $M_c$ .

Если момент  $M_c = \text{const}$ :

$$\frac{di}{dt} = \frac{J}{c\Phi} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}.$$

Подставив полученные выражения в первое уравнение, получим:

$$U = c\Phi\omega + \frac{Jr}{c\Phi} \cdot \frac{d\omega}{dt} + i_c r + \frac{JL}{c\Phi} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}.$$

Разделив левую и правую части на  $c\Phi$ , можно записать:

$$\frac{JL}{(c\Phi)^2} \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{Jr}{(c\Phi)^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{i_c r}{c\Phi}.$$

Обозначим  $\frac{Jr}{(c\Phi)^2} = T_M$  – электромеханическая постоянная времени

и  $\frac{L}{r} = T_\Omega$  – электромагнитная постоянная времени:

$$T_\Omega T_M \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + T_M \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{i_c r}{c\Phi}.$$

Здесь  $\frac{U}{c\Phi} = \omega_0$  – скорость холостого хода. Переходя к малым

отклонениям от  $\omega_0$ , можно записать два варианта уравнения:



$$T_{\Theta} T_M \cdot \frac{d^2 \Delta \omega}{dt^2} + T_M \cdot \frac{d \Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = \frac{\Delta U}{\alpha \Phi};$$

$$T_{\Theta} T_M \cdot \frac{d^2 \Delta \omega}{dt^2} + T_M \cdot \frac{d \Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = \frac{\Delta M_c}{\beta},$$

где  $\beta = \frac{(\alpha \Phi)^2}{r}$  – жесткость (тангенс угла наклона) нагрузочной характеристики двигателя  $M = f(\omega)$ .

Первый вариант уравнения описывает случай, когда входной величиной является изменение напряжения на якоре, второй – когда входной величиной является изменение момента сопротивления. Передаточные функции двигателя:

$$W_U(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{1/(\alpha \Phi)}{T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1} = \frac{k_U}{T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{1/\beta}{T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1} = -\frac{k_M}{T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1}.$$

Здесь  $k_U$  и  $k_M$  – коэффициенты передачи двигателя. При ненулевом номинальном моменте сопротивления

$$k_U = \frac{1}{\alpha \Phi} - \frac{1}{\alpha \Phi} \left( \frac{M_{c0} r}{\alpha \Phi U_{ном}} \right),$$

где  $U_{ном}$  – номинальное напряжение на якоре двигателя.

В соответствии с полученными передаточными функциями двигатель является аperiodическим звеном второго порядка.

В случае использования двигателя в приводах перемещения выходной величиной считается угол поворота вала, представляющий

собой интеграл скорости вращения. Передаточные функции с учетом интегрирования:

$$W_U(p) = \frac{\alpha(p)}{U(p)} = \frac{1/(c\Phi)}{p(T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1)} = \frac{k_U}{p(T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\alpha(p)}{M_c(p)} = -\frac{1/\beta}{p(T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1)} = -\frac{k_M}{p(T_{\Theta} T_M p^2 + T_M p + 1)}$$

Параметры, входящие в формулы для коэффициентов передачи и постоянных времени отсутствуют в паспортных данных двигателей, поэтому для их расчета используют следующие формулы:

$$c\Phi = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} r}{\omega_{\text{НОМ}}},$$

где  $I_{\text{НОМ}}$  и  $\omega_{\text{НОМ}}$  – соответственно номинальные ток и скорость вращения якоря электродвигателя.

Если в паспортных данных отсутствует значение сопротивления якорной цепи, его можно найти из соотношения:

$$I_{\text{НОМ}}^2 r = (0,5 \dots 0,8)(1 - \eta) U_{\text{НОМ}} I_{\text{НОМ}},$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия якорной цепи, определяемый по формуле

$$\eta = -0,05 + 0,3 \lg P_{\text{НОМ}},$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность электродвигателя.

Момент инерции якоря, необходимый для расчета электромеханической постоянной времени, обычно приводится в справочниках. Иногда к нему прибавляют моменты инерции редуктора и нагрузки, приведенные к валу двигателя, а редуктор и нагрузку при этом считают безынерционными звеньями.

Для расчета индуктивности якорной обмотки можно воспользоваться формулой Уманского:

$$L = \beta_L \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{1}{\rho \omega_{\text{НОМ}}},$$

где  $\beta_L$  – опытный коэффициент, для маломощных двигателей  $\beta_L = 0,15$ , для компенсированных  $\beta_L = 0,5$ , для некомпенсированных  $\beta_L = 0,6$ ;  $\rho$  – число пар полюсов.

*Пример расчета.* Рассчитаем динамические характеристики привода на основе двигателя ПС 31М с характеристиками:  $P_{\text{НОМ}} = 180$  Вт;  $U_{\text{НОМ}} = 110$  В;  $I_{\text{НОМ}} = 8,2$  А;  $n_{\text{НОМ}} = 2200$  об/мин ( $\omega_{\text{НОМ}} = 230$  рад/с);  $J = 0,011$  кг·м<sup>2</sup>;  $p = 2$ ;  $M_c = 50$  Н·мм.

$$\eta = -0,05 + 0,3 \lg P_{\text{НОМ}} = -0,05 + 0,3 \lg 180 = 0,63;$$

$$r = (0,5 \dots 0,8)(1 - \eta) \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} = 0,65 \cdot 0,37 \cdot \frac{110}{8,2} = 3,2 \text{ Ом};$$

$$c\Phi = \frac{U_{\text{НОМ}} - I_{\text{НОМ}} r}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{110 - 8,2 \cdot 3,2}{230} = 0,36 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$k_U = \frac{1}{c\Phi} - \frac{1}{c\Phi} \left( \frac{M_{c0} r}{c\Phi U_{\text{НОМ}}} \right) = \frac{1}{0,36} - \frac{1}{0,36} \left( \frac{0,05 \cdot 3,2}{0,36 \cdot 110} \right) = 10,35 \text{ (В} \cdot \text{с)}^{-1}$$

$$k_M = \frac{r}{(c\Phi)^2} = \frac{3,2}{0,36^2} = 24,7 \text{ (Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с)}^{-1};$$

$$L = \beta_L \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{1}{\rho \omega_{\text{НОМ}}} = 0,15 \cdot \frac{110}{8,2} \cdot \frac{1}{2 \cdot 230} = 0,004 \text{ Гн};$$

$$T_M = \frac{Jr}{(c\Phi)^2} = \frac{0,011 \cdot 3,2}{0,36^2} = 0,27 \text{ с};$$

$$T_\Theta = \frac{L}{r} = \frac{0,004}{3,2} = 0,00125 \text{ с}.$$

Передаточные функции:

$$W_U(p) = \frac{10,35}{(0,00034p^2 + 0,27p + 1)} = \frac{10,35}{(0,2687p + 1)(0,0012p + 1)};$$

$$W_M(p) = -\frac{24,7}{(0,00034p^2 + 0,27p + 1)} = -\frac{24,7}{(0,2687p + 1)(0,0012p + 1)}.$$

Переходная характеристика двигателя при изменении напряжения на якоре показана на рис. 17, частотные характеристики – на рис. 18, 19.

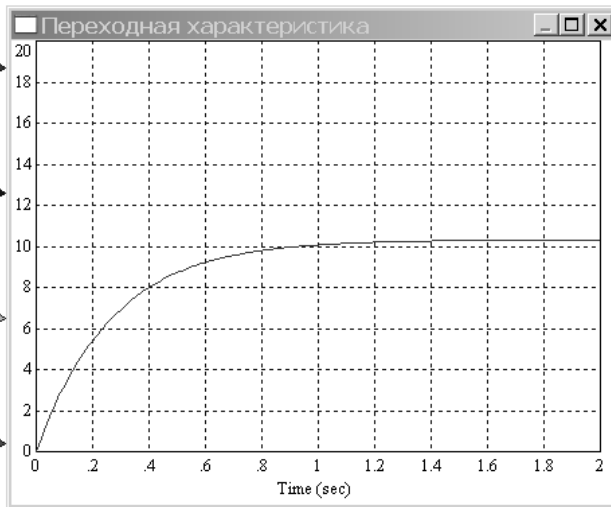


Рис. 17. Переходная характеристика электродвигателя

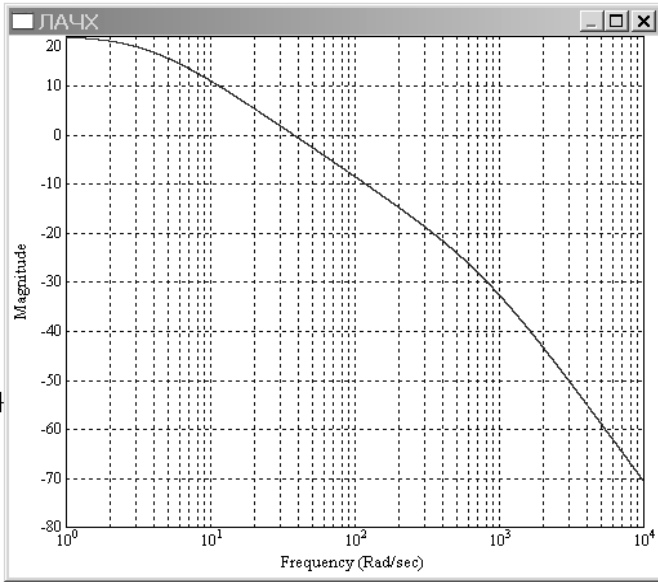


Рис. 18. ЛАЧХ электродвигателя

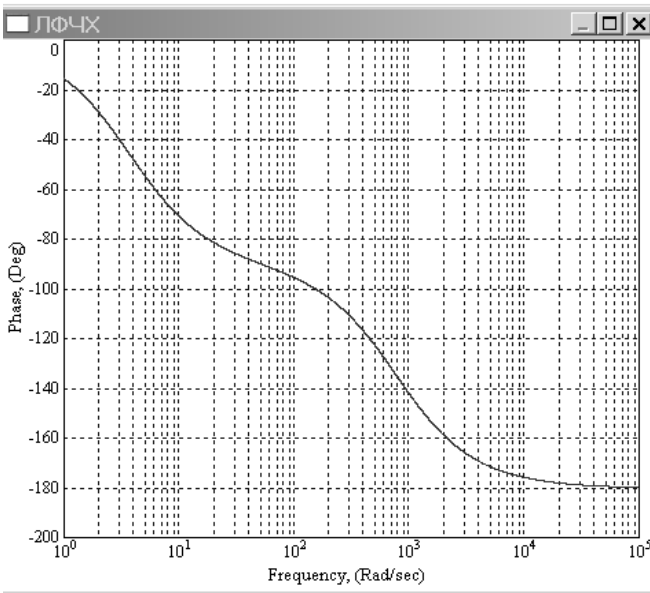


Рис. 19. ЛФЧХ электродвигателя

*Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с полюсным управлением [3].* В этом случае изменение скорости вращения достигается изменением напряжения в цепи возбуждения. Основным достоинством такого способа является малая мощность цепи управления, однако появляется зона нечувствительности, а также возрастает порядок уравнения двигателя (см. ниже).

