

Н.Е. ЖАДОБИН, А.П. КРЫЛОВ

**rutracker.org**

# ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

expert22 для <http://rutracker.org>

Издательский проект «Академия» вып. 17  
Серия «Библиотечка Судового Механика»



Н.Б. ЖАДОБИН, А.П. КРЫЛОВ

ЭЛЕМЕНТЫ  
СУДОВОЙ  
АВТОМАТИКИ

rutracker.org

новое имя для торрентов.ru

expert22 для <http://rutracker.org>

Издательский проект «Издательство» в  
Серии «Библиотечка Судового Механика»

БСМ

**Н.Е. Жадобин, А.П. Крылов**

**ЭЛЕМЕНТЫ  
СУДОВОЙ  
АВТОМАТИКИ**

Санкт-Петербург,  
“Элмор”  
2002

ББК 32.96-04  
Ж15

**Ж15 Жадобин Н.Е., Крылов А.П.** Элементы судовой автоматики. Учебное пособие (издательский проект “Академия”, серия “Библиотека судовой механики”). — СПб.: “Элмор”, 2002. — 128 с.

ISBN 5-7399-0091-3

В книге изложены принципы работы, представлены статические и динамические характеристики судовых элементов автоматики, рассмотрены особенности их эксплуатации. Приведены примеры их использования в судовых системах автоматического регулирования и управления.

Материал изложен в соответствии с программой дополнительной подготовки старших и вторых механиков (по разделу “Элементы судовой автоматики”), а также в соответствии с национальными и международными требованиями к подготовке специалистов для морского транспорта, в том числе требованиями Международной Конвенции и Кодекса о подготовке и дипломировании моряков и несения вахты 1978/95 гг. (ПДМНВ 78/95).

Книга может быть использована в качестве справочного и учебного пособия для судовых механиков и электромехаников по вопросам эксплуатации электрооборудования транспортных судов.

ISBN 5-7399-0091-3

ББК 32.96-04

© Н.Е. Жадобин, А.П. Крылов, 2002

© Издательство “Элмор”, 2002

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

Важность обеспечения безопасности мореплавания судов на уровне управления отмечается в материалах Конвенции и Кодекса ПДМНВ 78/95 и находит отражение в организационной структуре Кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнения окружающей среды (МКУБ). Систему МКУБ доводят до каждого судна администрации судоходных компаний с помощью собственных систем управления безопасностью (СУБ). Соответственно, экипажи судов изучают систематизированные материалы по предупреждению возникновения опасных ситуаций и действиям в аварийных ситуациях на судне в составе аварийных партий, а также по контролю знаний судового персонала в отношении несения безопасной вахты (на основе тренажерной подготовки на берегу).

Накопленный в течение продолжительного времени опыт эксплуатации судового электрооборудования позволил внести ряд дополнений и изменений в ряд разделов ПДМНВ 78/95 новой редакции, касающихся компетенции судовых вахтенных механиков, — в целях повышения безопасности мореплавания. В частности, включены вопросы, касающиеся использования электрического и электронного измерительного и испытательного оборудования для обнаружения неисправностей, для проведения технического обслуживания и ремонтных операций; повышены требования в области эксплуатации преобразователей, генераторных агрегатов и их систем управления. Этими обстоятельствами продиктована необходимость в дополнительной подготовке вахтенных механи-



---

ков судов с мощностью главной силовой установки более 3000 кВт по разделу “Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления на уровне эксплуатации” — в целях обеспечения требований к этой группе специалистов в соответствии с ПДМНВ 78/95.

Материал в предлагаемой книге соответствует программе дополнительной подготовки старших и вторых механиков по разделу “Элементы судовой автоматики”, разработанной в Государственной морской академии им. Адмирала С.О. Макарова и утвержденной Службой Морского транспорта Министерства транспорта Российской Федерации.

Книга может быть использована в качестве справочного и учебного пособия для судовых механиков и электромехаников (в вопросах эксплуатации электрооборудования транспортных судов).

# Глава 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И ДАТЧИКИ

---

---

## 1.1. Общие понятия и определения

Процесс управления автоматическими системами связан с получением информации о состоянии объекта управления. Получение информации происходит при помощи измерительных преобразователей и датчиков. *Измерительным преобразователем (ИП)* называется техническое устройство, предназначенное для преобразования одной физической величины в другую, функционально с ней связанную.

Обычно необходимое преобразование осуществляется посредством нескольких ИП, соединенных между собой определенным образом. Измеряемая физическая величина поступает на вход первого ИП, который называется первичным измерительным преобразователем (ПИП). Выходная величина из ПИП поступает на вход последующего ИП, который называется промежуточным. Преобразование измеряемой величины происходит до тех пор, пока с выхода последнего ИП, называемого выходным, не будет получена выходная величина, удобная для дальнейшей обработки, дистанционной передачи и непосредственного восприятия наблюдателем. В дальнейшем измерительные преобразователи будут также называться и просто преобразователями.

*Датчиком* автоматической системы управления, контроля или измерения называется конструктивная совокупность ряда измерительных преобразователей, размещенная непосредственно у объекта управления и служащая для преобразования измеряемой ве-



личины в выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки, дистанционной передачи, хранения и непосредственного восприятия наблюдателем.

В ходе многократных преобразований измеряемые величины меняют свой вид, форму и мощность. В результате последнего преобразования измеряемые величины представляют собой нормированные электрические сигналы. Они, соответственно, могут иметь форму аналогового (непрерывного), цифрового (кодového) или позиционного (логического) сигнала. Нормирование выходного электрического сигнала необходимо для того, чтобы обеспечивать электрическую и информативную совместимость разных устройств.

Аналоговые сигналы постоянного тока унифицированы по диапазону изменения и допустимому значению нагрузки. Наиболее распространены сигналы напряжения постоянного тока  $0...10$  В и силы постоянного тока  $0...5$  мА. Датчики, имеющие на выходе напряжение, должны обеспечивать неизменный выходной сигнал при изменении нагрузки от холостого хода до  $2$  кОм, выполняя роль идеального генератора напряжения. Датчики, имеющие на выходе ток, должны сохранять неизменной силу тока при изменениях сопротивления нагрузки от  $0$  до  $2$  кОм, выполняя роль идеального генератора тока. Преобразователи обоих типов позволяют подключать одинаковое количество нагрузок, в первом случае параллельно, а во втором — последовательно.

Кроме упомянутых типов выходных сигналов, в системах управления используются диапазоны  $0...20$  мА и  $4...20$  мА. Ненулевое значение выходного сигнала при начальном значении измеряемого параметра в последнем случае позволяет контролировать обрыв линии связи по снижению уровня сигнала ниже допустимого значения, а иногда неинформативную часть выходного сигнала до  $4$  мА используют для передачи питания ИП от внешнего источника.

В цифровом выходном сигнале измерительная информация зашифрована посредством кода. Позиционный сигнал представляет

## ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

собой простейший вид передачи измерительной информации, в котором измеряемый параметр сравнивается с заданным фиксированным значением — пределом (уставкой), а результат преобразования может иметь два значения: “больше” или “меньше”. Сигнал этого вида широко используется для сообщения о различных состояниях объекта или процесса, а также для логической обработки и позиционного регулирования.

Математическое, или графическое, описание функциональной связи между измеряемой  $x$  и выходной  $y$  величинами называется *статической характеристикой*:

$$y = f(x).$$

*Чувствительностью* ИП или датчика называется предел отношения приращений выходной и измеряемой величин:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}.$$

В случае нелинейной статической характеристики чувствительность является функцией измеряемой величины. В случае линейной статической характеристики чувствительность оказывается постоянной величиной. Отношение значения выходной величины к соответствующему значению измеряемой величины называется *коэффициентом преобразования*:

$$k_i = y_i / x_i.$$

У ИП и датчиков с линейной статической характеристикой чувствительность и коэффициент преобразования равны.

Наряду со статической характеристикой и чувствительностью к основным характеристикам преобразователей и датчиков относятся: инерционность; разрешающая способность; мощность или усилие, требуемые от источника измеряемой величины; выходная мощность и значение выходной величины. Инерционность характеризуется отставанием изменений выходной величины от изменений измеряемой величины. Она обуславливает возникновение динамических погрешностей. Разрешающая способность опреде-



ляется наименьшим изменением измеряемой величины, приводящим к изменению выходной величины. Эта характеристика зависит, в основном, от собственных шумов преобразователя или датчика. Мощность или усилие определяют условия согласования преобразователя или датчика с источником измеряемой величины. Выходная мощность и значения выходной величины влияют на структуру датчика. При небольшой выходной мощности или малых значениях выходной величины в датчик может быть введен усилитель.

В зависимости от физической природы измеряемой величины преобразователи и датчики делят на две группы: 1) преобразователи и датчики электрических величин; 2) преобразователи и датчики неэлектрических величин. К первой группе относятся преобразователи и датчики, реагирующие на изменение напряжения, тока, частоты, мощности; ко второй — реагирующие на изменение температуры, давления, крутящего момента, частоты вращения и т.д.

По роду выходной величины преобразователи и датчики делятся на электрические и неэлектрические. В зависимости от характера выходной величины электрические преобразователи и датчики подразделяют на два типа: параметрические и генераторные. Параметрические преобразуют неэлектрические измеряемые величины в параметры электрических цепей:  $L$ ,  $C$ ,  $R$ . Такие преобразователи включаются в различные измерительные схемы, которые имеют дополнительный источник питания. В генераторных преобразователях происходит преобразование измеряемой величины в ЭДС постоянного или переменного тока.

По виду измеряемой величины датчики подразделяют на: датчики перемещения, давления, расхода, температуры, крутящего момента, угла рассогласования и т.д. Преобразование одних и тех же измеряемых величин могут осуществлять датчики, в основе которых могут лежать различные принципы действия.

Одно из главных следствий широкого применения ЭВМ в разнообразных системах управления — резкий рост потребности в дешевых и надежных датчиках.

В современных автоматизированных системах контроля и управления доминирующее значение приобретают микро-ЭВМ. Следовательно, возникла необходимость разработки датчиков, совместимых с микро-ЭВМ по точности, быстродействию, долговечности и другим параметрам. Этим же можно объяснить общую тенденцию конструктивного объединения датчиков с микропроцессорными устройствами для предварительной обработки информации до ее передачи в управляющую или контролирующую ЭВМ.

## 1.2. Датчики температуры

В судовых энергетических установках в датчиках температуры наиболее широкое применение нашли термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические преобразователи.

**Термопреобразователи сопротивления.** Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на явлении изменения электрического сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при изменении их температуры. В термопреобразователях сопротивления используются материалы, обладающие большим и стабильным температурным коэффициентом сопротивления, линейной зависимостью сопротивления от температуры и хорошей воспроизводимостью свойств.

Приборы для измерения температуры, в которых в качестве чувствительных элементов используются термопреобразователи сопротивления, называются *термометрами сопротивления*. В промышленных термометрах сопротивления нашли применение проводниковые термопреобразователи сопротивления. Их изготавливают из чистых металлов: платины, меди, никеля, железа. Наиболее широко применяются платина и медь. Для металлов зависимость сопротивления от температуры имеет нелинейный характер:

$$R = R_0(1 + \alpha\Theta + \beta\Theta^2 + \gamma\Theta^3 + \dots),$$



где  $R_0$  — сопротивление проводника при начальной температуре;  $\Theta$  — перегрев проводника относительно начальной температуры;  $\alpha, \beta, \gamma$  — коэффициенты, зависящие от свойств проводника.

Конкретное выражение для сопротивления термопреобразователя сопротивления зависит от заданного диапазона измерения температуры.

Для платиновых термопреобразователей, работающих в диапазоне от 0 до 600 °С, зависимость сопротивления от температуры определяется выражением

$$R = R_0(1 + \alpha\Theta + \beta\Theta^2),$$

где  $R_0$  — сопротивление при 0 °С.

$$\text{Для чистой платины } \alpha = 3,94 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{^\circ\text{C}}; \beta = -5,8 \cdot 10^{-7}, \frac{1}{(^\circ\text{C})^2}.$$

В диапазоне от 0 до -200 °С зависимость сопротивления платинового термопреобразователя от температуры имеет другой вид:

$$R = R_0[1 + \alpha\Theta + \beta\Theta^2 + \gamma(\Theta - 100)^3],$$

$$\text{где } \gamma = -4 \cdot 10^{-2}, \frac{1}{(^\circ\text{C})^3}.$$

Зависимость от температуры электрического сопротивления медного термопреобразователя, работающего в диапазоне от -50 до 180 °С, имеет линейный характер и выражается уравнением

$$R = R_0(1 + \alpha\Theta),$$

$$\text{где } \alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}, \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Выбор материала для термопреобразователей сопротивления определяется инертностью металла в измеряемой среде в заданном интервале значений температуры. Медные термопреобразователи можно применять до температуры 200 °С в атмосфере, имеющей низкую влажность и свободной от газов, вызывающих коррозию. При более высокой температуре медь окисляется.