Особенностью полюсного управления является наличие двух режимов работы, что иллюстрируется рис. 20.

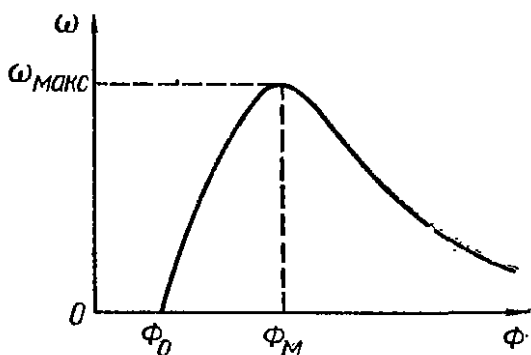


Рис. 20. Зависимость скорости вращения двигателя от потока возбуждения

Первый режим соответствует изменению магнитного потока от  $\Phi_0$  до  $\Phi_M$ , когда  $\omega = \omega_{\text{макс}}$ . В этом режиме при увеличении потока скорость изменяется от нулевой до максимальной. Режим характеризуется низкими энергетическими показателями и используется в системах малой мощности (до десятков Вт).

Второй режим соответствует изменению потока от  $\Phi_M$  до максимально возможного потока насыщения. Скорость изменяется от максимальной до некоторой конечной. Режим характеризуется высокими энергетическими показателями и используется в системах более высокой мощности.

Скорость вращения максимальна при  $\Phi_M = \gamma_M \Phi_{\text{ном}}$ , где  $\gamma_M = \frac{2 I_{\text{ном}} r}{U_{\text{ном}}}$ , при этом  $\Phi_0 = 0,5 \gamma_M \Phi_{\text{ном}}$ . Ток якоря при разных значениях  $\gamma$ :  $i = \frac{I_{\text{ном}}}{\gamma}$ , где  $I_{\text{ном}}$  – номинальный ток якоря.

Для реализации первого режима ток в обмотке якоря должен не зависеть от скорости вращения и быть постоянной величиной. Для этого в якорную цепь включают добавочное сопротивление  $R_d$  и повышают напряжение питания для компенсации падения напряжения на  $R_d$ . Схема включения показана на рис. 21. Добавочное сопротивление выбирают примерно на порядок большим сопротивлением якоря. Тогда полное сопротивление якорной цепи

$$r_1 = r + R_d = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} + R_d.$$

Напряжение питания якорной цепи  $U = I_{\text{ном}} r_1$ .

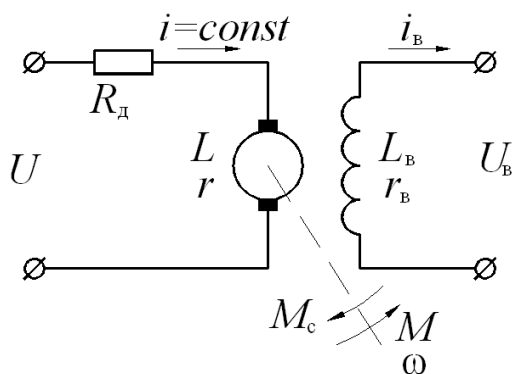


Рис. 21. Схема полюсного управления двигателем

Исходные уравнения работы

$$U = c\Phi\omega + ir;$$

$$M = c\Phi I;$$

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

$$U_B = i_B r_B + L_B \frac{di_B}{dt}.$$

Отсюда момент на валу двигателя

$$M = \frac{c\Phi}{r} U - \frac{(c\Phi)^2}{r} \omega = k i_B - \frac{(c\Phi)^2}{r} \omega, \text{ где } k = \frac{c\Phi}{i_B}.$$

Объединяя уравнения, получим

$$k i_B = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{(c\Phi)^2}{r} \omega + M_c;$$

$$k U_B = J r_B \frac{d\omega}{dt} + \frac{(c\Phi)^2}{r} r_B \omega + M_c r_B + J L_B \frac{d^2\omega}{dt^2} - L_B \frac{(c\Phi)^2}{r} \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Вводя обозначения  $T_M = \frac{Jr}{(c\Phi)^2} = \frac{J}{\beta}$  – электромеханическая постоянная времени и  $T_B = \frac{L_B}{r_B}$  – постоянная времени цепи возбуждения, получим:

$$T_B T_M \frac{d^2\omega}{dt^2} + (T_B + T_M) \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{k U_B r}{r_B (c\Phi)^2} - \frac{M_c r}{(c\Phi)^2}.$$

По аналогии с якорным управлением и переходя к отклонениям величин:



$$W_U(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{(T_B p + 1)(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{k_M}{(T_B p + 1)(T_M p + 1)}.$$

Если выходная величина – угол поворота вала:

$$W_U(p) = \frac{\alpha(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{p(T_B p + 1)(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\alpha(p)}{M_c(p)} = -\frac{k_M}{p(T_B p + 1)(T_M p + 1)}.$$

Коэффициенты передачи :

$$k_U = \frac{ir}{i_B r_B c\Phi}; \quad k_M = \frac{r}{(c\Phi)^2}.$$

Постоянные времени будут зависеть от величины магнитного потока в двигателе, то есть от скорости вращения. Номинальная величина электромеханической постоянной времени  $T_{M\text{ном}}$  будет при  $c\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} r}{\omega_{\text{ном}}}$ , при других значениях магнитного по-

тока она будет равна  $T_M = \frac{Jr}{(c\gamma\Phi_{\text{ном}})^2}$ .

Индуктивность обмотки возбуждения  $L_B$  для расчета  $T_B$  можно измерить или рассчитать по формуле

$$L_B = \frac{4\pi W_{\text{пл}}}{\omega} \cdot \frac{a}{N} \left[ \frac{dE}{di_B} + \frac{E_{\text{ном}}(\sigma_{\text{ном}} - 1)}{i_{B.\text{ном}}} \right],$$

где  $W_{\text{пл}}$  – число витков обмотки полюса;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря;  $N$  – число проводников обмотки якоря;  $\sigma_{\text{ном}} = 1,1 - 1,2$  – коэффициент рассеяния при номинальном магнитном потоке. Для расчета используют паспортную характеристику  $\omega = f(i_{\text{в}})$ , по которой для требуемого момента сопротивления строят характеристику  $\frac{E}{\omega} = f(i_{\text{в}})$ , где  $E = U_{\text{ном}} - ir$ . Здесь  $i$  – ток якоря, соответствующий выбранному току возбуждения. По полученной характеристике можно рассчитать и построить график  $L_{\text{в}} = f(i_{\text{в}})$ . Производную  $\frac{dE}{di_{\text{в}}}$  заменяют на отношение малых приращений величин.

Сопротивление обмотки возбуждения  $r_{\text{в}}$  для учета ее нагрева умножают на коэффициент  $k_{\theta} = 1 + 0,004(\theta - 20^{\circ})$ , где  $\theta$  – температура обмотки возбуждения.

Во втором режиме не требуется соблюдать постоянство тока в цепи якоря, и добавочное сопротивление не включают. В этом случае уравнение моментов

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_{\text{с}} = c\Phi i - M_{\text{с}}.$$

Предположим, что напряжение возбуждения изменилось на малую величину  $\Delta U_{\text{в}}$ . В результате ток якоря, магнитный поток и скорость вращения изменятся на  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta i$  и  $\Delta\omega$  от установившихся значений  $\Phi_{\text{y}}$ ,  $i_{\text{y}}$ ,  $\omega_{\text{y}}$ :

$$J \frac{d}{dt}(\omega_{\text{y}} + \Delta\omega) = c(\Phi_{\text{y}} + \Delta\Phi)(i_{\text{y}} + \Delta i) - M_{\text{с}}.$$

После раскрытия скобок и исключения уравнения статики получим уравнение динамики:

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = c\Phi_y \Delta i + c i_y \Delta\Phi.$$

Напряжение на якоре в соответствии с п. 5.1.1

$$U = c\Phi\omega + ir + L \frac{di}{dt}.$$

При малых отклонениях от состояния равновесия при  $\Delta U = 0$ :

$$0 = c\Phi_y \Delta\omega + c\Delta\Phi\omega_y + r\Delta i + L \frac{d\Delta i}{dt};$$

или

$$L \frac{d\Delta i}{dt} + r\Delta i = -(c\Phi_y \Delta\omega + c\Delta\Phi\omega_y).$$

Отсюда

$$\Delta i = - \frac{c\Phi_y \Delta\omega + c\Delta\Phi\omega_y}{L \frac{d}{dt} + r}.$$

Аналогично для обмотки возбуждения

$$\Delta U_B = r_B \Delta i_B + L_B \frac{d\Delta i_B}{dt}, \quad \Delta\Phi = k' \Delta i_B, \quad L_B \frac{d\Delta\Phi}{dt} + r_B \Delta i_B = k' \Delta U_B,$$

$$\Delta\Phi = \frac{k' \Delta U_B}{L_B \frac{d}{dt} + r_B},$$

где коэффициент  $k'$  получают из паспортной характеристики  $\Phi = f(i_B)$ .

После подстановки  $\Delta i$  и  $\Delta \Phi$  в уравнение динамики с учетом ранее полученных выражений для постоянных времени

$$\begin{aligned} T_3 T_B T_M \frac{d^3 \Delta \omega}{dt^3} + T_M (T_B + T_3) \frac{d^2 \Delta \omega}{dt^2} + (T_B + T_M) \frac{d \Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = \\ = T_3 \frac{c i_y k' r}{r_B (c \Phi)^2} \cdot \frac{d \Delta U_B}{dt} - \frac{k' \omega_y}{\Phi_y r_B} \left( 1 - \frac{i_y r}{c \Phi_y \omega_y} \right) \Delta U - \frac{M_c r}{(c \Phi)^2}, \end{aligned}$$

Передаточные функции

$$W_U(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta U_B(p)} = \frac{T_3 \frac{c i_y k' r}{r_B (c \Phi)^2} p - \frac{k' \omega_y}{\Phi_y r_B} \left( 1 - \frac{i_y r}{c \Phi_y \omega_y} \right)}{T_3 T_B T_M p^3 + T_M (T_B + T_3) p^2 + (T_B + T_M) p + 1};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{\frac{r}{(c \Phi)^2}}{T_3 T_B T_M p^3 + T_M (T_B + T_3) p^2 + (T_B + T_M) p + 1}.$$

На практике с учетом того, что  $L$  намного меньше  $L_B$ , а  $i_y r$  намного меньше  $c \Phi_y \omega_y$ , передаточные функции упрощают:

$$W_U(p) = \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta U_B(p)} = - \frac{k_U}{T_M T_B p^2 + (T_B + T_M) p + 1};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = - \frac{k_M}{T_M T_B p^2 + (T_B + T_M) p + 1},$$

$$\text{где } k_U = \frac{k' \omega_y}{\Phi_y r_b}; \quad k_M = \frac{r}{(c\Phi)^2}.$$

Знак «минус» в выражении для  $W_U(p)$  означает, что при увеличении напряжения на обмотке возбуждения скорость вращения двигателя уменьшается.

*Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением [3].* Схема включения показана на рис. 22.

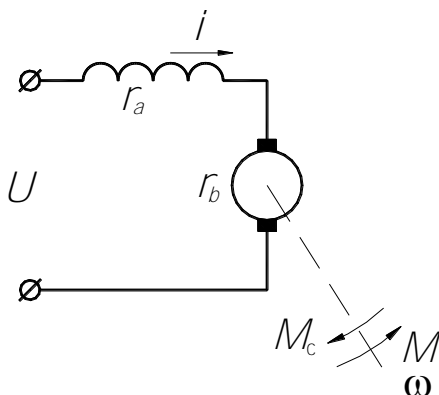


Рис. 22. Схема включения с последовательным возбуждением

При изменении напряжения и момента на величины  $\Delta U$  и  $\Delta M_c$  от начальных значений  $U_0$  и  $M_{c0}$  магнитный поток, ток и скорость вращения изменятся на величины  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta i$ ,  $\Delta\omega$  от начальных  $\Phi_0$ ,  $i_0$ ,  $\omega_0$ . Уравнение движения при этом:

$$\begin{aligned} J \frac{d}{dt}(\omega_0 + \Delta\omega) &= c(\Phi_0 + \Delta\Phi)(i_0 + \Delta i) - (M_{c0} + \Delta M_c) = \\ &= c\Phi_0 i_0 + c\Delta\Phi i_0 + c\Phi_0 \Delta i + c\Delta\Phi \Delta i - M_{c0} - \Delta M_c. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $c\Phi_0 i_0 = M_{c0}$  и  $c\Delta\Phi \Delta i \approx 0$ , получаем

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = c\Delta\Phi i_0 + c\Phi_0 \Delta i - \Delta M_c.$$

При изменении  $U$  на  $\Delta U$

$$\begin{aligned} U + \Delta U &= c(\Phi_0 + \Delta\Phi)(\omega_0 + \Delta\omega) + (i_0 + \Delta i)r = \\ &= c\Phi_0\omega_0 + c\Delta\Phi\omega_0 + c\Phi_0\Delta\omega + c\Delta\Phi\Delta\omega + i_0r. \end{aligned}$$

Объединяя два последних уравнения, получим

$$\frac{Jr}{(c\Phi_0)^2} \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = \frac{\Delta U}{c\Phi_0} - \frac{c\Delta\Phi\omega_0}{c\Phi_0} + \frac{c\Delta\Phi i_0 r}{(c\Phi_0)^2} - \frac{\Delta M_c r}{(c\Phi_0)^2}.$$

Учитывая, что  $-\frac{c\Delta\Phi\omega_0}{c\Phi_0} + \frac{c\Delta\Phi i_0 r}{(c\Phi_0)^2} \approx 0$

$$\frac{Jr}{(c\Phi_0)^2} \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = \frac{\Delta U}{c\Phi_0} - \frac{\Delta M_c r}{(c\Phi_0)^2}.$$

Отсюда получаем передаточные функции двигателя:

$$W_U(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_c(p)} = -\frac{k_M}{(T_M p + 1)}.$$

Если выходная величина – угол поворота вала:

$$W_U(p) = \frac{\alpha(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{p(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\alpha(p)}{M_c(p)} = -\frac{k_M}{p(T_M p + 1)}.$$

Коэффициенты передачи  $k_U = \frac{1}{\alpha\Phi_0}$ ;  $k_M = \frac{r}{(\alpha\Phi_0)^2}$ ; постоянная времени  $T_M = \frac{Jr}{(\alpha\Phi_0)^2}$ .

Значения  $\alpha\Phi_0$  рассчитываются аналогично изложенному для двигателя с полюсным управлением, при этом

$$\alpha\Phi_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}}(r_a + r_b)}{\omega_{\text{ном}}}.$$

### 5.1.2. Двигатели переменного тока

*Двухфазные асинхронные электродвигатели [3].* К ним относятся двигатели типов ДИД, ДИД-ТА, ЭМ, АДП, а также двигатели-генераторы типов ДГ и ДГ-ТА.

Существует три основных способа управления такими двигателями: амплитудный, фазовый и частотный. В системах автоматического регулирования преимущественно используется амплитудный способ, при котором скорость вращения изменяется при изменении амплитуды напряжения управления  $U_{уп}$ , а частота питания и угол сдвига фаз между напряжениями управления и возбуждения  $U_v$  остается неизменным (рис. 23).

При амплитудном управлении уравнение моментов

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

Если представить механические характеристики двигателя в виде прямых линий

$$M = M_{\text{п}} - a\omega, \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{п}} - a\omega - M_{\text{с}},$$

где пусковой момент  $M_{\text{п}} = bU_{\text{уп}}$ . Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются на основании паспортных данных двигателя:

$$a = \frac{M_{\text{п.ном}} - M_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad b = \frac{M_{\text{п.ном}}}{U_{\text{уп.ном}}}.$$

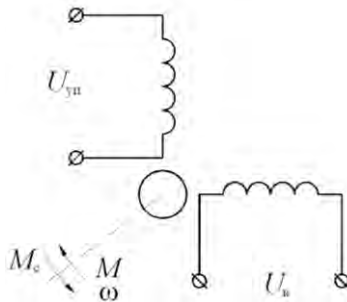


Рис. 23. Схема управления двухфазным асинхронным двигателем

Уравнение моментов можно записать в виде

$$\left( \frac{J}{a} p + 1 \right) \omega(t) = \frac{b}{a} U_{\text{уп}} - \frac{1}{a} M_{\text{с}}.$$

Отсюда получаем передаточные функции двигателя:

$$W_U(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\omega(p)}{M_{\text{с}}(p)} = -\frac{k_M}{(T_M p + 1)}.$$

Если выходная величина – угол поворота вала:



$$W_U(p) = \frac{\alpha(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{p(T_M p + 1)};$$

$$W_M(p) = \frac{\alpha(p)}{M_c(p)} = -\frac{k_M}{p(T_M p + 1)}.$$

Коэффициенты передачи  $k_U = \frac{b}{a}$ ;  $k_M = \frac{1}{a}$ ; постоянная времени

$$T_M = \frac{J}{a}.$$

*Пример расчета.* Рассчитаем динамические характеристики привода на основе двигателя ДИД-5 с характеристиками:  $P_{\text{НОМ}} = 5$  Вт;  $U_{\text{уп.НОМ}} = 36$  В;  $f = 400$  Гц;  $n_{\text{НОМ}} = 4850$  об/мин ( $\omega_{\text{НОМ}} = 506$  рад/с);  $J = 0,25 \cdot 10^{-5}$  кг·м<sup>2</sup>;  $M_{\text{НОМ}} = 0,00986$  Н·м;  $M_{\text{п.НОМ}} = 0,0197$  Н·м.

$$b = \frac{M_{\text{п.НОМ}}}{U_{\text{уп.НОМ}}} = \frac{0,0197}{36} = 0,00056 \text{ Н·м/В};$$

$$a = \frac{M_{\text{п.НОМ}} - M_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{0,0197 - 0,00986}{506} = 0,0000195 \text{ Н·м·с};$$

$$T_M = \frac{J}{a} = \frac{0,25 \cdot 10^{-5}}{0,195 \cdot 10^{-4}} = 0,128 \text{ с};$$

$$k_U = \frac{b}{a} = \frac{0,00056}{0,0000195} = 28,2 \text{ 1/В·с};$$

$$k_M = \frac{1}{a} = \frac{1}{0,0000195} = 51282 \text{ 1/Н·м·с}.$$

## Передаточные функции

$$W_U(p) = \frac{28,2}{(0,128p+1)}; \quad W_M(p) = -\frac{51282}{(0,128p+1)}$$

Переходная характеристика двигателя при изменении управляющего напряжения показана на рис. 24, частотные характеристики – на рис. 25, 26.