Платиновые термопреобразователи используют при измерении температуры в диапазоне от  $-200$  до  $650$  °С. Железо и никель в качестве материала для термопреобразователей применяют редко, в связи с тем, что характеристики этих металлов отличаются нелинейностью и сильно зависят от наличия примесей. Отечественная промышленность выпускает платиновые и медные термометры сопротивления, чувствительный элемент которых выполняется из тонкой проволоки — платиновой (диаметром  $0,07$  мм) или медной (диаметром  $0,01$  мм) соответственно. Чтобы исключить появление индуктивности, провод чувствительного элемента наматывается бифиллярно. Для защиты от воздействия измеряемой среды чувствительные элементы помещают в специальную трубку.

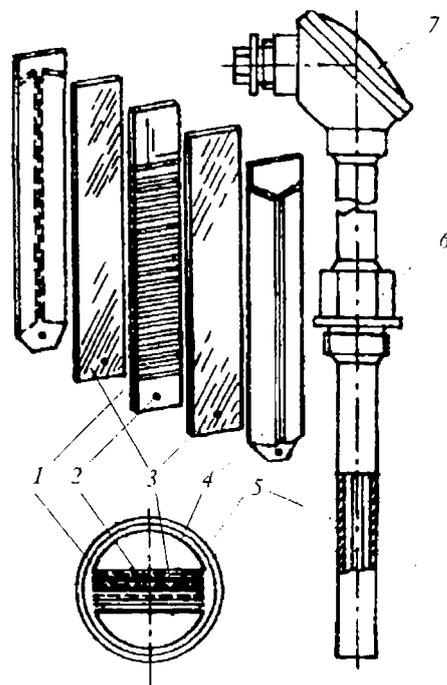


Рис. 1.1. Конструкция термопреобразователя сопротивления

На рис. 1.1 показана одна из возможных конструкций термопреобразователя сопротивления. Платиновая проволока *1* намотана бифиллярно на слюдяной каркас *2*, на котором имеются мелкие зубцы. Для изоляции провод закрывается с обеих сторон слюдяными пластинами *3*. Для улучшения условий теплообмена чувствительного элемента со средой применяют пластинки *4* из фольги, С-образного сечения. Пластинки *2*, *3* и *4* скрепляются и плотно вставляются внутрь кожуха *5*. Выводы выполняют из серебряной ленты или проволоки и выводят в клеммную коробку *7*. При помощи гайки *6* термометр сопротивления крепится к корпусу.



По значению сопротивления при 0 °С платиновые термометры сопротивления выпускаются трех типов: сопротивлением 10, 46 и 100 Ом.

Первый тип используется при измерении температуры от 0 до 650 °С, второй и третий — при измерениях от –200 до 500 °С. Медные термометры сопротивления выпускаются с сопротивлением 53 и 100 Ом и используются для измерения температуры в диапазоне от –50 до 180 °С.

Тонкопленочные платиновые термометры сопротивления (ПТС) состоят из керамической подложки толщиной 0,6 мм, на которую напыляют слой платины толщиной около 2 мкм. С помощью лазерного луча на слое платины выжигается рисунок в виде меандра. К полученному пленочному проводнику приваривают контактные выводы. Для защиты активного платинового проводника от повреждений его покрывают керамическим изоляционным слоем толщиной 10 мкм. Монолитная конструкция тонкопленочного термопреобразователя значительно повышает его надежность. Тонкопленочные ПТС используются при измерениях температуры от 0 до 400 °С.

Из-за тепловой инерции температура чувствительного элемента отличается от температуры контролируемой среды, которая меняется во времени. Тепловая инерция зависит от условий теплообмена между средой и чувствительным элементом. Термометр сопротивления можно считать аperiodическим звеном первого порядка, постоянная времени которого зависит от удельной теплоемкости термометра, его массы и коэффициента теплопередачи.

Постоянная времени термопреобразователя сопротивления зависит от условий охлаждения; ее значение различается для одного и того же преобразователя, находящегося в воздухе и в жидкости. В зависимости от конструкции значение постоянной времени термометров сопротивления колеблется от 10 с до 7 мин. Протекание тока через термопреобразователь может привести к изменению его температуры. Поэтому при проведении измерений ток должен иметь небольшое значение.

Перспективными можно назвать преобразователи сопротивления, изготовленные из полупроводниковых материалов с большим отрицательным температурным коэффициентом, или, как их называют, *термисторы*. К недостаткам термисторов следует отнести: нелинейность зависимости их сопротивления от температуры; значительное отклонение от образца к образцу — как номинального значения сопротивления, нормируемого обычно при 20 °С (более  $\pm 30\%$ ), так и характера зависимости сопротивления от температуры (отклонение значений температурного коэффициента достигает  $\pm 5\%$  и более).

Линеаризацию зависимости сопротивления от температуры удается получить в скорректированных термоэлементах, т.е. в устройствах, представляющих собой комбинацию термисторов с другими резисторами.

Более широкое применения на судах нашли *позисторы*. Одно из основных отличий их от термисторов — знак и значение температурного сопротивления. В отличие от термистора, температурная зависимость сопротивления позистора имеет сложный характер. В датчиках температуры используется участок характеристики, на котором с ростом температуры наблюдается повышение сопротивления позистора.

На судах позисторы используются для защиты асинхронных двигателей от перегрузки.

**Термоэлектрические преобразователи.** Принцип действия термоэлектрических преобразователей основан на использовании следующего термоэлектрического явления. Если соединить между собой два разнородных проводника *A* и *B* (рис. 1.2, *a*), и поддерживать различные значения температуры мест их соединения, то между проводниками возникает термоэлектрическая ЭДС (термо-ЭДС), значение которой зависит от материала проводников и разности температур мест их соединения. Возникновение термо-ЭДС объясняется неодинаковой плотностью свободных электронов в разнородных проводниках. Вследствие этого в месте соединения проводников происходит диффузия электронов из одного

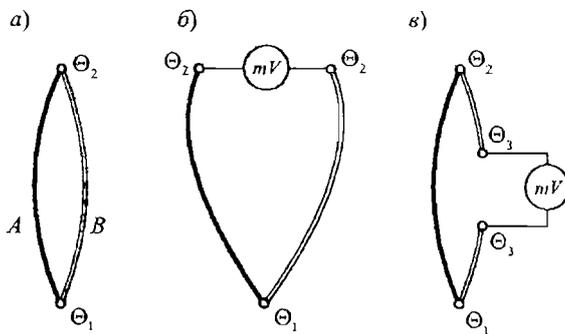


Рис. 1.2. Термоэлектрические цепи

проводника в другой. Проводник с большей плотностью свободных электронов приобретает положительный потенциал (благодаря диффузии некоторой части электронов в другой проводник), а проводник с меньшей плотностью — отрицательный потенциал.

Таким образом, в месте соединения проводников возникает разность потенциалов, значение которой зависит от температуры  $\Theta_1$  места соединения:

$$e_{\Theta_1} = (\varphi_A - \varphi_B)_{\Theta_1}.$$

В другом месте соединения также возникает разность потенциалов, зависящая от температуры  $\Theta_2$  места соединения:

$$e_{\Theta_2} = (\varphi_A - \varphi_B)_{\Theta_2}.$$

Цепь, составленная из двух разнородных проводников, называется *термоэлектрическим преобразователем* или *термопарой*. Место соединения проводников, находящееся под воздействием температуры измеряемой среды, называется *горячим* или *рабочим спаем*. Место соединения проводников, находящееся под воздействием температуры окружающей среды, называется *холодным* или *свободным спаем*. Разнородные проводники *A* и *B*, составляющие термоэлектрический преобразователь, называются *термоэлектродами*.

Для замкнутой цепи, состоящей из двух проводников, термо-ЭДС равна алгебраической сумме разностей потенциалов спаев:

$$E_{AB} = e_{\Theta_1} - e_{\Theta_2}.$$

При одинаковой температуре обоих спаев ( $\Theta_1 = \Theta_2$ ) термо-ЭДС равна нулю, т.к.  $e_{\Theta_1} = e_{\Theta_2}$ . При разных значениях темпе-

ратуры спаев ( $\Theta_1 > \Theta_2$ ) термо-ЭДС не равна нулю, т.к.  $e_{\Theta_1} > e_{\Theta_2}$ . Если температуру холодного спаев поддерживать постоянной, то  $e_{\Theta_2} = \text{const}$ . Поэтому термо-ЭДС термопары будет изменяться в функции температуры горячего спаев:

$$E_{AB} = f(\Theta_1).$$

Для измерения термо-ЭДС электроизмерительные приборы включаются в цепь термопары либо в разрыв холодного спаев (рис. 1.2, б), либо в разрыв одного из электродов (рис. 1.2, в).

В первом случае преобразователь имеет один горячий и два холодных спаев. При постоянстве и равенстве температур холодных спаев термо-ЭДС зависит только от температуры горячего спаев. Во втором случае преобразователь имеет четыре спаев: один горячий, один холодный и два нейтральных. При постоянстве температуры холодного спаев и равенстве температур нейтральных термо-ЭДС зависит только от температуры горячего спаев. Таким образом, введение третьего проводника в цепь термоэлектрического преобразователя не изменяет результирующую термо-ЭДС при условии равенства температур в местах подключения третьего проводника.

В табл. 1.1 (с. 16) приведены условные обозначения термопар согласно международной системе и системе, принятой в СНГ.

На рис. 1.3 показана принципиальная схема датчика температуры с термопреобразователем сопротивления на главном двигателе т/х "Астрахань".

В датчике (рис. 1.3) применена потенциометрическая измерительная схема. Выходной сигнал потенциометрической схе-

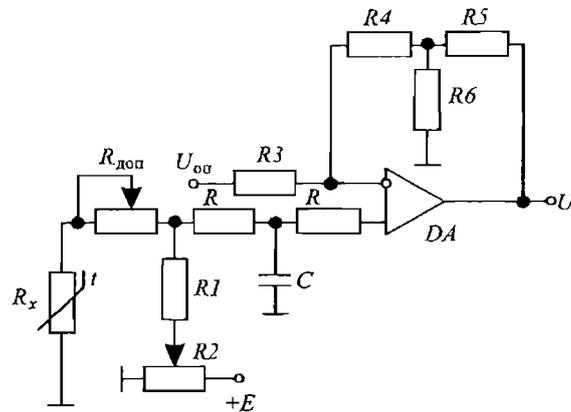


Рис. 1.3. Измерительная схема температуры главного двигателя т/х "Астрахань"



Таблица 1.1. Соответствие условных обозначений термопар

Обозначение типа термопары	
согласно международной системе обозначений	согласно системе, принятой в странах СНГ
<i>K</i>	Хромель-алюмель
<i>S</i>	Платина-Родий(10%)-Платина
<i>R</i>	Платина-Родий(13%)-Платина
<i>B</i>	Платина-Родий-Платина-Родий
<i>J</i>	Железо-Константан
<i>L</i>	Хромель-Капель
<i>E</i>	Хромель-Константан
<i>M</i>	Медь-Капель

мы поступает на инвертирующий вход операционного усилителя  $DA$ , входное сопротивление которого  $R_{вх} \gg R_x$ .

При большом значении внутреннего сопротивления источника питания выходное напряжение датчика температуры изменяется по линейному закону от приращения сопротивления термопреобразователя  $R_x$ .

На рис. 1.4 показана принципиальная схема датчика температуры с термопреобразователем сопротивления на главном двигателе т/х "Смоленск".

В датчике температуры использована мостовая измерительная схема. Условие равновесия моста зависит только от сопротивления его плечей и не зависит от входного сопротивления усилителя и внутреннего сопротивления источника питания.

Уравновешенный мост позволяет исключить постоянную составляющую измеряемого напряжения. Дифференциальный уси-

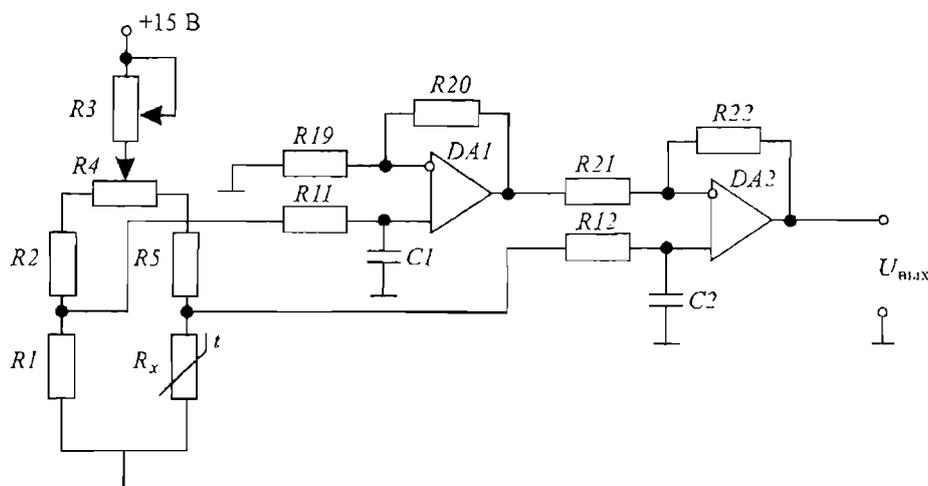


Рис. 1.4. Измерительная схема в САУ температуры главного двигателя т/х "Смоленск"

литель на DA2 позволяет снизить влияние синфазных составляющих выходного напряжения моста.

### 1.3. Датчики частоты вращения

В судовых датчиках частоты вращения нашли применение тахогенераторы постоянного тока и индукционные преобразователи.