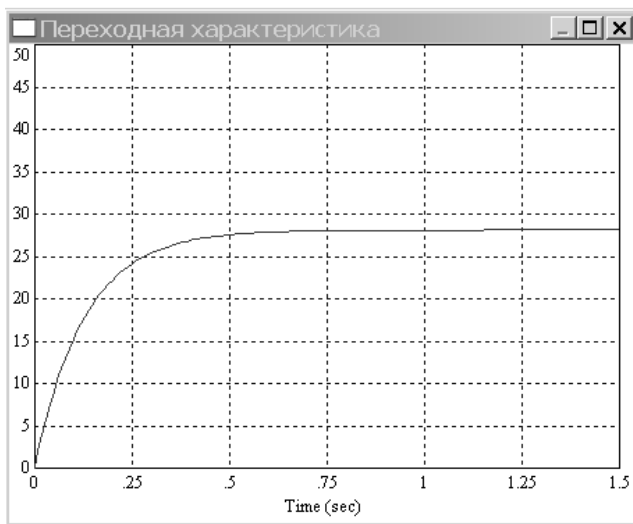


Рис.24. Переходная характеристика двигателя

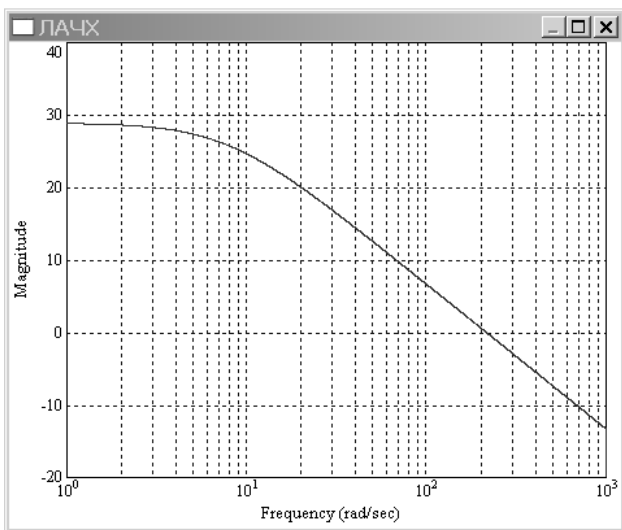


Рис. 25. ЛАЧХ двигателя

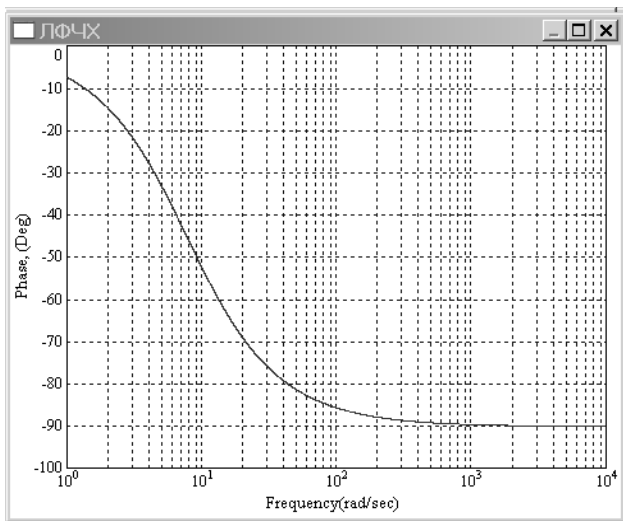


Рис. 26. ЛФЧХ двигателя

*Трехфазные асинхронные электродвигатели [3].* Выходной величиной асинхронного двигателя является скорость вращения, входной могут быть напряжение на двигателе, индуктивное сопро-

тивление в цепи фазы статора, активное сопротивление в цепи фазы ротора, частота питающего напряжения и т. п. Обозначим входную величину  $A$ . Уравнение движения электропривода

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(A, \omega) - M_c(\omega).$$

При некотором значении входной величины  $A = A_0$  система работает в установившемся режиме при скорости  $\omega_0$ . При этом момент двигателя равен моменту сопротивления. Изменение  $A_0$  на  $\Delta A = A - A_0$  вызывает изменение скорости на величину  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ , и в двигателе будут протекать переходные процессы. Разложив моменты в ряд Тейлора и ограничившись первыми производными ввиду малости значений  $\Delta A$  и  $\Delta\omega$ , получим

$$M(A, \omega) = M(A_0, \omega_0) + \left( \frac{\partial M}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega + \left( \frac{\partial M}{\partial A} \right)_0 \Delta A;$$

$$M_c(\omega) = M_c(\omega_0) + \left( \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right)_0 \Delta\omega.$$

Частные производные, взятые с обратными знаками,  $-\left( \frac{\partial M}{\partial \omega} \right)_0 = \beta$  и  $-\left( \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \right)_0 = \beta_c$  называются жесткостью механических характеристик двигателя и момента сопротивления, частная производная  $\left( \frac{\partial M}{\partial A} \right)_0 = k_M$  называется коэффициентом чувствительности двигателя по моменту. С учетом этого уравнение движения приобретает вид

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} + (\beta - \beta_c) \Delta\omega = k_M \Delta A \quad \text{или} \quad (T_M p + 1) \Delta\omega = k \Delta A,$$

где  $T_M = \frac{J}{\beta - \beta_c}$  – электромеханическая постоянная времени,

$k = \frac{k_M}{\beta - \beta_c}$  – коэффициент передачи.

Отсюда получаем передаточные функции двигателя:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{A(p)} = \frac{k}{(T_M p + 1)} \quad \text{или} \quad W(p) = \frac{\alpha(p)}{A(p)} = \frac{k}{p(T_M p + 1)}.$$

Для расчета динамических характеристик значения  $\beta$  и  $\beta_c$  получают из графиков механических характеристик двигателя для малых приращений  $\Delta M$ ,  $\Delta M_c$  и  $\Delta \omega$  при заданной номинальной скорости, как показано на рис. 27. При этом  $\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$  и  $\beta_c = \frac{\Delta M_c}{\Delta \omega}$ .

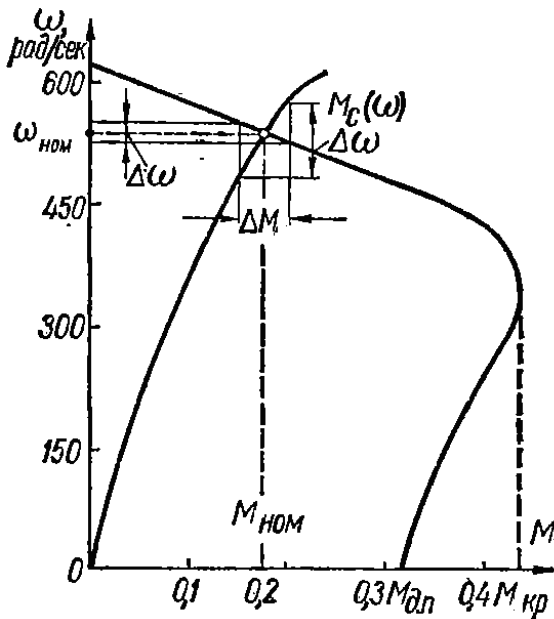


Рис. 27. Механические характеристики двигателя

Для получения коэффициента чувствительности двигателя по моменту  $k_M$  необходима зависимость  $M = f(A)$ , которая может быть определена на основании семейства механических характеристик при разных  $A$ .

### 5.1.3. Шаговые двигатели

Шаговый двигатель представляет собой систему преобразования импульсного электрического сигнала в непрерывный с нелинейным элементом (рис. 28).

На рисунке  $T$  – период следования тактовых импульсов.

Коэффициент обратной связи определяется по формуле

$$k_{o.c.} = \frac{U_0 i_{ред}}{f_{и} \alpha_{ш}},$$

где  $U_0$  – амплитуда тактовых импульсов;  $i_{ред}$  – передаточное отношение редуктора;  $f_{и}$  – частота тактовых импульсов;  $\alpha_{ш}$  – величина углового шага.

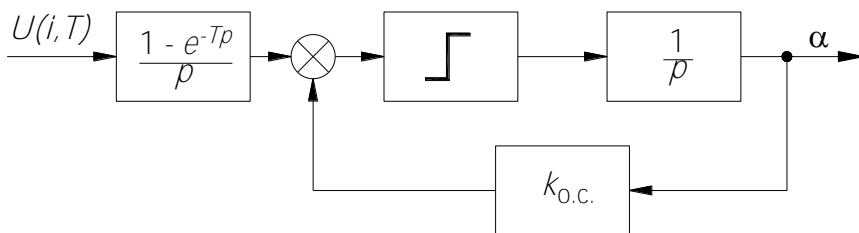


Рис. 28. Структурная схема шагового привода

## 5.2. Гидравлические и пневматические исполнительные устройства

### 5.2.1. Интегрирующий гидравлический привод [4]

Механизм состоит из золотника 1 и гидроцилиндра 2 (рис. 29). Нагрузка гидроцилиндра представлена в виде приведенной массы

$m_{np}$ . Золотник имеет нулевые перекрытия и расположен во втулке с нулевыми зазорами. Рабочая жидкость считается несжимаемой.

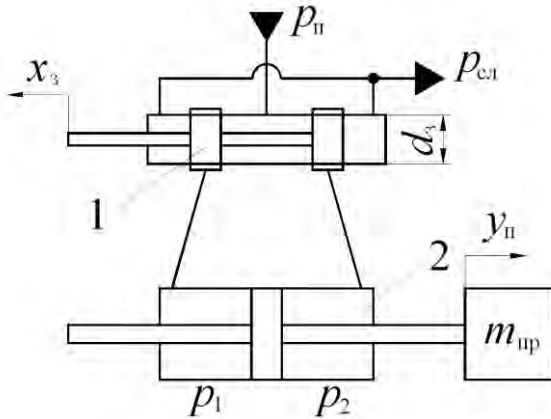


Рис. 29. Интегрирующий гидравлический привод

При смещении золотника от нейтрального положения расход жидкости, протекающей в гидроцилиндр и вытекающей из него через окна во втулке золотника,

$$Q_3 = \mu_3 b_{ок} x_3 \sqrt{\frac{p_{п} - p_{сл}}{\rho}},$$

где  $\mu_3$  – коэффициент расхода окон золотника, при турбулентном течении жидкости его можно считать равным 0,62 [5];  $b_{ок}$  – ширина окон во втулке (если окно, расположенное напротив бурта золотника, занимает весь периметр втулки, то  $b_{ок} = \pi d_3$ ,  $d_3$  – диаметр втулки золотника);  $x_3$  – смещение золотника от нейтрального положения;  $p_1$  – давление питания в напорной гидролинии;  $p_{сл}$  – давление в сливной гидролинии;  $\rho$  – плотность жидкости.