**Тахогенераторные датчики частоты вращения.** Тахогенераторы постоянного тока представляют собой генераторы постоянного тока небольшой мощности с электромагнитным (рис. 1.5) или магнито-электрическим возбуждением.

В режиме холостого хода при постоянном магнитном потоке возбуждения  $\Phi_B$  выходное напряжение тахогенератора составляет:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E = c\Phi_B \omega = k\omega,$$

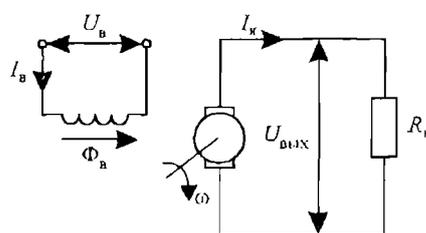


Рис. 1.5. Схема тахогенератора постоянного тока



где  $\omega$  — угловая скорость вала;  $k = c\Phi_B$ .

При подключении нагрузки напряжение уменьшается на величину падения напряжения в цепи якоря.

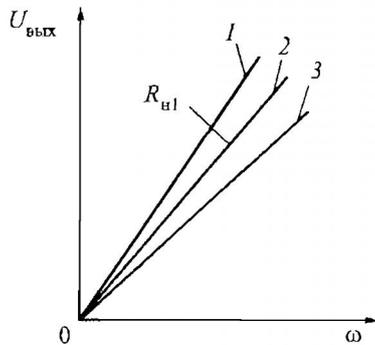


Рис. 1.6. Статические характеристики тахогенератора постоянного тока

Выходное напряжение изменяется по линейному закону в функции частоты вращения. Наклон статической характеристики зависит от сопротивления нагрузки, так, статические нагрузки 2, 3 на рис. 1.6 соответствуют сопротивлениям  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$ . Уменьшение сопротивления нагрузки ( $R_{H2} < R_{H1}$ ) приводит к уменьшению крутизны характеристики. На рис. 1.6 показана также статическая характеристика 1, соответствующая режиму холостого хода ( $R_H = \infty$ ).

Принципиальная схема тахогенераторного датчика частоты вращения представлена на рис. 1.7.

Выходной сигнал тахогенератора  $U_{ТТ}$  поступает на делитель напряжения, состоящий из резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ . Выходной сигнал делителя напряжения снимается с резистора  $R_4$ . Подключение тахогенератора к клеммам 7, 8 или 9 зависит от значения напряжения на его выходе.

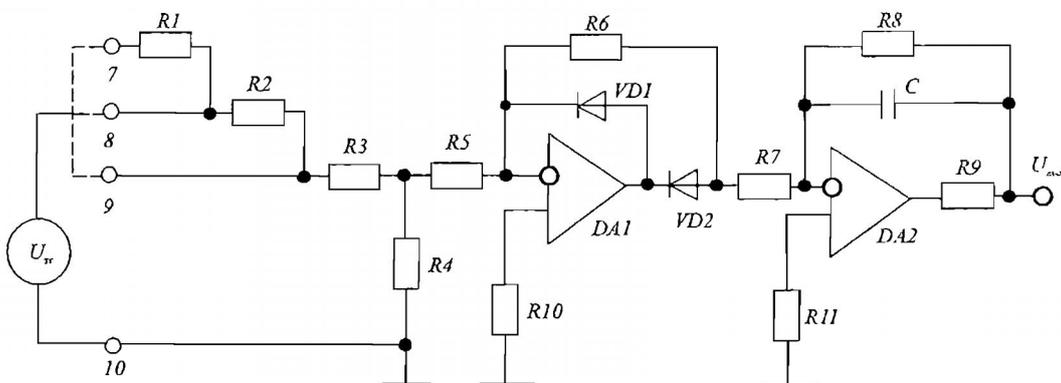
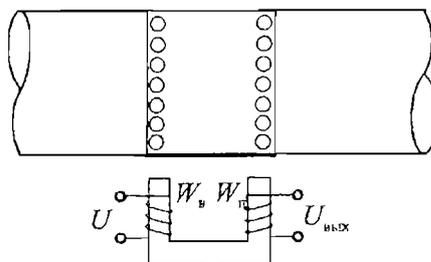


Рис. 1.7. Принципиальная схема тахогенераторного датчика частоты вращения

Напряжение с выхода делителя напряжения поступает на вход однополупериодного выпрямителя на операционном усилителе *DA1*. С выхода этого выпрямителя сигнал подается на вход апериодического звена первого порядка на операционном усилителе *DA2*. Схема на операционном усилителе *DA2* используется в качестве фильтра нижних частот и служит для сглаживания динамических составляющих выходного напряжения тахогенератора. При номинальном значении напряжения тахогенератора выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  датчика частоты вращения равно 10 В.

**Датчики частоты вращения с индукционными преобразователями.** Индукционный преобразователь состоит из П-образного магнитопровода, расположенного неподвижно около вала, и стальной перфорированной ленты, закрепленной на валу (рис. 1.8). Между валом и лентой по всей окружности ходит резиновая лента.

На одном из полюсов магнитопровода установлена обмотка возбуждения, питаемая от источника постоянного тока, на другом — измерительная обмотка. Обмотка возбуждения  $W_{\text{В}}$  служит для создания постоянного магнитного потока; с измерительной обмотки  $W_{\text{И}}$  снимается выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ .



*Рис. 1.8. Индукционный преобразователь датчика частоты вращения*

Между лентой и полюсами есть воздушный зазор. При вращении вала происходит периодическое изменение магнитного сопротивления. Это изменение приводит к изменению магнитного потока обмотки возбуждения. При изменении магнитного потока в измерительной обмотке наводится ЭДС, равная

$$e = -W_{\text{И}} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.1)$$

Частота выходного сигнала определяется из выражения:



$$f = \frac{n \cdot Z}{60}, \quad (1.2)$$

где  $n$  — число оборотов гребного вала в минуту;  $Z$  — количество отверстий в перфорированной ленте.

Из выражения (1.2) понятно, что частота ЭДС преобразователя не зависит от внешних условий, поэтому точность измерения частоты вращения зависит только от точности измерения частоты ЭДС.

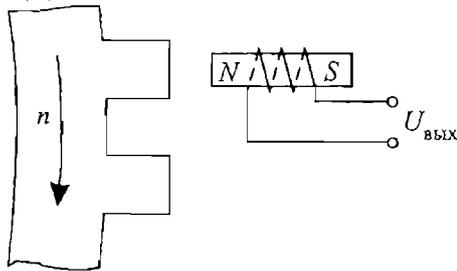


Рис. 1.9. Индукционный преобразователь частоты вращения с постоянным магнитом

Сам преобразователь не вносит погрешности в процесс измерения. В соответствии с выражениями (1.1), (1.2), наряду с частотой ЭДС при изменении частоты вращения происходит изменение и значения ЭДС. При малой частоте вращения ЭДС имеет небольшое значение, поэтому при измерении ее частоты возникают большие погрешности.

В индукционных преобразователях в качестве источника постоянного магнитного потока часто вместо обмотки применяют постоянные магниты, а вместо металлической ленты — выступающие детали вращающихся частей машины (рис. 1.9).

Принципиальная схема датчика частоты вращения приведена на рис. 1.10.

Выходное напряжение индукционного преобразователя (ИП), частота которого изменяется пропорционально частоте вращения

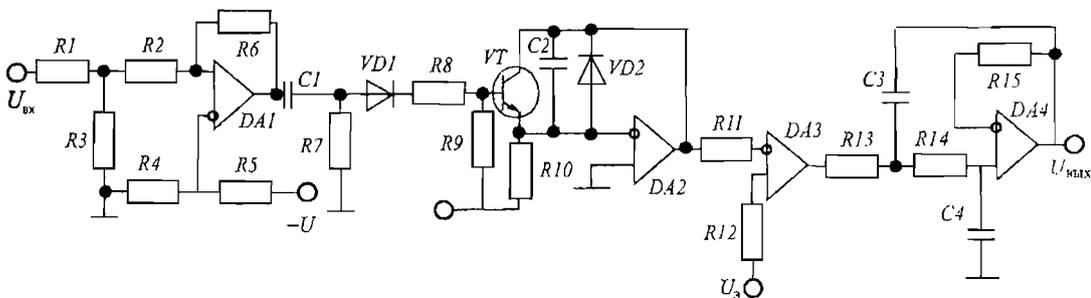


Рис. 1.10. Принципиальная схема датчика частоты вращения с индукционными преобразователями

вала, имеет произвольную форму. Напряжение произвольной формы индукционного преобразователя подается на формирователь импульсов (ФИ).

ФИ представляет собой релейное устройство с положительной обратной связью; у него входной сигнал с ИП подается на неинвертирующий вход операционного усилителя  $DA1$ . Наличие положительной обратной связи приводит к тому, что при изменении знака входного напряжения происходит скачкообразный переход операционного усилителя из одного насыщенного состояния в другое. Знак выходного напряжения совпадает со знаком входного.

ФИ позволяет получить из входного напряжения произвольной формы выходное напряжение прямоугольной формы, с частотой импульсов, пропорциональной частоте вращения вала.

Далее прямоугольные импульсы подаются на дифференцирующее звено, состоящее из конденсатора  $C1$  и резистора  $R7$ , которое преобразует прямоугольные импульсы в кратковременные разнополярные. Подключение диода  $VD1$  обеспечивает прохождение только положительных кратковременных импульсов. Полученные импульсы управляют генератором пилообразного напряжения (Г.И).

Г.И основан на использовании интегрирующего устройства на операционном усилителе  $DA2$  и транзистора  $VT$ . Выходное напряжение Г.И имеет пилообразную форму с постоянным наклоном и частотой, равной частоте выходного сигнала ИП.

Выходной сигнал с Г.И подается на инвертирующий вход операционного усилителя  $DA3$ . На инвертирующий вход  $DA3$  подается эталонное напряжение с постоянным значением  $U_3$ . Схема на  $DA3$  представляет собой ноль-орган.

На выходе нуля-органа появляются импульсы прямоугольной формы с постоянными амплитудой и длительностью, с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Напряжение с нуля-органа поступает на фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка на операционном усилителе  $DA4$ . Выходное напряжение ФНЧ равно среднему значению прямоугольных импульсов нуля-органа,



которое изменяется пропорционально их частоте и, следовательно, частоте вращения вала.

На рис. 1.11 показана принципиальная схема датчика, в котором для получения прямоугольных импульсов с постоянными амплитудой и длительностью применяется ждущий мультивибратор (одновибратор) на операционном усилителе  $DA2$ .

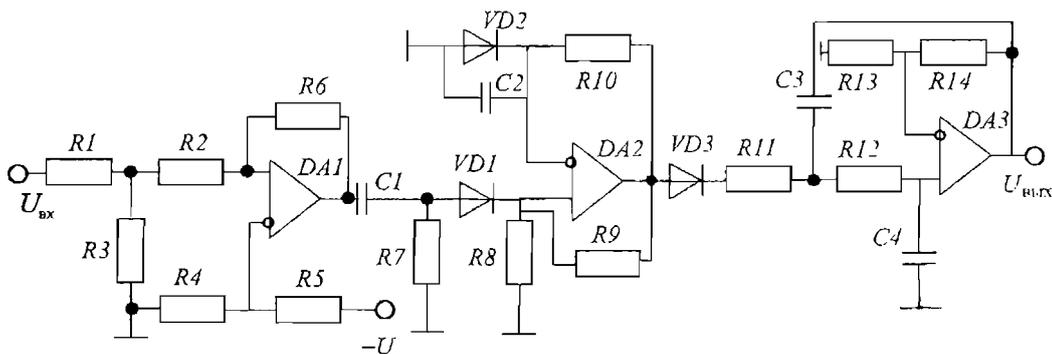


Рис. 1.11. Принципиальная схема датчика частоты вращения со ждущим мультивибратором

Время импульса  $t$  определяется постоянной времени  $C2 \cdot R10$  и отношением  $R9/R8$ . Если  $R9/R8 = 10$ ,  $t \approx 0,1(C2 \cdot R10)$ .

Датчик частоты вращения, служащий также для определения направления вращения вала, состоит из двух индукционных преобразователей, смещенных один относительно другого по окружности вала на определенный угол. После предварительной обработки с выхода каждого преобразователя можно получить непрерывную последовательность импульсов. В зависимости от направления вращения вала одна из последовательностей импульсов опережает другую.

Реверс вала приводит к изменению чередования последовательностей импульсов, которое определяется логической схемой.

## 1.4. Датчики давления

Датчики давления обычно состоят из двух измерительных преобразователей. Один из них — первый — служит для преобразования давления в механический параметр (перемещение, дефор-

мацию, силу, механическое напряжение). Второй преобразователь предназначен для преобразования механического параметра в электрический (изменение сопротивления, индуктивности, емкости, ЭДС, заряда).

В качестве первого типа преобразователей используют упругие чувствительные элементы: мембраны, мембранные коробки, сильфоны, трубки Бурдона и др.

В качестве второго типа применяют потенциметрические, индуктивные, трансформаторные, емкостные, тензорезисторные, магнитоупругие и пьезоэлектрические преобразователи.

В датчике давления с *потенциметрическим* преобразователем (рис. 1.12) под действием давления происходит перемещение мембранной коробки 1, которое при помощи штока 2 приводит к перемещению движка потенциметрического преобразователя 3.

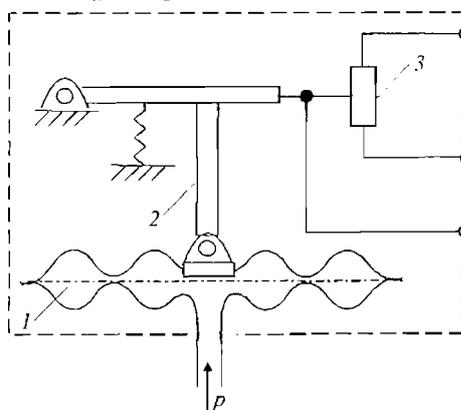


Рис. 1.12. Датчик давления с потенциметрическим преобразователем

Датчик давления с *индуктивным* преобразователем (рис. 1.13) состоит из мембранного чувствительного элемента 3, к которому прикреплен якорь 5 индуктивного преобразователя 4. Контролируемое давление, поступающее по трубке 1 в полость 2, вызывает перемещение мембраны вместе с якорем, что приводит к изменению индуктивности преобразователя.

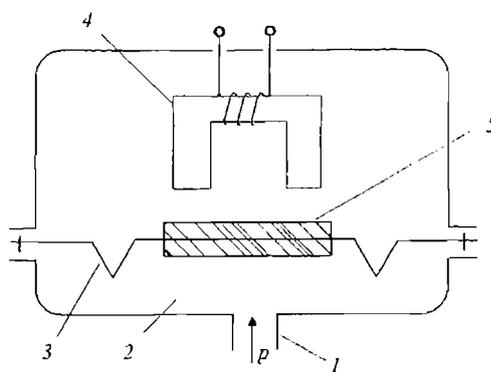


Рис. 1.13. Датчик давления с индуктивным преобразователем

В датчике давления с *дифференциально-трансформаторным* преобразователем (рис.

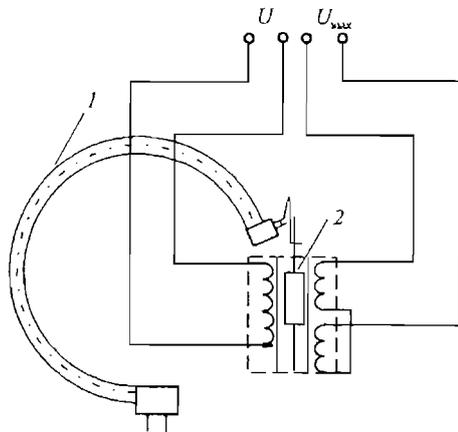


Рис. 1.14. Датчик давления с дифференциально-трансформаторным преобразователем

1.14) к свободному концу трубки Бурдона 1 прикреплен якорь 2 преобразователя. При изменении контролируемого давления происходит перемещение якоря, которое приводит к изменению выходного напряжения.

В датчике давления с **емкостным** преобразователем (рис. 1.15) контролируемое давление, поступающее по трубке 3, приводит к перемещению мембраны 2. Мембрана и электрод 1 представляют собой обкладки емкостного преобразователя.

Перемещение мембраны под действием давления вызывает изменение расстояния между обкладками преобразователя, что приводит к изменению его емкости.

Датчики давления с **тензорезисторным** преобразователем предназначены для измерения динамических давлений. Тензорезисторы могут быть проводниковыми и полупроводниковыми; проводниковые, в свою очередь, подразделяют на проволочные и фольговые (о них будет рассказано ниже).

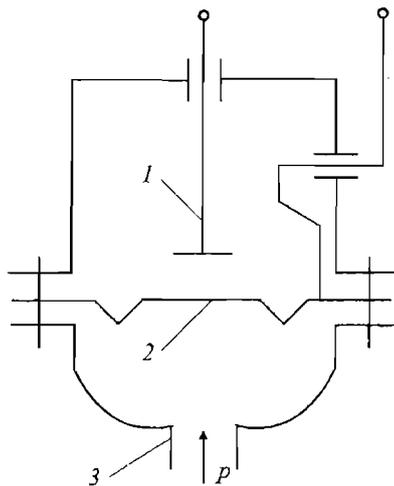


Рис. 1.15. Датчик давления с емкостным преобразователем

Тензорезисторы могут быть проводниковыми и полупроводниковыми; проводниковые, в свою очередь, подразделяют на проволочные и фольговые (о них будет рассказано ниже).

В качестве примера может служить датчик давления с тензорезисторным преобразователем GT-30, разработанный фирмой AUTRONICA и служащий для измерения давления топлива у форсунки. Обычно этот датчик используется только при индицировании двигателя. Диапазон измерений составляет  $0...10^2$  МПа. Рабочая температура

ратура 0...150 °С. Аналогичный датчик давления GT-20 предназначен для измерения давления в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания. Он устанавливается на индикаторный кран. Диапазон измерения составляет 0...16 МПа. Рабочая температура 0...300 °С.

Для обработки сигнала с тензорезисторным преобразованием применяется усилитель СЕ-11, входящий в состав датчика давления, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.16.

Тензорезисторный преобразователь  $R_T$  включен в мостовую схему с резисторами  $R1—R4$ . Потенциометр  $R3$  служит для балансировки мостовой схемы.

Схема на операционном усилителе (ОУ)  $DA1$  представляет собой дифференциальный усилитель, на неинвертирующий вход которого подается постоянное напряжение, определяемое потенциометром  $R3$ . На инвертирующий вход  $DA1$  подаются два напряжения: одно из них определяется тензорезистором  $R_T$ , второе — поступает с повторителя напряжения на ОУ  $DA3$ .

Выходной сигнал с  $DA1$  подается на неинвертирующий усилитель  $DA2$ , выходной сигнал которого, в зависимости от измеряемого давления, изменяется в диапазоне 0...5 В. При отсутствии давления выходной сигнал при помощи потенциометра  $R3$  делается равным 1 В.

Конденсатор  $C1$  и компаратор на ОУ  $DA4$  служат для выделения составляющей выходного сигнала, соответствующей динамическому давлению. Операционные усилители  $DA5$ ,  $DA6$  и транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$  служат для преобразования выходного напряжения в токовый сигнал, который изменяется в диапазоне 1...5 мА.

Оба выхода — по напряжению и по току — могут нагружаться одновременно.

Необходимо рассмотреть более подробно принцип действия тензорезисторных преобразователей. Принцип действия тензорезисторного преобразователя основан на явлении тензоэффекта. Этот эффект заключается в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

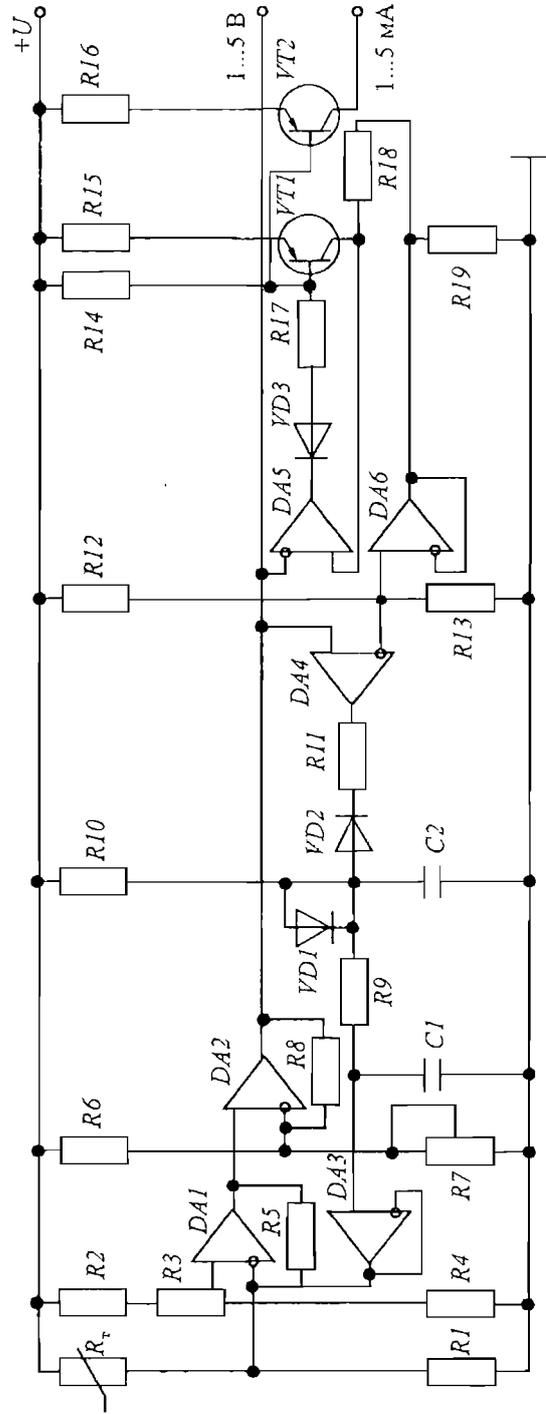


Рис. 1.16. Датчик давления с тензорезисторным преобразователем

В судовых системах применяются, в основном, проводниковые тензорезисторы. Под воздействием внешней силы происходит деформация проводников: как в направлении действия силы, так и в перпендикулярном ей направлении.

Активное сопротивление проводника при его неизменной температуре определяется из следующего выражения:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала проводника;  $S$  — площадь поперечного сечения;  $l$  — длина проводника.

Изменение сопротивления проводника под воздействием внешней силы обусловлено изменением его длины и поперечного сечения, а также изменением удельного сопротивления материала проводника.

Тензоэффект различных материалов характеризуется *коэффициентом тензочувствительности*, который можно выразить как

$$k_T = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l},$$

где  $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R}$  — относительное изменение сопротивления проводника;  $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$  — относительное изменение длины проводника.

Значение коэффициента тензочувствительности для металлов, применяемых в тензорезисторах, близко к 2.

Статическая характеристика проволочных тензорезисторов определяется выражением:

$$\Delta R = k_T R \varepsilon_l = k_T \frac{\rho}{S} \Delta l.$$

Для увеличения чувствительности тензорезисторов для изготовления их выбирают материалы с высоким коэффициентом тензочувствительности, большим удельным сопротивлением; кроме



того, их делают с малым поперечным сечением. Наиболее широкое применение в тензорезисторах нашел константан. Этот материал имеет незначительный температурный коэффициент сопротивления, что уменьшает погрешность, вызываемую колебаниями температуры. В тензорезисторах, изготовленных из константана, в широком диапазоне температур сохраняется линейная зависимость между относительной деформацией и изменением сопротивления.

Для работы при повышенных температурах рекомендуется использовать тензорезисторы из нихрома.

Как было упомянуто выше, проводниковые тензорезисторы подразделяют на проволочные и фольговые. Конструктивное исполнение обоих типов может быть различным.

В общем случае *проволочный* тензорезистор (рис. 1.17, а) представляет собой тонкую тензочувствительную проволоку, уложенную зигзагообразно между двумя электроизоляционными подложками. К концам проволоки присоединяются выводные концы. Для изготовления тензорезисторов применяют проволоку диаметром 0,01...0,05 мм. Электроизоляционные подложки выполняют из папиросной бумаги, лаковой пленки или цемента, скрепляемых клеем или лаком. Зигзагообразную часть тензорезистора называют решеткой, а его продольный размер — базой. Проволочные

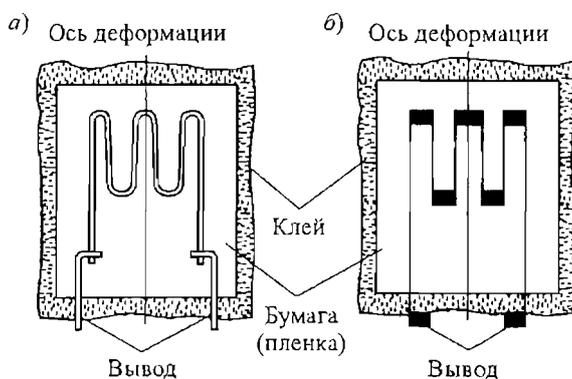


Рис. 1.17. Схемы тензорезисторов: а — проволочный; б — фольговый

тензорезисторы обладают сопротивлением 10...1000 Ом и имеют размеры 2...100 мм.

*Фольговые* тензорезисторы (рис. 1.17, б) в принципе аналогичны проволочным. Решетка выполняется из фольги толщиной 0,004...0,012 мм. Эта решетка закрепляется между пленками из

лака. Фотохимический способ изготовления таких тензорезисторов позволяет создать любой рисунок решетки, что является существенным преимуществом фольговых тензорезисторов. Максимальный ток через тензорезистор ограничивается допустимой мощностью, которая зависит от площади охлаждающей поверхности.

По сравнению с проволочными фольговые тензорезисторы имеют большую площадь поперечного сечения проводника при одинаковых размерах резистора, поэтому они могут пропускать больший ток. Максимальная сила тока в проводниковых тензорезисторах достигает нескольких десятков миллиампер.