По условию неразрывности течения жидкости

$$Q_3 = F_{ц} \frac{dy_{п}}{dt},$$

где  $F_{ц}$  – рабочая площадь поршня гидроцилиндра;  $y_{п}$  – смещение поршня.

В итоге получаем уравнение

$$T_{г} \frac{dy_{п}}{dt} = x_3,$$

где  $T_{г}$  – постоянная времени гидравлического привода, определяемая по выражению:

$$T_{г} = \frac{F_{ц}}{\mu_3 b_{ок} \sqrt{\frac{\rho_{п} - \rho_{сл}}{\rho}}}.$$

Передаточная функция гидравлического привода:

$$W(p) = \frac{1}{T_{г} p},$$

что соответствует передаточной функции интегрирующего звена.

С учетом инерции присоединенной массы уравнение движения поршня гидроцилиндра:

$$F_{ц}(\rho_1 - \rho_2) = m_{пр} \frac{d^2 y_{п}}{dt^2}.$$

Расход жидкости, протекающей в гидроцилиндр и вытекающей из него через окна во втулке золотника,

$$Q_3 = \mu_3 b_{ок} x_3 \sqrt{\frac{\rho_{п} - \rho_{сл} - (\rho_1 - \rho_2)}{\rho}}.$$



При этом модель гидропривода становится нелинейной, поэтому для линеаризации перейдем к малым отклонениям  $\Delta\rho_1$ ,  $\Delta\rho_2$ ,  $\Delta y_{\text{п}}$  от начальных значений  $\rho_{1.0}$ ,  $\rho_{2.0}$ ,  $y_{\text{п}.0}$ :

$$F_{\text{ц}}(\rho_{1.0} - \rho_{2.0}) + F_{\text{ц}}(\Delta\rho_1 - \Delta\rho_2) = m_{\text{пр}} \frac{d^2 \Delta y_{\text{п}}}{dt^2}.$$

В данном случае гидропривод преодолевает только действие инерционной нагрузки, поэтому, считая невозмущенное движение выходного звена равномерным, имеем:

$$(\rho_{1.0} - \rho_{2.0}) = 0.$$

С учетом этого

$$(\Delta\rho_1 - \Delta\rho_2) = \frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} \cdot \frac{d^2 \Delta y_{\text{п}}}{dt^2}.$$

В результате линеаризации уравнения расхода получим:

$$Q_3 = Q_{30} + K_{Qx} \Delta x_3 + K_{Q\rho} (\Delta\rho_1 - \Delta\rho_2),$$

где

$$Q_{30} = \mu_3 b_{\text{ок}} x_{30} \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{сл}}}{\rho}};$$

$$K_{Qx} = \left( \frac{\partial Q_3}{\partial x_3} \right)_0 = \mu_3 b_{\text{ок}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{сл}}}{\rho}};$$

$$K_{Q\rho} = - \left( \frac{\partial Q_3}{\partial (\rho_1 - \rho_2)} \right)_0 = \frac{\mu_3 b_{\text{ок}} x_{30}}{2\sqrt{\rho(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{сл}})}}.$$

Уравнение неразрывности течения

$$Q_3 = F_{\text{ц}} \frac{dy_{\text{п}}}{dt} = F_{\text{ц}} \frac{dy_{\text{п.0}}}{dt} + F_{\text{ц}} \frac{d\Delta y_{\text{п}}}{dt}.$$

Для невозмущенного движения выходного звена

$$Q_{30} = F_{\text{ц}} \frac{dy_{\text{п.0}}}{dt}.$$

С учетом этого

$$(\Delta p_1 - \Delta p_2) = \frac{K_{\text{Ох}}}{K_{\text{Ор}}} \Delta x_3 - \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ор}}} \frac{d\Delta y_{\text{п}}}{dt}.$$

Подставив полученное значение разности давлений в уравнение движения выходного звена, получим

$$\frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} \cdot \frac{d^2 \Delta y_{\text{п}}}{dt^2} + \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ор}}} \frac{d\Delta y_{\text{п}}}{dt} = \frac{K_{\text{Ох}}}{K_{\text{Ор}}} \Delta x_3.$$

Передаточная функция гидравлического привода

$$W(p) = \frac{K_{\text{Ох}}/K_{\text{Ор}}}{\frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} p^2 + \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ор}}} p} = \frac{K_{\text{Ох}}/K_{\text{Ор}}}{p \left( \frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} p + \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ор}}} \right)} = \frac{K_{\text{Ох}}/F_{\text{ц}}}{p \left( \frac{m_{\text{пр}} K_{\text{Ор}}}{F_{\text{ц}}^2} p + 1 \right)},$$

что соответствует передаточной функции интегрирующего звена с замедлением

$$W(p) = \frac{K}{p(Tp + 1)},$$

где  $K = K_{Qx} / F_0$ ,  $T = \frac{m_{i\delta} K_{Qp}}{F_0^2}$ .

### 5.2.2. Следящий гидропривод [4]

В отличие от механизма на рис. 29 штоки золотника и поршня гидроцилиндра соединены рычагами (рис. 30). При входном воздействии  $h_A$ , создаваемым перемещением точки  $A$  рычага  $AOB$ , золотник 1, отклоняясь от нейтрального положения, сообщает одну полость гидроцилиндра 2 с каналом питания, а другую со сливом. Под действием возникшей разности давлений  $p_1 - p_2$  поршень перемещается, управляя перемещением какого-либо объекта. Одновременно перемещается связанная с поршнем точка  $C$  рычага  $COD$ . При этом происходит обратное движение золотника в сторону нейтрального положения. Таким образом, осуществляется отрицательная обратная связь в системе. В момент возвращения золотника в нейтральное положение поршень гидроцилиндра останавливается, переместившись на величину  $y_{п}$ , пропорциональную перемещению точки  $A$ . Отношение перемещений  $y_{п}$  и  $h_A$  называется коэффициентом передачи гидропривода и зависит от соотношения плеч рычагов  $AOB$  и  $COD$ . При равных плечах рычагов

$$x_3 = h_A - y_{п}.$$

Дифференциальное уравнение по аналогии с ненагруженным гидромеханизмом:

$$T_{г} \frac{dy_{п}}{dt} = h_A - y_{п} \text{ или } T_{г} \frac{dy_{п}}{dt} + y_{п} = h_A.$$

Передаточная функция механизма

$$W(p) = \frac{1}{T_I p + 1},$$

что соответствует передаточной функции аperiodического звена.

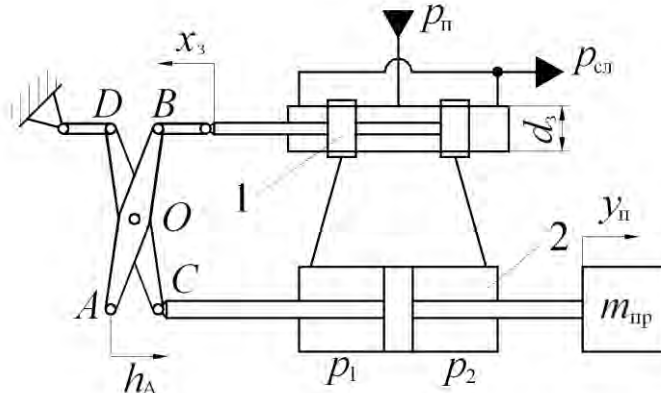


Рис. 30. Следящий гидропривод

По аналогии с интегрирующим приводом с учетом инерции присоединенной массы уравнение движения поршня гидроцилиндра:

$$\frac{m_{пп}}{F_{ц}} \cdot \frac{d^2 \Delta y_{п}}{dt^2} + \frac{F_{ц}}{K_{Qp}} \frac{d \Delta y_{п}}{dt} = \frac{K_{Ox}}{K_{Qp}} \Delta x_3.$$

При равных плечах рычагов

$$\Delta x_3 = \Delta h_A - \Delta y_{п}.$$

Уравнение движения будет иметь вид:

$$\frac{m_{пп}}{F_{ц}} \frac{K_{Qp}}{K_{Ox}} \cdot \frac{d^2 \Delta y_{п}}{dt^2} + \frac{F_{ц}}{K_{Ox}} \frac{d \Delta y_{п}}{dt} + \Delta y_{п} = \Delta h_A.$$

Передаточная функция следящего гидропривода:

$$W(p) = \frac{1}{\frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} \frac{K_{\text{Op}}}{K_{\text{Ox}}} p^2 + \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ox}}} p + 1},$$

что соответствует передаточной функции аperiodического звена второго порядка

$$W(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

где  $T_1 = \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{F_{\text{ц}}} \frac{K_{\text{Op}}}{K_{\text{Ox}}}}, T_2 = \frac{F_{\text{ц}}}{K_{\text{Ox}}}.$

### 5.2.3. Гидравлический пресс [4]

Схема гидросистемы пресса показана на рис. 31. Система состоит из нерегулируемого дросселя с постоянным гидравлическим сопротивлением  $R_1$ , регулируемого дросселя с переменным гидравлическим сопротивлением  $R_2$ , и гидроцилиндра с поршнем массой  $m$ . На поршень с одной стороны действует давление  $p_2$ , с другой сила сопротивления, условно показанная как создаваемая упругим элементом с жесткостью  $c_{\text{пр}}$ . Давление после  $R_2$  равно атмосферному.

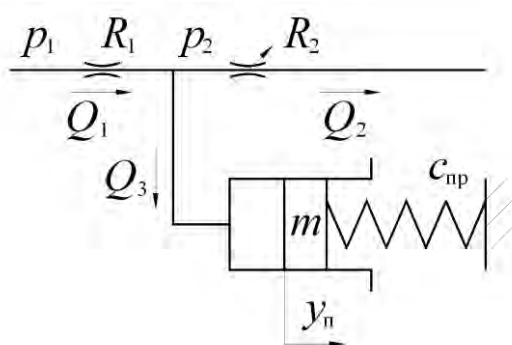


Рис. 31. Гидравлическая система пресса

Поршень находится в равновесии, когда сила давления равна силе пружины. Регулируя гидравлическое сопротивление  $R_2$ , можно изменять давление  $p_2$  и вызывать перемещение поршня. Входной величиной является  $R_2$ , выходной – перемещение поршня  $y_{\text{п}}$ .