В датчиках давления с тензорезисторными преобразователями тензорезисторы наклеиваются на упругие чувствительные элементы в виде колпачков и полусфер. Под действием приложенного давления происходит деформация упругого элемента, которая приводит к изменению сопротивления тензорезистора. Для измерения деформации тензорезистор наклеивается на поверхность контролируемой части механизма таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с направлением измеряемой деформации.

Прикрепленный к контролируемому объекту, тензорезистор является датчиком деформации. Свойства такого датчика зависят не только от самого тензорезистора, но и от качества его закрепления, которое обычно осуществляют приклеиванием с использованием органических веществ (которые отверждаются вследствие полимеризации).

Приклеивание тензорезисторов приводит к тому, что тензорезисторные датчики представляют собой датчики разового действия, т.е. могут быть использованы только один раз и не подлежат демонтажу и повторной установке. Градуировка неприклеенного тензорезистора практически невозможна. По этой причине обычно градуируют несколько тензорезисторов из одной партии, приклеивая их на специальную тарировочную балку; другим тензорезисторам той же партии присваивают усредненные характеристики, полученные на нескольких образцах.



На современных судах широко применяются *магнитоупругие* и *пьезоэлектрические* преобразователи — в автоматических системах измерения давления главных двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

В состав автоматической системы измерения давления с *магнитоупругими* преобразователями входят: датчики давления с магнитоанизотропными преобразователями; индукционные преобразователи частоты вращения; схема обработки выходных сигналов; микро-ЭВМ (рис. 1.18). Датчики давления устанавливаются постоянно на индикаторных кранах цилиндров ДВС. Выходные сигналы датчиков подаются на усилители *У*, с которых сигналы поступают на мультиплексор *MUX*. В зависимости от команды, поступающей от микро-ЭВМ, мультиплексор подключает выходной сигнал выбранного датчика давления к микро-ЭВМ (см. рис. 1.18).

Автоматическая система измерения давления CYLDET-MIP с магнитоанизотропным преобразователем (МАП) разработана фирмой ASEA.

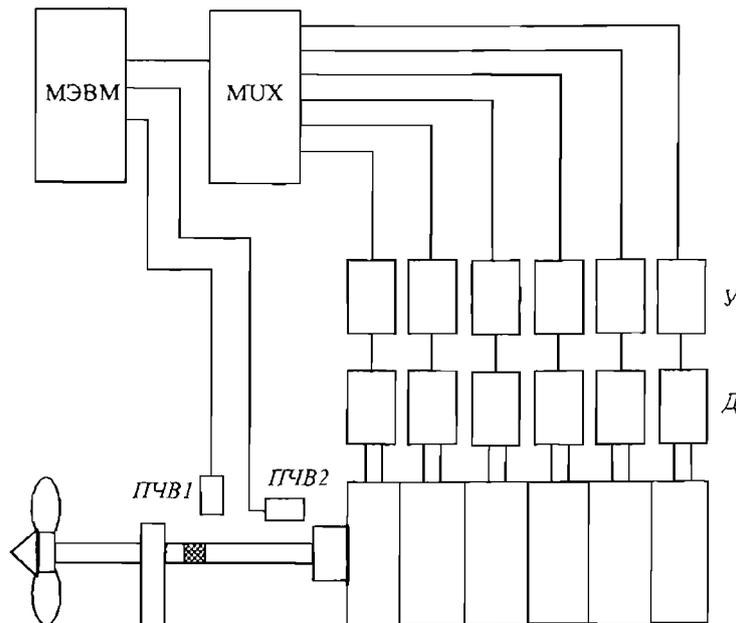


Рис. 1.18. Система автоматического измерения давления с магнитоупругими преобразователями

МАП представляет собой разновидность магнитоупругих преобразователей, в которых используется магнитоупругий эффект. Этот эффект заключается в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием упругих механических напряжений.

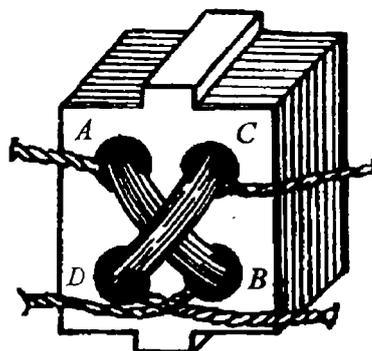


Рис. 1.19. Магнитоанизотропный преобразователь

На рис. 1.19 представлена конструкция магнитоанизотропного преобразователя.

Магнитопровод преобразователя представляет собой пакет, набранный из пластин трансформаторного железа. На диагоналях пакета симметрично расположены четыре отверстия. В каждой паре отверстий *A*, *B* и *C*, *D* находится обмотка. Обмотки расположены взаимно перпендикулярно. В одну из них (обмотку возбуждения) подается питание из сети переменного тока. Со второй обмотки (измерительной) снимается выходной сигнал. Обмотка возбуждения создает переменное электромагнитное поле.

При отсутствии внешнего усилия *P* магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, не пересекает витки измерительной обмотки, поэтому выходной сигнал равен нулю. При наличии внешнего усилия *P*, вследствие изменения магнитных свойств магнитопровода преобразователя, часть магнитного потока пересекает витки измерительной обмотки, что вызывает появление выходного сигнала, представляющего собой напряжение переменного тока.

На рис. 1.20 показан датчик давления с магнитоанизотропным преобразователем.

Контролируемое давление по индикаторному крану поступает во внутреннюю полость 3 датчика давления и воздействует на мембрану 2, которая сжимает магнитопровод магнитоанизотропного преобразователя 1. Сжатие магнитопровода приводит к изменению выходного напряжения преобразователя. Такой датчик дав-

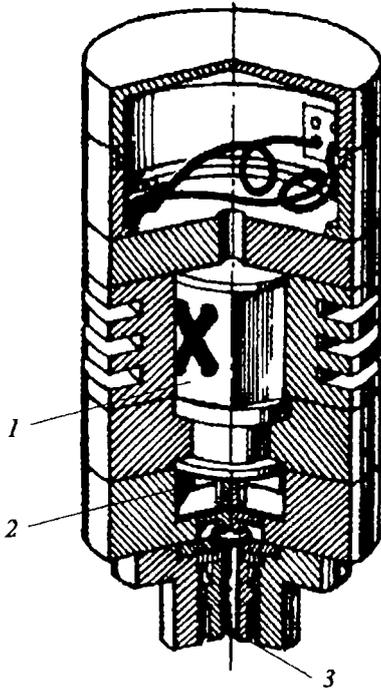


Рис. 1.20. Датчик давления с магнитоанізотропным преобразователем

ления предназначен для измерения давления до 30 МПа. Выходное напряжение магнитоупругого преобразователя изменяется пропорционально давлению в цилиндре — от 0 до 100 мВ при изменении давления от 0 до 30 МПа.

Для индикации зависимости давления от времени (рис. 1.21) выходное напряжение подается на осциллограф.

Происходит преобразование временной зависимости  $p = p(t)$  в индикаторную диаграмму, представляющую собой зависимость давления в цилиндре от хода поршня  $p = p(h)$ , где  $h$  — ход поршня. Это осуществляется при помощи микро-ЭВМ на основе информации, поступающей с индукционных преобразователей частоты ПЧВ1 и ПЧВ2 (см. рис. 1.18).

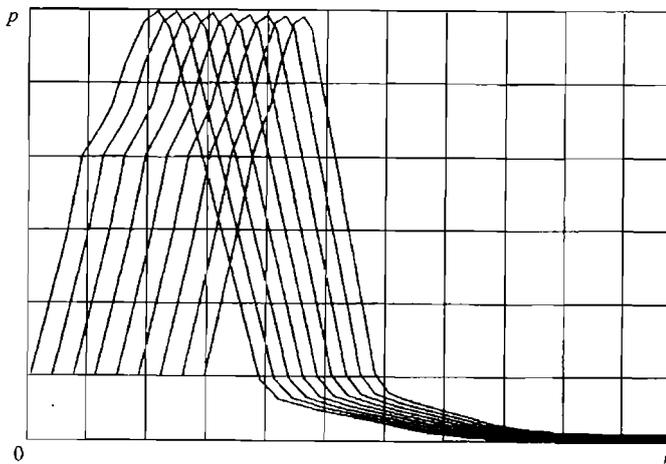


Рис. 1.21. Кривые давления в цилиндре ДВС

Преобразователь ПЧВ1 состоит из перфорированной ленты, установленной на валу, и полюсов. Посредством ПЧВ1 отмечают положение вала.

Преобразователь ПЧВ2 состоит из полюсов, установленных около маховика. За один оборот маховика с ПЧВ2

поступает сигнал, отмечающий прохождение поршнем первого цилиндра верхней мертвой точки.

При использовании подобной системы можно определять следующие параметры ДВС: среднее индикаторное давление; максимальное давление; индикаторную мощность; частоту вращения вала; давление продувочного воздуха; давление сжатия; давление расширения; соответствующее углу  $36^\circ$  после верхней мертвой точки; угол, соответствующий максимальному давлению относительно верхней мертвой точки.

Автоматическая система измерения давления с пьезоэлектрическим преобразователем состоит из пьезоэлектрического преобразователя давления (ПЭП), индукционного преобразователя частоты вращения ПЧВ, усилителей У1, У2 и ЭВМ (рис. 1.22).

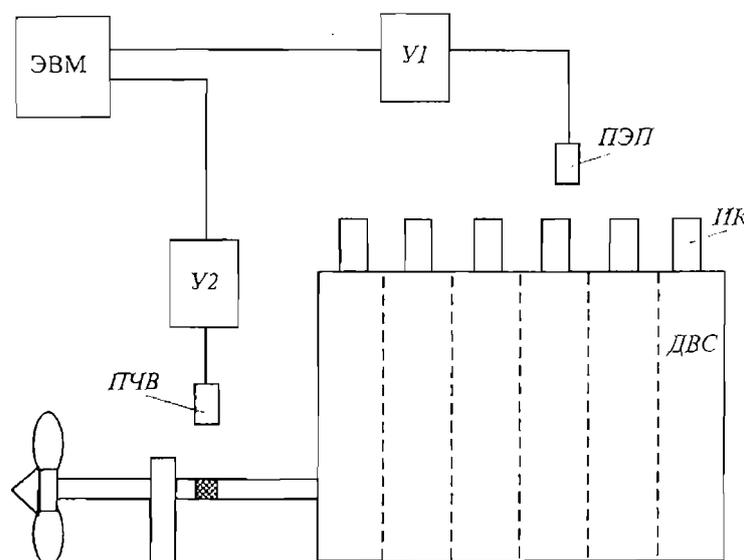


Рис. 1.22. Система автоматического измерения давления с пьезоэлектрическим преобразователем

При измерении давления пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) устанавливается на индикаторный кран (ИК) соответствующего цилиндра ДВС. Во время работы ПЭП предусмотрено его охлаждение сжатым воздухом. Сигнал от ПЭП поступает на уси-



литель, выходное напряжение которого изменяется пропорционально давлению в цилиндре — от 0 до 7,5 В при изменении давления от 0 до 15 МПа.

Преобразование временной зависимости  $p = p(t)$  в зависимость  $p = p(h)$  осуществляется с помощью ЭВМ на основе информации, поступающей от индукционного преобразователя частоты вращения (ПЧВ).

Преобразователь (ПЧВ) состоит из ленты с зубцами и полюсов, устанавливаемых с зазором 0,5 мм относительно зубцов. Лента крепится на валу и имеет 30 зубцов, посредством которых отмечается положение вала через каждые  $12^\circ$ . Один из зубцов имеет специальную, отличающуюся от других форму и отмечает прохождение поршнем первого цилиндра верхней мертвой точки. Для индикации кривой  $p(t)$  в системе предусмотрен осциллограф.

Рассмотренная система позволяет определять такие же параметры ДВС, как и система с магнитоупругими преобразователями. Такая автоматическая система измерения давления разработана фирмой AUTRONICS.

Необходимо остановиться более подробно на принципе действия пьезоэлектрических преобразователей. Они основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта (*пьезоэффекта*), который характерен для некоторых кристаллов.

Различают пьезоэффекты прямой и обратный. Прямой заключается в том, что под действием механических напряжений на гранях кристалла возникают электрические заряды. Обратный пьезоэффект состоит в том, что под действием электрического поля происходит изменение геометрических размеров кристалла. На использовании прямого пьезоэффекта основаны преобразователи усилий, давлений, ускорений. Явление обратного пьезоэффекта нашло применение в ультразвуковых генераторах, вибраторах и т.д.

Наиболее сильно пьезоэффект проявляется у кварца, турмалина, а также у сегнетоэлектриков: сегнетовой соли, титаната бария и др.

На рис. 1.23 изображен кристалл кварца с соответствующими осями симметрии:  $z$  — главная или оптическая ось;  $x$  — электрическая ось;  $y$  — механическая или нейтральная ось.

Пьезочувствительный элемент (рис. 1.24) вырезают из кристалла кварца. Он имеет форму параллелепипеда, грани которого ориентированы относительно осей кристалла соответствующим образом.