Соотношения между расходами жидкости и параметрами системы:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3; \quad Q_1 = \frac{\sqrt{p_1 - p_2}}{R_1}; \quad Q_2 = \frac{\sqrt{p_2}}{R_2}.$$

По условию неразрывности жидкости

$$Q_3 = F_{\text{ц}} \frac{dy_{\text{п}}}{dt}.$$

По второму закону Ньютона уравнение движения поршня

$$F_{\text{ц}} p_2 - (P_0 + c_{\text{пр}} y_{\text{п}}) = m \frac{d^2 y_{\text{п}}}{dt^2},$$

где  $P_0$  – сила от действия пружины при  $y_{\text{п}} = 0$ .

Так как расход жидкости пропорционален корню из перепада давлений, математическая модель пресса является нелинейной. Для

линеаризации будем рассматривать малые отклонения  $\Delta R_2$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta y_{\text{п}}$  от значений  $R_{2,0}$ ,  $p_{2,0}$  при  $y_{\text{п}} = y_{\text{п},0}$ . Линеаризованные зависимости для расходов:

$$Q_1 = Q_{1,0} - + \frac{1}{2R_1\sqrt{p_1 - p_{2,0}}} \Delta p_2 ;$$

$$Q_2 = Q_{2,0} - \frac{Q_{2,0}}{R_{2,0}} \Delta R_2 + \frac{1}{2R_{2,0}\sqrt{p_{2,0}}} \Delta p_2 ;$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{1,0} - + \frac{1}{2R_1\sqrt{p_1 - p_{2,0}}} \Delta p_2 = \\ &= Q_{2,0} - \frac{Q_{2,0}}{R_{2,0}} \Delta R_2 + \frac{1}{2R_{2,0}\sqrt{p_{2,0}}} \Delta p_2 + F_{\text{ц}} \frac{d\Delta y_{\text{п}}}{dt} \end{aligned}$$

Следовательно

$$F_{\text{ц}} \frac{d\Delta y_{\text{п}}}{dt} = Q_{1,0} - Q_{2,0} + \frac{1}{2R_1\sqrt{p_1 - p_{2,0}}} \Delta p_2 + \frac{Q_{2,0}}{R_{2,0}} \Delta R_2 - \frac{1}{2R_{2,0}\sqrt{p_{2,0}}} \Delta p_2$$

Уравнение движения поршня при малых отклонениях величин

$$F_{\text{ц}}(p_{2,0} + \Delta p_2) - (P_0 + c_{\text{пр}} y_{\text{п},0} + c_{\text{пр}} \Delta y_{\text{п}}) = m \frac{d^2 \Delta y_{\text{п}}}{dt^2} .$$

При равновесии поршня  $F_{\text{ц}} p_{2,0} - (P_0 + c_{\text{пр}} y_{\text{п},0}) = 0$ , поэтому

$$F_{\text{ц}} \Delta p_2 - c_{\text{пр}} \Delta y_{\text{п}} = m \frac{d^2 \Delta y_{\text{п}}}{dt^2} .$$

Исключая переменную  $\Delta p_2$ , получим линеаризованное уравнение системы:

$$a_2 \frac{d^2 \Delta y_{\Pi}}{dt^2} + a_1 \frac{d\Delta y_{\Pi}}{dt} + a_0 \Delta y_{\Pi} = b_0 \Delta R_2,$$

где

$$a_2 = \frac{m}{F_{\Pi}} \left( \frac{1}{2R_1 \sqrt{\rho_1 - \rho_{2,0}}} + \frac{1}{2R_{2,0} \sqrt{\rho_{2,0}}} \right);$$

$$a_1 = F_{\Pi};$$

$$a_0 = \frac{c_{\text{пр}}}{F_{\Pi}} \left( \frac{1}{2R_1 \sqrt{\rho_1 - \rho_{2,0}}} + \frac{1}{2R_{2,0} \sqrt{\rho_{2,0}}} \right);$$

$$b_0 = \frac{\sqrt{\rho_{2,0}}}{R_{2,0}^2}.$$

Разделив все коэффициенты уравнения на  $a_0$ , приведем его к стандартному виду:

$$T_2^2 \frac{d^2 \Delta y_{\Pi}}{dt^2} + T_1 \frac{d\Delta y_{\Pi}}{dt} + \Delta y_{\Pi} = K \Delta R_2,$$

$$\text{где } T_2 = \sqrt{\frac{m}{c_{\text{пр}}}}; \quad T_1 = \frac{F_{\Pi}^2 R_0}{c_{\text{пр}}}; \quad K = \frac{R_0 F_{\Pi} \sqrt{\rho_{2,0}}}{R_{2,0}^2 c_{\text{пр}}};$$

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{2R_1 \sqrt{\rho_1 - \rho_{2,0}}} + \frac{1}{2R_{2,0} \sqrt{\rho_{2,0}}}.$$

Передаточная функция гидравлического пресса:

$$W(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$



что соответствует передаточной функции аperiodического звена второго порядка.

Для изменения входной величины, то есть гидравлического сопротивления  $R_2$ , изменяют площадь сечения канала  $f_2$ , с которым гидравлическое сопротивление связано следующим образом:

$$R_2 = \frac{1}{\mu_2 f_2} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \quad (\text{аналогично } R_1 = \frac{1}{\mu_1 f_1} \sqrt{\frac{\rho}{2}}),$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты расхода.

Величина  $\rho_1 - \rho_{2,0}$ , входящая в формулы для  $T_1$  и  $K$  может быть вычислена с учетом коэффициента местного гидравлического сопротивления  $\zeta$ :

$$\rho_1 - \rho_{2,0} = \frac{\zeta^2 \rho \mu_1^2}{2}, \quad \zeta = \left( \frac{1}{n\varepsilon} - 1 \right)^2,$$

где  $n$  – отношение площади сечения проходного отверстия в гидравлическом сопротивлении (вентиле) к площади трубопровода;  $\varepsilon$  – степень сжатия струи,  $\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}$ .

Коэффициент расхода имеет сложную зависимость от числа Рейнольдса  $Re_1 = \frac{d_1 \sqrt{2\rho_1}}{v\sqrt{\rho}}$  и  $Re_2 = \frac{d_2 \sqrt{2\rho_2}}{v\sqrt{\rho}}$ , где  $d_1, d_2$  – диаметры проходных отверстий в гидравлических сопротивлениях,  $v$  – кинематическая вязкость жидкости:  
при  $Re \leq 25$

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{156}{Re^2} - \frac{12,5}{Re}};$$

при  $25 < Re \leq 300$

$$\mu = \frac{Re}{1,5 + 1,4 Re} ;$$

при  $300 < Re \leq 10000$

$$\mu = 0,592 + \frac{0,27}{Re^{1/6}} ;$$

при  $Re > 10000$

$$\mu = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{Re}} [5].$$

В табл. 2 приведены характеристики некоторых гидравлических жидкостей и воздуха [5].

Таблица 2

### Характеристики гидравлических сред

| Гидравлическая среда        | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с | $B$ , МПа |
|-----------------------------|----------------------------|---|-----------|
| Вода                        | 998,2                      | 1                                       | 2060      |
| Керосин                     | 800                        | 2,7                                     | 1275      |
| Масло индустриальное 20     | 860                        | 20                                      | 1362      |
| Масло индустриальное 50     | 910                        | 90                                      | 1473      |
| Масло гидравлическое МГЕ-4А | 840                        | 3,6                                     | 1380      |
| Спирт этиловый              | 789                        | 1,5                                     | 1275      |
| Воздух                      | 1,293                      | 55                                      | 0,14      |

Примечание.  $B$  – коэффициент объемной упругости жидкости (адиабатический объемный модуль упругости)

*Пример расчета.* Рассчитаем динамические характеристики прессы, который питается давлением  $p_1 = 1$  МПа, диаметр трубопроводов  $d = 10$  мм, в начальный момент времени оба вентиля наполовину открыты ( $n = 0,5$ ), рабочая жидкость МГЕ-4А ( $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 3,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), диаметр гидроцилиндра  $D = 100$  мм, масса поршня  $m = 1$  кг, жесткость упругого элемента  $c_{уп} = 10^6$  Н/м.

Число Рейнольдса для первого гидравлического сопротивления:

$$Re_1 = \frac{5 \cdot 10^{-3} \sqrt{2 \cdot 10^6}}{3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{840}} = 67771.$$

Коэффициент расхода для первого гидравлического сопротивления:

$$\mu_1 = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{67771}} = 0,613.$$

Степень сжатия струи:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - 0,5} = 0,64.$$

Коэффициент местного гидравлического сопротивления:

$$\zeta_1 = \left( \frac{1}{0,5 \cdot 0,64} - 1 \right)^2 = 4,5.$$

$$p_1 - p_{2,0} = \frac{4,5^2 \cdot 840 \cdot 0,613^2}{2} = 3011 \text{ Па.}$$

$$p_{2,0} = 1000000 - 3011 = 996989 \text{ Па}$$

Число Рейнольдса для второго гидравлического сопротивления:

$$Re_2 = \frac{5 \cdot 10^{-3} \sqrt{996989}}{3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{840}} = 47849.$$

Коэффициент расхода для второго гидравлического сопротивления:

$$\mu_2 = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{47849}} = 0,617.$$

$$R_{2,0} = \frac{4}{0,617 \cdot 3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{840}{2}} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-0,5}.$$

$$R_1 = \frac{4}{0,613 \cdot 3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{840}{2}} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-0,5}.$$

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{2 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \cdot 3011} + \frac{1}{2 \cdot 1,7 \cdot 10^6 \cdot 996989} = 0,0102.$$

$$R_0 = 97,975.$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{1}{10^6}} = 10^{-3} \text{ с}.$$

$$T_1 = \frac{3,14^2 \cdot 10^{-4} \cdot 97,975}{4 \cdot 10^6} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

$$K = \frac{97,975 \cdot 3,14 \cdot 0,01 \sqrt{996989}}{4 \cdot 1,7 \cdot 10^{12} \cdot 10^6} = 1,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{3,5}/\text{с}.$$

Передаточная функция

$$W(p) = \frac{1,8 \cdot 10^{-15}}{10^{-6} p^2 + 2,4 \cdot 10^{-6} p + 1}.$$

Полученное устройство является колебательным звеном, характеристики которого показаны на рис. 32, 33, 34.