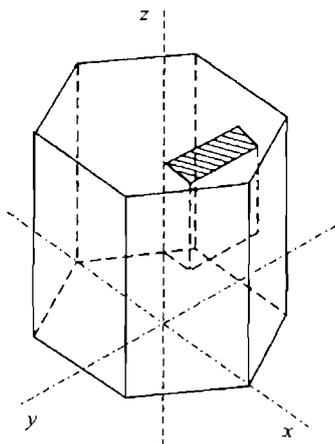


Рис. 1.23. Кристалл кварца

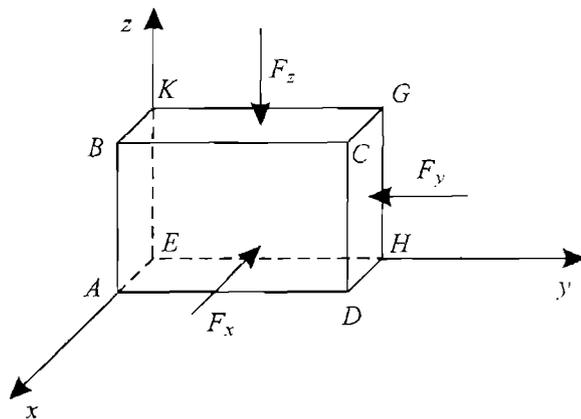


Рис. 1.24. Пьезочувствительный элемент

При действии силы  $F_x$  вдоль электрической оси  $x$  на гранях  $ABCD$  и  $EFGH$ , перпендикулярных оси  $x$ , возникают разнополярные электрические заряды (см. рис. 1.24). Величина таких зарядов  $q_x$  не зависит от геометрических размеров пьезочувствительного элемента и определяется следующим соотношением:

$$q_x = k_{\text{п}} F_x,$$

где  $k_{\text{п}}$  — пьезомодуль материала.

Пьезомодуль характеризует чувствительность пьезоэлектрического материала и определяет величину электрического заряда, возникающего при приложении определенной силы. Изменение знака приложенной силы  $F_x$  приводит к изменению знака зарядов. Такой эффект называется продольным пьезоэффектом.



При действии силы  $F_y$ , направленной вдоль оси  $y$ , на тех же гранях возникают также разнополярные заряды  $q_y$ , величина которых зависит от приложенной силы и геометрических размеров граней. Эта зависимость выражается следующим образом:

$$q_y = -k_{\text{п}} \frac{S_x}{S_y} F_y,$$

где  $S_x, S_y$  — площадь граней, перпендикулярных осям  $x, y$ .

Это явление известно как поперечный пьезоэффект. При поперечном пьезоэффекте знак зарядов противоположен знаку зарядов, возникающих при продольном пьезоэффекте под воздействием сил того же направления.

При действии силы  $F_z$  вдоль оси  $z$  пьезоэффект не наблюдается.

При сжатии датчика вдоль оси  $y$  тонкая кристаллическая пластина легко изгибается, поэтому явление поперечного пьезоэффекта крайне редко применяется в датчиках давления и высокочувствительных датчиках усилий. Следует также отметить, что для измерения зарядов требуется усилитель с большим входным сопротивлением.

## 1.5. Датчики угла рассогласования

В судовых системах автоматического управления в качестве датчиков угла рассогласования используются, в основном, сельсины и поворотные трансформаторы.

### Сельсины

**Принцип действия, классификация, устройство.** Сельсинами называются электрические машины переменного тока, обладающие способностью к самосинхронизации. Сельсины имеют две обмотки: возбуждения и синхронизации.

В зависимости от количества фаз обмотки возбуждения различают сельсины трех- и однофазные. В судовых автоматических

## ДАТЧИКИ УГЛА РАССОГЛАСОВАНИЯ

системах контроля и регулирования нашли применение однофазные сельсины.

Обмотка синхронизации выполняется по типу трехфазных обмоток, фазы которых сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$  относительно друг друга и соединены между собой в звезду. Разомкнутые точки фаз обмотки будут называться началами, а замкнутые — концами обмотки.

Однофазные сельсины по конструкции подразделяют на контактные и бесконтактные.

У *контактных* сельсинов обмотка возбуждения (ОВ) выполняется сосредоточенной и располагается на полюсах статора (рис. 1.25, а) или ротора (рис. 1.25, б).

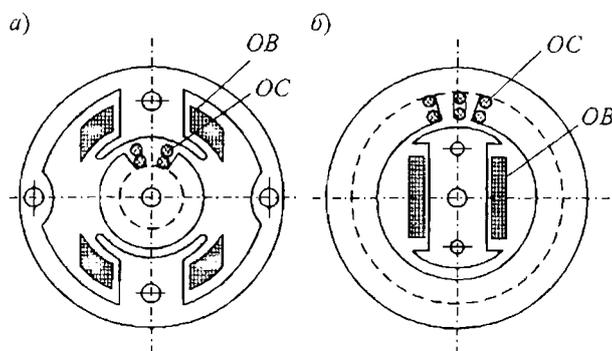


Рис. 1.25. Контактные сельсины: а — с обмоткой возбуждения на статоре; б — с обмоткой возбуждения на роторе

Трехфазная обмотка синхронизации б расположена в пазах статора 4. Однофазная обмотка возбуждения состоит из двух кольцеобразных катушек 2, охватывающих ротор 5. Катушки расположены между статором 4 и кольцевыми сердечниками 1, к которым примыкают стержни внешнего магнитопровода 3. Катушки 2 соединяются между собой последовательно. Статор 4, кольцевые сердечники и стержни внешнего магнитопровода набираются из лис-

Обмотка синхронизации (ОС) контактного сельсина выполняется распределенной и, в зависимости от расположения обмотки возбуждения, размещается на роторе или статоре.

*Бесконтактный* сельсин имеет также две обмотки: возбуждения и синхронизации. На рис. 1.26 показана магнитная цепь бесконтактного сельсина.

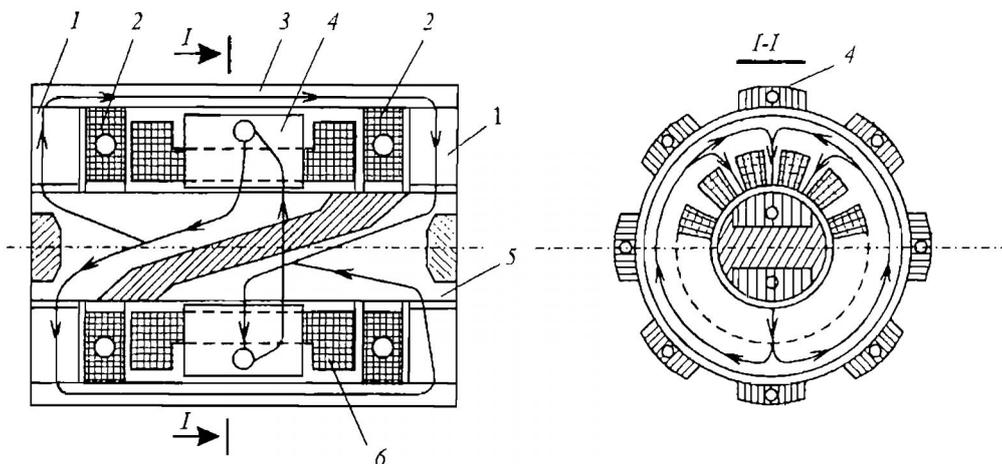


Рис. 1.26. Бесконтактный сельсин

товой электротехнической стали. Ротор 5 состоит из двух пакетов, набранных из листовой электротехнической стали и разделенных между собой немагнитным промежутком.

**Режимы работы.** В автоматических системах сельсины обычно используются в паре: сельсин-датчик (СД) и сельсин-приемник (СП). Различают два основных режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный. Для обоих режимов применяют следующие схемы включения: парную (СД—СП) и многократную (СД—несколько СП).

Однофазные сельсины в обоих режимах работы могут использоваться как в качестве СД, так и в качестве СПР; однако с учетом специфических требований выпускаемые сельсины предназначены для работы в качестве только одного из вариантов.

В судовых автоматических системах регулирования иногда встречается и одиночный режим работы.

*Индикаторный режим.* Этот режим работы сельсинов используется для дистанционной передачи угловых перемещений при незначительной величине момента сопротивления. В судовых автоматических системах контроля индикаторный режим применяется в машинных телеграфах, указателях положения пера руля, указателях направления вращения и нагрузки главных судовых

дизелей, репитерах гирокомпаса. На рис. 1.27 показана простейшая схема включения сельсинов в индикаторном режиме.

Схема состоит из двух одинаковых сельсинов (приемника и датчика) и линии связи. Обмотки возбуждения приемника и датчика подключены к сети переменного тока, а обмотки синхронизации соединены между собой линией связи.

При протекании переменного тока в обмотках возбуждения *СД* и *СП* в них создается переменный магнитный поток  $\Phi_v$ , который наводит ЭДС взаимной индукции в обмотках синхронизации сельсинов. При равенстве углов поворота роторов *СД* ( $\alpha_d$ ) и *СП* ( $\alpha_p$ ) ЭДС в их обмотках синхронизации уравновешивают одна другую, и токи в линиях связи не протекают.

При наличии рассогласования роторов *СД* и *СП* ( $\alpha_d \neq \alpha_p$ ) в линиях связи возникают уравнительные токи. Эти токи проходят по фазам обмоток синхронизации сельсинов и создают результирующие магнитодвижущие силы (МДС) и, следовательно, магнитные потоки. Взаимодействуя с потоками обмоток возбуждения, эти магнитные потоки вызывают появление вращающихся моментов, называемых синхронизирующими. Синхронизирующие моменты в *СД* и *СП* направлены в разные стороны, что связано с различными направлениями уравнительных токов в одноименных фазах *СД* и *СП*. Если в фазе обмотки синхронизации *СД* ток протекает от начала к концу, то в тот же момент времени в фазе *СП* — от конца к началу.

Синхронизирующий момент *СД* стремится повернуть ротор *СД* в исходное положение, а синхронизирующий момент *СП* стремится повернуть ротор *СП* в сторону поворота ротора *СД*. Ротор *СД*

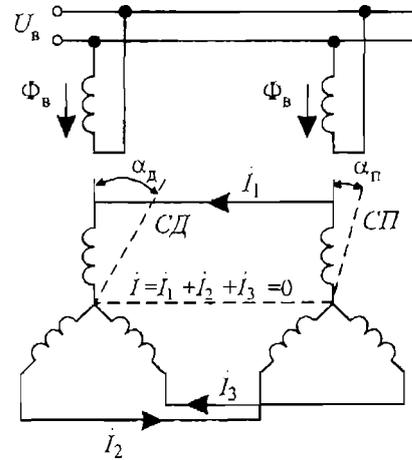


Рис. 1.27. Схема включения однофазных сельсинов в индикаторном режиме



связан с задающей осью и после поворота остается в фиксированном положении. Поэтому под действием синхронизирующего момента будет поворачиваться ротор *СП* — до тех пор, пока не придет в согласованное положение с ротором *СД*.

*Трансформаторный режим.* Этот режим работы сельсинов применяется для дистанционной передачи угловых перемещений при значительном моменте сопротивления.

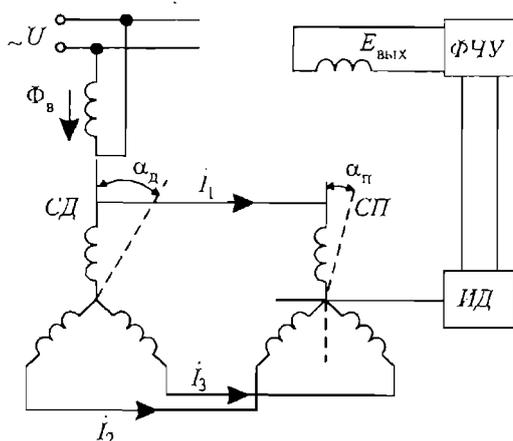


Рис. 1.28. Схема следящей системы с однофазными сельсинами в трансформаторном режиме

На рис. 1.28 представлена схема следящей автоматической системы с сельсинами, работающими в трансформаторном режиме.

Система состоит из сельсина-датчика (*СД*) и сельсина-приемника (*СП*), фазочувствительного усилителя (*ФЧУ*) и исполнительного двигателя (*ИД*), вал которого механически соединен с ротором *СП*. В трансформаторном режиме обмотка возбуждения датчика питается от сети переменного тока. Обмотки синхронизации приемника и датчика соединены линией связи.

Обмотки возбуждения *СП* снимается выходной сигнал — ЭДС переменного тока, которая зависит от угла рассогласования ( $\theta = \alpha_d - \alpha_p$ ). Обмотка возбуждения *СП* является выходной обмоткой пары сельсинов. Под действием переменного магнитного потока в фазах обмотки синхронизации *СД* наводится ЭДС взаимной индукции. Обмотка синхронизации *СП* представляет собой симметричную пассивную нагрузку для обмотки синхронизации *СД*. Под действием ЭДС в фазах обмоток синхронизации сельсинов будут протекать токи. В отличие от индикаторного, в трансформаторном режиме по обмоткам синхронизации *СД* и *СП* токи протекают всегда.

Результирующая МДС обмотки синхронизации *СП* представляет собой пространственный вектор постоянной величины, который поворачивается в пространстве на угол, равный углу рассогласования.