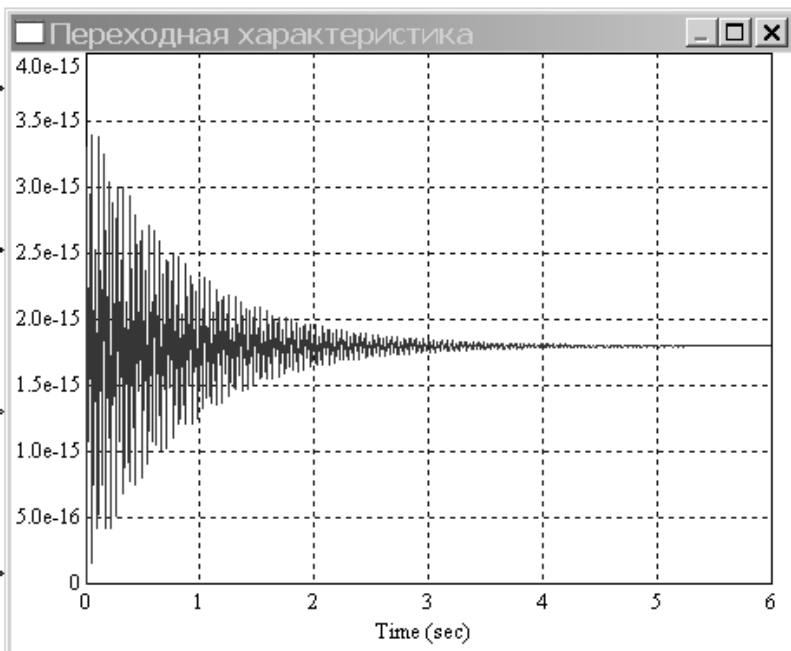


Рис. 32. Переходная характеристика гидравлического пресса

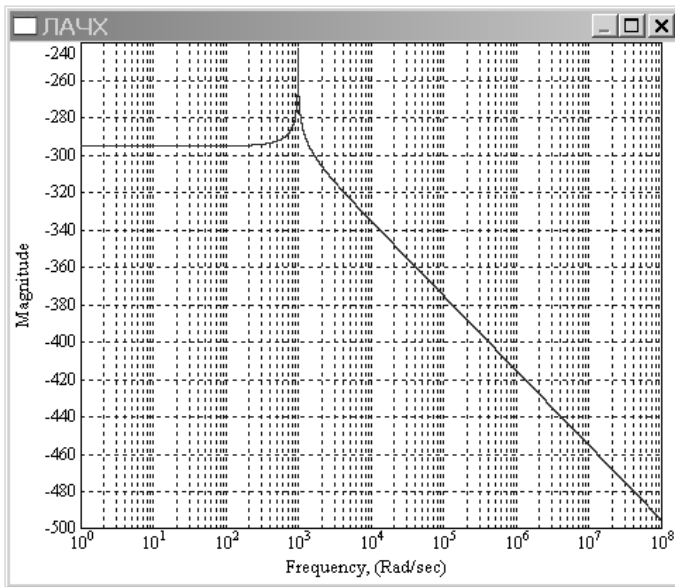


Рис. 33. ЛАЧХ гидравлического пресса

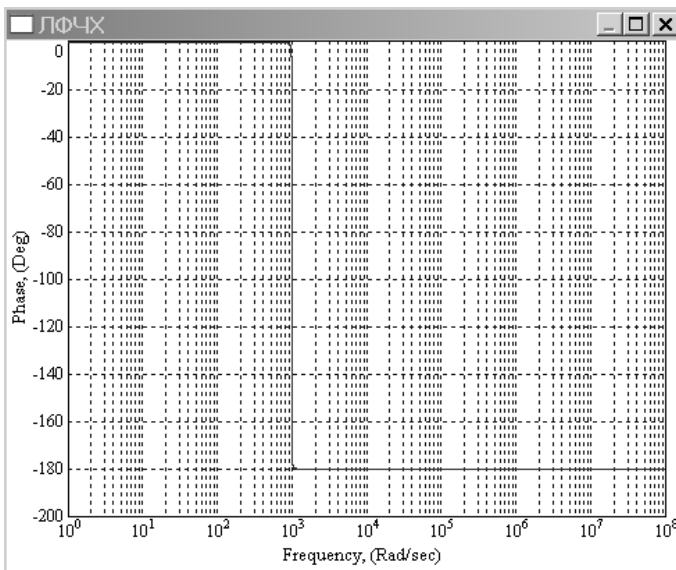


Рис. 34. ЛФЧХ гидравлического пресса

Из полученных характеристик видно, что пресс имеет выраженную колебательную характеристику и нуждается в демпфировании.

## 6. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ

### 6.1. Линии связи

#### 6.1.1. Электрические линии связи

Электрическую линию связи можно представить в виде модели, как показано на рис. 35.

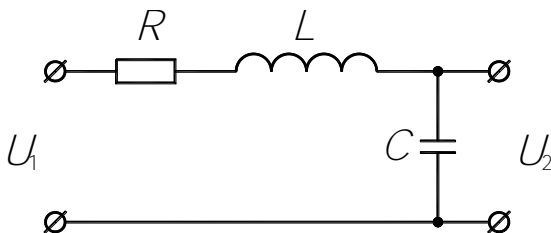


Рис. 35. Модель электрической линии связи

Здесь  $R$  – активное сопротивление проводов,  $L$  – индуктивность проводов,  $C$  – межпроводная емкость. Эти параметры являются распределенными вдоль длины линии  $l$  и задаются в виде погонных параметров на 1 м длины  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ :

$$R = R_0 l; \quad L = L_0 l; \quad C = C_0 l.$$

Модель линии связи представляет собой делитель напряжения. Выходное напряжение

$$U_2 = U_1 \frac{Z_C}{R + Z_L + Z_C},$$

где  $Z_L$  и  $Z_C$  – комплексные импедансы соответственно индуктивности и емкости, равные  $Z_L = j\omega L = pL$ ;  $Z_C = 1/j\omega C = 1/pC$ . Формулу для выходного напряжения запишем в виде

$$U_2 = U_1 \frac{1/pC}{R + pL + 1/pC} = U_1 \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1}.$$

Передачная функция линии связи

$$W(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

что соответствует передачной функции апериодического звена второго порядка с постоянными времени  $T_1 = \sqrt{LC}$  и  $T_2 = RC$  или колебательного звена:

$$W(p) = \frac{1}{LCp^2 + RCp + 1} = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1},$$

где  $T = \sqrt{LC}$ , а параметр затухания  $\xi = \frac{RC}{2\sqrt{LC}}$ .

Характеристики некоторых проводов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики проводных линий связи

| Тип проводной линии              | $R_0$ ,<br>Ом/км | $L_0$ ,<br>мкГн/км | $C_0$ ,<br>мкФ/км |
|----------------------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| Витая пара Ø4 мм                 | 268              | 680                | 0,0455            |
| Телефонный кабель марок ТГ и ТБ  | 190              | 600                | 0,04              |
| Распределительный кабель ТПП-0,4 | 278              | 700                | 0,045             |



*Пример расчета.* Рассчитаем характеристики телефонного кабеля марки ТГ длиной 100 м. Погонные характеристики:

$$R_0 = 190 \text{ Ом/км}, L_0 = 0,6 \text{ мГн/км}, C_0 = 0,04 \text{ мкФ/км}.$$

Параметры линии длиной 100 м:

$$R = 19 \text{ Ом}, L = 0,06 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, C = 0,004 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Постоянные времени:

$$\begin{aligned} T_1 &= \sqrt{0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,004 \cdot 10^{-6}} = 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ с}; \\ T_2 &= 19 \cdot 0,004 \cdot 10^{-6} = 0,76 \cdot 10^{-6} \text{ с}. \end{aligned}$$

Передаточная функция линии связи:

$$W(p) = \frac{1}{24 \cdot 10^{-14} p^2 + 0,76 \cdot 10^{-6} p + 1}.$$

При таких параметрах линия связи является колебательным звеном с постоянной времени  $T = 4,9 \cdot 10^{-7}$  с и параметром затухания  $\xi = 0,7755$ .

Ниже показаны переходная характеристика (рис. 36), ЛАЧХ (рис. 37) и ЛФЧХ (рис. 38) линии связи.



Рис. 36. Переходная характеристика линии связи

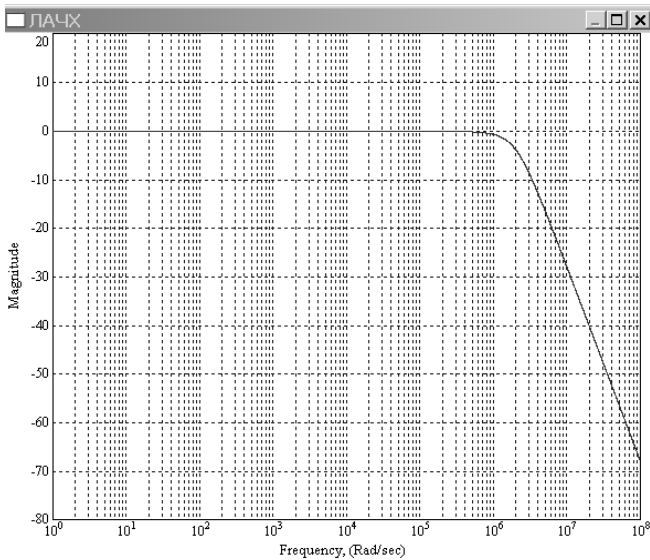


Рис. 37. ЛАЧХ линии связи

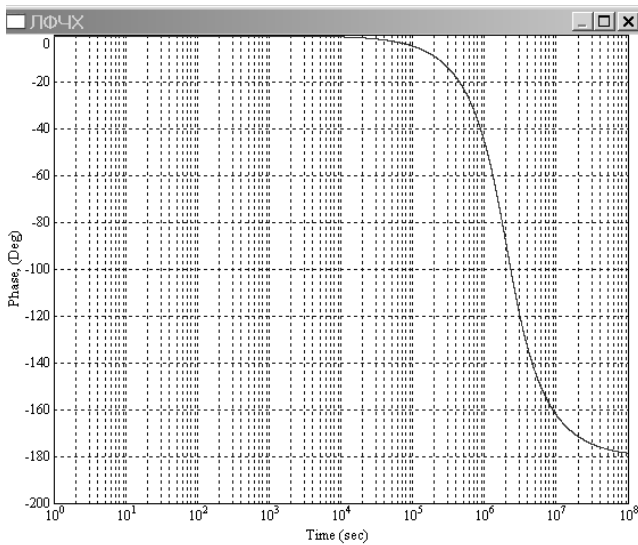


Рис. 38. ЛФЧХ линии связи

Из переходной характеристики видно, что при подаче на вход линии связи скачкообразного сигнала выходное напряжение установится примерно через 3,5 мкс, при этом перерегулирование около 2,5 %.