Обычно в автоматических системах регулирования согласованным положением сельсинов в трансформаторном режиме считают также положение, при котором ротор или статор *СП* смещен на  $90^\circ$  относительно ротора или статора *СД*. В этом случае в выходной обмотке *СП* наводится ЭДС, изменяющаяся по синусоидальному закону:

$$E_{\text{вых}} = E_{\text{вых}m} \sin \theta.$$

Выходное напряжение подается на фазочувствительный усилитель *ФЧУ* (см. рис. 1.28). Знак напряжения, снимаемого с выхода *ФЧУ*, зависит от фазы выходного напряжения сельсинной пары. Напряжение с *ФЧУ* поступает на исполнительный двигатель *ИД*. Исполнительный двигатель, воздействуя на объект регулирования, поворачивая его, одновременно поворачивает ротор *СП* в соответствующую сторону. После поворота *СП* на угол  $\alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{д}}$  результирующий вектор магнитного потока обмотки синхронизации окажется перпендикулярным оси выходной обмотки *СП*, и выходное напряжение станет равным нулю.

По аналогичному принципу построены следящие автоматические системы управления судовых рулевых электроприводов.

### Поворотные трансформаторы

**Принцип действия, классификация, устройство.** Поворотными трансформаторами (ПТ) называются микромашины переменного тока, служащие для преобразования угла поворота ротора  $\alpha$  в напряжение, пропорциональное некоторым функциям угла или самому углу.

В зависимости от закона изменения выходного напряжения ПТ подразделяют на два типа:



*синусно-косинусные*: позволяют получить два выходных напряжения, одно из которых изменяется пропорционально синусу угла поворота ротора, а второе — косинусу этого угла;

*линейные*: у них в определенном диапазоне изменения угла поворота ротора выходное напряжение изменяется по закону, близкому к линейному.

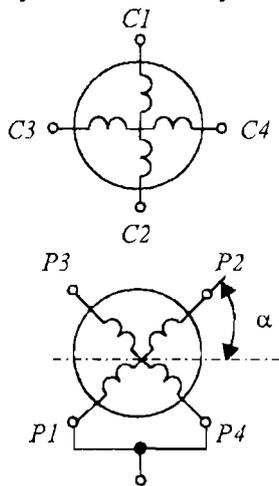


Рис. 1.29. Схема поворотного трансформатора

По конструкции ПТ подобны асинхронным машинам с фазным ротором. На статоре и роторе размещаются по две одинаковые однофазные распределенные обмотки, сдвинутые относительно друг друга в пространстве на 90 эл. град (рис. 1.29). Одна из статорных обмоток  $C1C2$ , подключаемая к сети переменного тока, называется обмоткой возбуждения, вторая —  $C3C4$  — компенсационной. Одна из роторных обмоток  $P1P2$  называется синусной, вторая —  $P3P4$  — косинусной.

Статорные обмотки имеют одинаковое число витков ( $w_B = w_K = w_C$ ) и одинаковые активные и реактивные сопротивления. Роторные обмотки также выполняются одинаковыми ( $w_S = w_C = w_P$ ).

Магнитную систему ПТ набирают из листовой электротехнической стали или пермаллоя. Роторные обмотки подсоединяются к контактному кольцам. Для уменьшения количества контактных колец концы роторных обмоток присоединяются к одному общему кольцу. В некоторых случаях токосъем осуществляется посредством спиральных пружин, но при этом ротор невозможно повернуть больше, чем на 1,8 оборота.

Получили распространение и бесконтактные ПТ, в которых питание к обмотке ротора подается с помощью кольцевых трансформаторов, расположенных в торцевых частях.

Основное свойство ПТ заключается в следующем: при повороте ротора взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора должна изменяться по строго гармоническому закону зависимости от угла  $\alpha$ . Угол  $\alpha$  отсчитывается от поперечной оси ПТ до оси синусной обмотки. Во многих случаях допустимые погрешности не должны превышать 0,01%.

ПТ всех типов выполняются с номинальной частотой не ниже 400 Гц.

**Синусно-косинусный поворотный трансформатор.** Схема синусно-косинусного поворотного трансформатора (СКПТ) представлена на рис. 1.30. К роторным обмоткам подключена внешняя нагрузка.

На выходе СКПТ выходное напряжение изменяется по синусоидальному и косинусоидальному законам от угла  $\alpha$  поворота ротора.

С небольшой погрешностью можно считать, что

$$u_{\text{вых}c} = k u_{\text{в}} \sin \alpha;$$

$$u_{\text{вых}c} = k u_{\text{в}} \cos \alpha,$$

где  $k = w_{\text{р}3} / w_{\text{с}3}$  — коэффициент трансформации СКПТ;  $u_{\text{в}}$  — напряжение возбуждения;  $w_{\text{р}3}, w_{\text{с}3}$  — эффективное число витков роторной и статорной обмоток, соответственно.

СКПТ в системах автоматического управления применяются в следящих системах.

**Линейный поворотный трансформатор.** Конструкция линейного трансформатора (ЛПТ) в общем аналогична конструкции СКПТ. Однако за счет специфического соединения роторных и статорных обмоток, а также выбора значений коэффициента

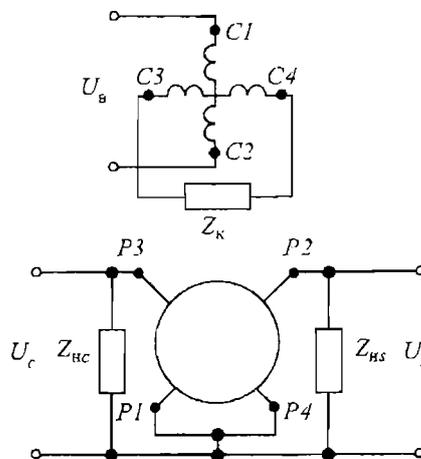


Рис. 1.30. Схема синусно-косинусного поворотного трансформатора

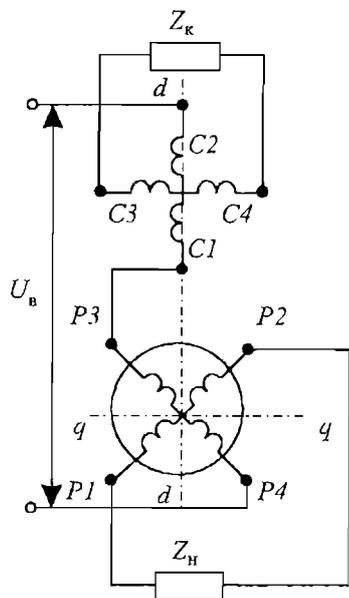


Рис. 1.31. Схема линейного поворотного трансформатора

трансформации, выходное напряжение изменяется по линейному закону — в диапазоне изменения угла  $\alpha$  от  $-55$  до  $+55^\circ$ .

Для получения такой зависимости применяют две схемы ЛПТ: с *первичным* симметрированием и со *вторичным* симметрированием.

На судах нашли применение ЛПТ с первичным симметрированием. В схеме ЛПТ с первичным симметрированием (рис. 1.31) обмотка возбуждения и косинусная обмотка соединяются последовательно и подключаются к сети с напряжением  $U_B$ . Компенсационная обмотка замыкается на резистор  $Z_k$ . Выходной сигнал снимается с синусной обмотки.

ЛПТ изготавливают с коэффициентом трансформации  $k = 0,565$ . Сопротивление нагрузки  $Z_n$  не влияет на условие первичного симметрирования, поэтому ЛПТ с первичным симметрированием может работать при переменной нагрузке без искажения линейности выходной характеристики.

Линейные поворотные трансформаторы, так же как и сельсины, находят широкое применение в следящих системах автоматического управления, в том числе и рулевых электроприводах.

## 1.6. Датчики крутящего момента

**Общие сведения.** Действие судовых датчиков крутящего момента основано на измерении механических напряжений, возникающих на валу под действием крутящего момента, или угла закручивания, образуемого при этом между двумя сечениями вала. При приложении к валу крутящего момента на площадках,

повернутых на угол  $45^\circ$  по отношению к поперечному сечению вала, возникают главные нормальные напряжения растяжения и сжатия  $\sigma_p$  и  $\sigma_c$  (рис. 1.32), равные по абсолютному значению и противоположные по знаку.

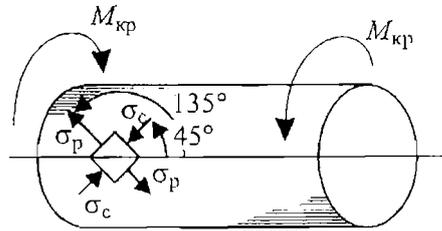


Рис. 1.32. Главные нормальные напряжения

По абсолютному значению они равны касательным напряжениям и, так же как и касательные напряжения, имеют наибольшее абсолютное значение на поверхности вала:

$$\sigma_n = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3},$$

где  $\sigma_n$  — наибольшее значение главного нормального напряжения;  $M_{кр}$  — крутящий момент;  $d$  — диаметр вала.

Для полого вала

$$\sigma_n = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3(1-c^4)},$$

где  $c = d_0/d$ ;  $d_0$  — внутренний диаметр вала.

Под действием крутящего момента два сечения вала поворачиваются одно относительно другого на некоторый угол  $\varphi$ , который называется углом закручивания (рис. 1.33) и определяется выражением:

$$\varphi = \frac{32lM_{кр}}{\pi d^4 G},$$

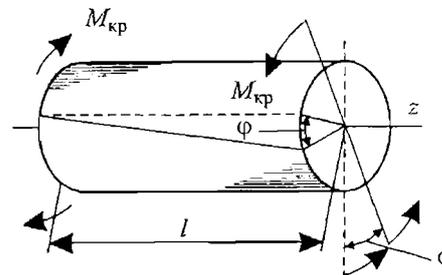


Рис. 1.33. Угол закручивания

где  $\varphi$  — угол закручивания, рад;  $l$  — расстояние между сечениями;  $G$  — модуль сдвига.



Для полого вала

$$\varphi_n = \frac{32IM_{кр}}{\pi d^4 (1 - c^4) G}.$$

В судовых силовых установках в качестве чувствительного элемента датчиков крутящего момента выступает гребной вал. Гребные валы характеризуются небольшими значениями частоты вращения, малым допустимым напряжением ( $30 \cdot 10^6$  Па) и большим крутящим моментом. Поэтому им свойственны большой диаметр и малый угол закручивания (около  $30^\circ$  на длине, равной десяти диаметрам вала).

Совместное использование датчиков крутящего момента с датчиками частоты вращения позволяет определять эффективную мощность главного двигателя.

Для определения мощности используется зависимость

$$N = \frac{2\pi n}{60} M_{кр},$$

где  $M_{кр}$  — крутящий момент, Н·м;  $n$  — частота вращения, об./мин.

Использование компьютерной техники позволяет расширить область применения датчиков крутящего момента. На компьютер поступают сигналы с датчиков крутящего момента, частоты вращения, расхода и вязкости топлива, скорости судна. Соответственно, компьютер выдает информацию о крутящем моменте, частоте вращения, эффективной мощности, энергии, расходе топлива, скорости судна, общем расходе топлива, общем числе оборотов, пройденном расстоянии в милях, удельном расходе топлива.

Компьютерная информация позволяет оценить эффективность работы судовой энергетической установки.

**Тензорезисторные датчики крутящего момента.** Для измерения крутящего момента тензорезисторы наклеивают на поверхность вала под углом  $45^\circ$  к его образующей, т.е. вдоль действия

## ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

главных нормальных напряжений. Обычно используется мостовая схема с четырьмя тензорезисторами, позволяющая повысить чувствительность датчика, улучшить линейность его характеристики. Два тензорезистора наклеиваются на одной стороне вала, еще два — на противоположной (рис. 1.34).

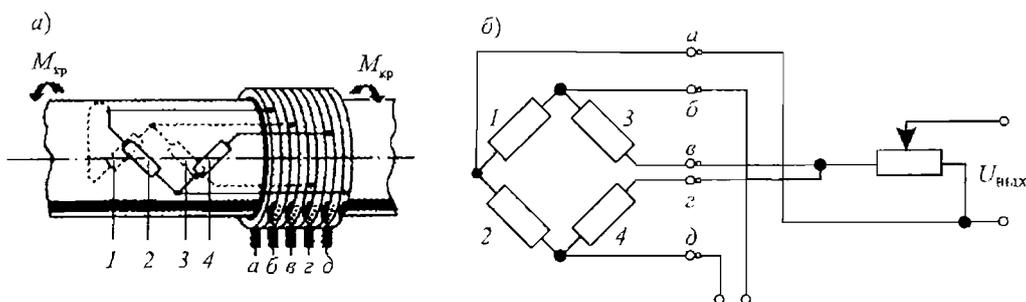


Рис. 1.34. Расположение тензорезисторов (а) и схема тензорезисторного датчика (б)

При таком расположении тензорезисторы 2, 3 под действием крутящего момента будут растягиваться, а тензорезисторы 1, 4 — сжиматься; это приведет к появлению выходного сигнала с мостовой схемы. Под влиянием изгиба растягиваться будут тензорезисторы 2, 4, а сжиматься — тензорезисторы 1, 3. Но при такой деформации тензорезисторов выходной сигнал с мостовой схемы будет равен нулю. При изменении температуры будет происходить одновременное изменение сопротивлений тензорезисторов, поэтому выходной сигнал и в данном случае окажется равным нулю. Таким образом, мостовая схема снижает влияние деформаций, вызванных изгибом, и уменьшает воздействие от изменения температуры.