Из частотных характеристик видно, что линия связи представляет собой фильтр нижних частот, который пропускает сигнал без ослабления в диапазоне от 0 до примерно 0,5 МГц, далее сигнал ослабляется с интенсивностью 40 дБ/дек. В связи с относительно высоким параметром затухания ( $\xi = 0,7755$ ) резонанс на частоте 2,041 МГц ( $1/T$ ) практически не заметен. Фазовый сдвиг выходного сигнала относительно входного становится заметным, начиная с частоты примерно 10 кГц.

### 6.1.2. Гидравлические линии связи [4]

В общем случае гидравлическая линия связи представляет собой трубопровод радиусом  $r_0$  и длиной  $l$ . Если давления на входе и выходе трубопровода обозначить  $p_1$  и  $p_2$ , то передаточная функция линии связи, выражающая зависимость расхода жидкости через

трубопровод с абсолютно жесткими стенками от перепада давления  $(\rho_1 - \rho_2)$  при ламинарном движении несжимаемой жидкости,

$$W_{Qp}(\rho) = \frac{\pi r_0^4}{8\kappa_a \rho \nu \left( \frac{\kappa_p \beta r_0^4}{8\kappa_a \nu} \rho + 1 \right)},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости;  $\kappa_a$  и  $\kappa_p \beta$  – коррективы, учитывающие влияние нестационарного распределения местных скоростей по сечению потока на касательные напряжения в месте контакта жидкости и трубы при гармонических колебаниях ламинарного потока. Коррективы являются функциями безразмерной частоты колебаний потока  $\bar{\omega} = \omega r_0^2 / (8\nu)$ , где  $\omega$  – частота колебаний потока. При  $\bar{\omega} < 1$   $\kappa_a = 1$ ,  $\kappa_p \beta = 1,33$ ; при  $\bar{\omega} \geq 1$

$$\kappa_a = \frac{(4\bar{\omega} - \sqrt{\bar{\omega}})\bar{\omega}}{(2\sqrt{\bar{\omega}} - 1)(4\bar{\omega} - 2\sqrt{\bar{\omega}} + 1)};$$

$$\kappa_p \beta = \frac{4\bar{\omega}}{4\bar{\omega} - 2\sqrt{\bar{\omega}} + 1}.$$

Для приближенных вычислений (погрешность до 5 %) можно воспользоваться формулами:

$$\kappa_a = \frac{\sqrt{\bar{\omega}}}{2} + 0,4; \quad \kappa_p \beta = 1 + \frac{1}{2\sqrt{\bar{\omega}}} \quad \text{при } \bar{\omega} \geq 10;$$

$$\kappa_a = \frac{\sqrt{\bar{\omega}}}{2}; \quad \kappa_p \beta = 1 \quad \text{при } \bar{\omega} \geq 300.$$

Как видно из передаточной функции, трубопровод при перечисленных условиях и без учета скорости распространения возмущения по длине трубопровода является аperiодическим звеном первого порядка, у которого коэффициент передачи  $K = \frac{\pi r_0^4}{8\kappa_a \rho v l}$  и по-

стоянная времени  $T = \frac{\kappa_p \beta r_0^4}{8\kappa_a v}$ .

Передаточная функция трубопровода, связывающая давления на выходе и входе трубы и учитывающая скорость распространения возмущения по длине трубопровода

$$W_p(p) = e^{-\vartheta(p)l},$$

где  $\vartheta(p)$  – операторный коэффициент распространения возмущений:

$$\vartheta(p) = \sqrt{\frac{\rho}{B_{тр}} \left[ \rho p + \frac{2W_{\tau v}(p)}{r_0} \right]},$$

где  $B_{тр}$  – приведенный модуль упругости трубы,  $W_{\tau v}(p)$  – передаточная функция, связывающая касательные напряжения на стенках трубы и скорость потока.

Приведенный модуль упругости трубы

$$B_{тр} = \frac{B}{1 + \frac{2r_0 B}{\delta E_{ст}}},$$

где  $B$  – коэффициент объемной упругости жидкости;  $E_{ст}$  – модуль упругости материала стенки;  $\delta$  – толщина стенки.

Передаточная функция, связывающая касательные напряжения на стенках трубы и скорость потока

$$W_{\tau v}(p) = \frac{j\rho r_0 J_1\left(jr_0\sqrt{\frac{p}{v}}\right)}{\sqrt{\frac{p}{v}} J_2\left(jr_0\sqrt{\frac{p}{v}}\right)},$$

где  $J_1\left(jr_0\sqrt{\frac{p}{v}}\right)$  и  $J_2\left(jr_0\sqrt{\frac{p}{v}}\right)$  – функции Бесселя первого рода первого и второго порядка.

Для упрощения расчета  $\mathfrak{G}(p)$  можно пренебречь гидравлическим сопротивлением линии и влиянием нестационарности потока на сопротивление. При этом  $\kappa_a = \kappa_p \beta = 1$ ;  $\mathfrak{G}(p) = p \sqrt{\frac{\rho}{B_{\text{тр}}}}$ ;

$W_p(p) = e^{-\mathfrak{G}(p)l} = e^{-p l \sqrt{\frac{\rho}{B_{\text{тр}}}}}$ . Передаточная функция трубопровода, связывающая изменение расхода жидкости с изменением перепада давлений

$$W(p) = W_{Qp}(p) W_p(p) = \frac{\pi r_0^4}{8\rho v \left( \frac{r_0^4}{8v} p + 1 \right)} \cdot e^{-p l \sqrt{\frac{\rho}{B_{\text{тр}}}}}.$$

Из приведенных соотношений можно сделать вывод, что трубопровод является звеном с запаздыванием, время запаздывания

$$\tau = l \sqrt{\frac{\rho}{B_{\text{тр}}}}.$$

*Пример расчета.* Рассчитаем передаточную функцию стального трубопровода длиной  $l = 10$  м, радиусом  $r_0 = 10$  мм и толщиной стенки  $\delta = 1$  мм, по которому течет масло МГЕ-4А ( $B = 1380$  МПа,  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 3,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). Приведенный модуль упругости трубы

$$B_{\text{тр}} = \frac{1380}{1 + \frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 1380}{10^{-6} \cdot 2,1 \cdot 10^5}} = 1212 \text{ МПа.}$$

Коэффициент передачи

$$K = \frac{\pi r_0^4}{8 \rho \nu l} = \frac{3,14 \cdot 10^{-20}}{8 \cdot 840 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 1,3 \cdot 10^{-19} \text{ м}^3/\text{Па} \cdot \text{с.}$$

Постоянная времени

$$T = \frac{r_0^4}{8 \nu} = \frac{10^{-20}}{8 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}} = 3,5 \cdot 10^{-15} \text{ с.}$$

Такое малое значение постоянной времени позволяет считать трубопровод безынерционным звеном.

Время запаздывания

$$\tau = 10 \sqrt{\frac{840}{1212 \cdot 10^6}} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

На рис. 39 показана переходная характеристика трубопровода.

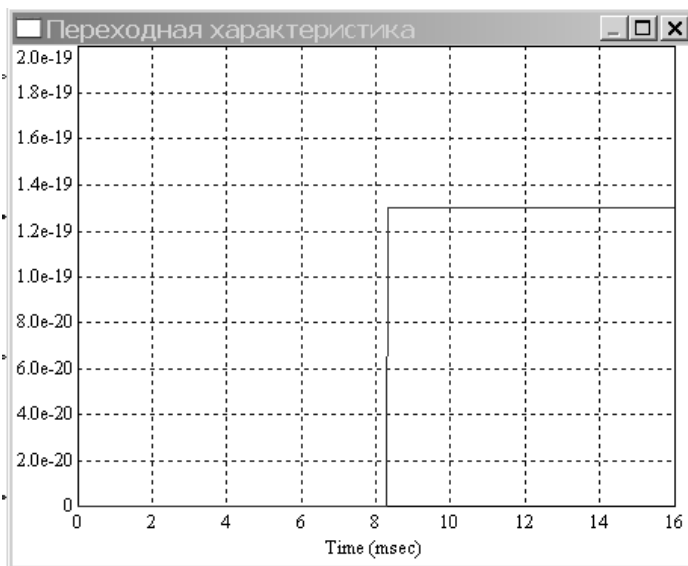


Рис. 39. Переходная характеристика трубопровода

## Литература

1. Келим, Ю.М. Типовые элементы систем автоматического управления / Ю.М. Келим. – М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2002. – 384 с.
2. Колесов, Л.В. Основы автоматики / Л.В. Колесов. – М.: Колос, 1978 – 255 с.
3. Расчет исполнительных, корректирующих и преобразовательных элементов автоматических систем: справочное пособие / П.И. Чинаев [и др.]. – Киев: Техника, 1971. – 308 с.
4. Попов, Д.Н. Динамики и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
5. Медведев, В.Ф. Гидравлика и гидравлические машины / В.Ф. Медведев. – Минск: Вышэйшая школа, 1998. – 311 с.