Хорошая работа датчика возможно при тщательном подборе тензорезисторов, которые должны иметь одинаковые сопротивления и чувствительности.

Тензорезисторные датчики просты по конструкции, имеют небольшие размеры. Однако для подачи питания и снятия выходного сигнала с мостовой схемы необходима установка токосъемных устройств. Для обеспечения возможности балансирования мостовой схемы устанавливаются пять колец *a...д* (см. рис. 1.34). Наличие токосъемного устройства — основной недостаток тензорези-



сторных датчиков. Рассмотренный датчик используется, в основном, при испытаниях судовых установок.

Для повышения надежности и точности тензометрических датчиков применяют телеметрические системы измерения крутящего момента. В таких системах источник питания и схема преобразования выходного сигнала с тензометрического моста находятся на вращающемся валу. В качестве источников питания используют либо гальванические батареи, либо вторичные обмотки трансформаторов, первичные обмотки которых располагаются около вращающегося вала. В телеметрических системах применяют частотную модуляцию, при которой выходное напряжение тензометрического моста преобразуется в частоту специального генератора. Напряжение генератора с переменной частотой подается на передающую антенну, расположенную на валу. Приемная антенна обычно находится рядом с валом. Она соединяется с приемным устройством, в котором осуществляется индикация принятого сигнала. Применение частотной модуляции позволяет уменьшить влияние помех. Следует отметить, что схемы телеметрических систем измерения крутящего момента весьма сложны.

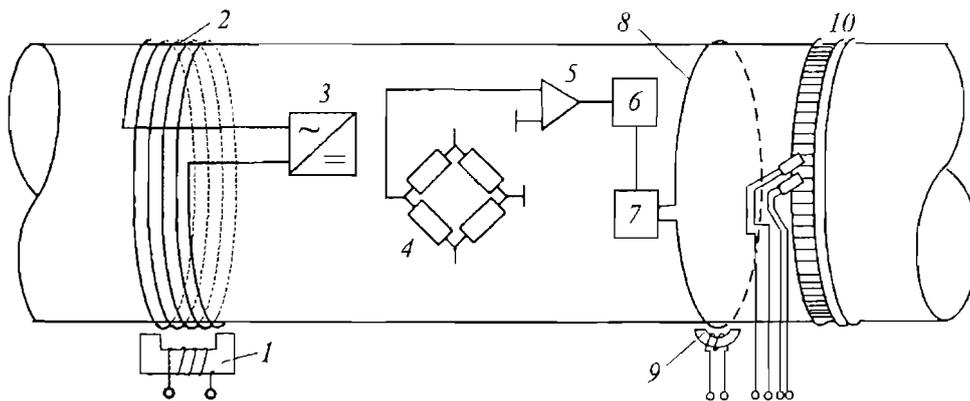


Рис. 1.35. Функциональная схема телеметрического датчика с тензорезисторами: 1 — первичная обмотка трансформатора; 2 — вторичная обмотка трансформатора; 3 — выпрямитель; 4 — тензорезисторный мост; 5 — усилитель постоянного тока; 6 — преобразователь напряжение/частота; 7 — усилитель мощности; 8 — передающая роторная обмотка; 9 — выходная обмотка датчика; 10 — частотный датчик частоты вращения

На рис. 1.35 показана функциональная схема датчика крутящего момента PALCO фирмы VAF INSTRUMENTS.

Датчик состоит из двух частей: статора и ротора, расположенного на валу. Электронные элементы расположены на роторе. Между статором и ротором существует воздушный зазор, равный 2 мм. Для подачи питания на вал на статоре находится первичная обмотка трансформатора 1. Вторичная обмотка 2 располагается в пазах ротора.

Со вторичной обмотки напряжение подается на выпрямитель 3. Выпрямленное и стабилизированное напряжение используется для питания электронных элементов и тензорезисторных преобразователей датчика. Выходное напряжение мостовой схемы 4 тензорезисторных преобразователей поступает на усилитель 5 постоянного тока. С выхода усилителя напряжение подается на преобразователь напряжение/частота 6. При нулевом значении крутящего момента частота выходного сигнала преобразователя равна 7 кГц.

Появление крутящего момента приводит к изменению частоты выходного сигнала преобразователя. В зависимости от знака и значений крутящего момента частота изменяется до  $\pm 4$  кГц. Таким образом, под действием крутящего момента происходит частотная модуляция выходного сигнала тензорезисторных преобразователей в диапазоне  $7 \pm 4$  кГц.

Выходной сигнал преобразователя поступает на усилитель мощности 7, а с него — на передающую обмотку 8 (см. рис. 1.35). Сигнал с роторной обмотки принимает выходная обмотка датчика 9, расположенная на статоре. Вместе с датчиком крутящего момента на роторе и статоре располагается частотный датчик частоты вращения 10, который состоит из диска с зубцами, находящегося на роторе, и индукционного преобразователя на статоре. Частотные сигналы с датчиков крутящего момента и частоты вращения преобразуются в сигналы постоянного тока  $\pm 10$  В. Погрешность датчика не превышает  $\pm 0,25\%$ .

Аналогичный тензорезисторный датчик BROILICH выпускает фирма Magine Electronic Engineering.

**Магнитоупругие датчики крутящего момента.** В этих датчиках нашли применение два типа магнитоупругих преобразова-



телей (МУП): *элементные* и *кольцевые* (в которых чувствительным элементом является контролируемый участок вала). Между полюсами магнитопровода МУП и валом существует воздушный зазор, равный 2 мм. В качестве элементных (ЭМУП) применяются трансформаторные МУП.

Магнитопровод трансформаторного МУП состоит из двух взаимно перпендикулярных П-образных сердечников, на каждом полюсе которых расположены катушки (рис. 1.36).

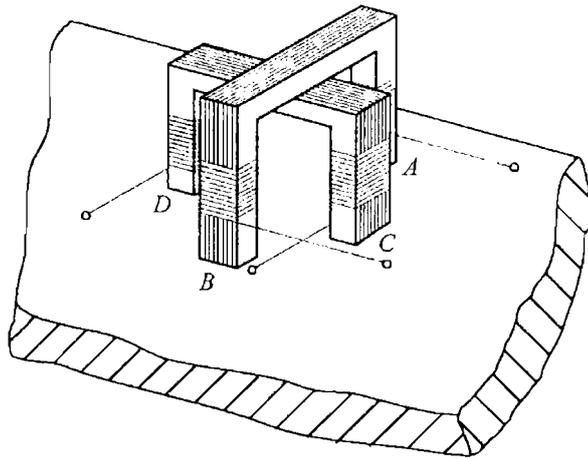


Рис. 1.36. Трансформаторный МУП

питаются от сети переменного тока и образуют обмотку возбуждения, служащую для создания переменного магнитного потока. Выходное напряжение снимается с измерительной обмотки, образованной катушками полюсов *C* и *D*.

При отсутствии внешних сил, приложенных к чувствительному элементу, магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, распределяется по поверхности чувствительного элемента таким образом, что он не протекает через полюса *C* и *D*.

Приложение внешних сил к чувствительному элементу приводит к искажению распределения магнитного потока обмотки возбуждения и к протеканию магнитного потока через полюса *C* и *D*; следовательно, появляется выходное напряжение переменного тока.

Размеры сердечников таковы, что линии, соединяющие центры проекций полюсов *A*, *B*, *C*, *D* на поверхности чувствительного элемента, образуют квадрат. Катушки полюсов *A* и *B* соединяются последовательно таким образом, чтобы имело место чередование полярности полюсов. Катушки полюсов *C* и *D* соединяются аналогично. Катушки полюсов *A* и *B*

Магнитопровод обмотки возбуждения ЭМУП устанавливают по окружности вала, при этом главные нормальные напряжения направлены под углом  $45^\circ$  к линии, соединяющей центры проекций полюсов магнитопровода обмотки возбуждений.

Большой недостаток ЭМУП — наличие зависимости выходного напряжения от магнитной неоднородности материала вала. Она приводит к тому, что выходное напряжение ЭМУП изменяется в зависимости от угла поворота вала при постоянном значении крутящего момента.

Кольцевой магнитоупругий преобразователь (КМУП) крутящего момента представляет собой единую конструкцию, состоящую из элементарных МУП, расположенных вокруг вала. Установка КМУП крутящего момента позволяет значительно уменьшить влияние магнитной неоднородности вала и его биений.

Внешне КМУП напоминает электрическую машину с явно выраженными полюсами на статоре и участком вала вместо ротора (рис. 1.37).

Магнитопровод КМУП состоит из трех колец, каждое из которых имеет определенное число полюсов, и двух колец без полюсов. Полюсы каждого кольца расположены на одинаковом расстоянии один от другого, причем полюсы крайних колец установлены друг против друга, а полюсы среднего кольца сдвинуты относительно них на половину междуполусного расстояния.

Катушки полюсов среднего кольца образуют обмотку возбуждения, катушки полюсов крайних колец — измерительную обмотку. Катушки обмотки возбуждения включены последовательно таким образом, чтобы соблюдалось чередование полярности по-

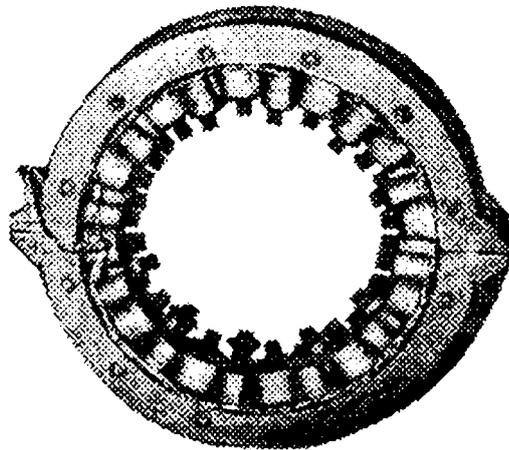


Рис. 1.37. Кольцевой магнитоупругий преобразователь крутящего момента



люсов. Катушки измерительной обмотки также включены последовательно. У полюсов измерительной обмотки каждого кольца соблюдается чередование полярности. Противоположные полюсы крайних колец имеют разную полярность. Такое подключение катушек измерительной обмотки обеспечивает суммирование ЭДС катушек.

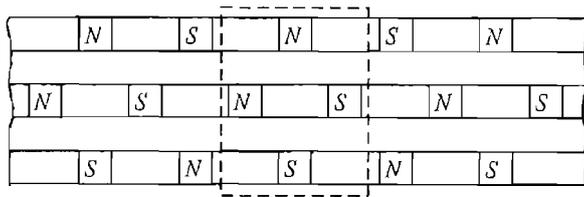


Рис. 1.38. Развертка магнитопровода КМУП

На рис. 1.38 показана развертка магнитопровода КМУП, на которой штриховой линией выделена часть, соответствующая элементному МУП.

Весь магнитопровод состоит из двух равных частей. Разъемная конструкция магнитопровода облегчает установку преобразователя. КМУП, состоящий из элементных МУП с удвоенным числом полюсов, имеет аналогичную конструкцию.

КМУП крутящего момента имеют большие массу и габариты. Нужно отметить, что число пар полюсов, габариты и масса магнитопровода КМУП зависят от заданного диаметра вала.

Датчики крутящего момента с КМУП производит фирма ASEA.

На рис. 1.39 представлена функциональная схема датчика крутящего момента.

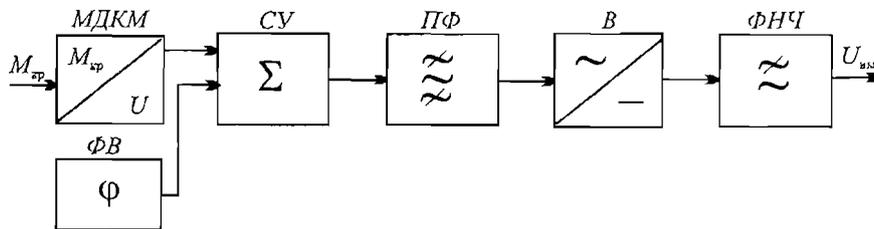


Рис. 1.39. Функциональная схема датчика крутящего момента

Магнитоупругий датчик крутящего момента (МДКМ) состоит из двух ЭМУП, расположенных под углом  $180^\circ$  один относительно другого. Установка двух ЭМУП привела к компенсации гармо-

нических составляющих, обусловленных магнитной неоднородностью материала вала. Применение ЭМУП позволило разработать унифицированную конструкцию магнитопровода, которую возможно использовать для валов с различными диаметрами.

Выходной сигнал *МДКМ* (см. рис. 1.39) состоит из следующих составляющих: нулевого сигнала, полезного сигнала и сигнала помехи. Каждый из сигналов характеризуется соответствующим напряжением переменного тока. Так же как и в КМУП, нулевой сигнал обусловлен потоками рассеяния обмоток возбуждения ЭМУП и магнитной асимметрией магнитопровода.

Полезный сигнал изменяется пропорционально крутящему моменту  $M_{кр}$  на гребном валу.

Сигнал помехи обусловлен магнитной неоднородностью материала вала. Наличие сигнала помехи приводит к изменению выходного напряжения *МДКМ* за один оборот вала при постоянном значении крутящего момента.

Для компенсации нулевого сигнала служит фазовращатель *ФВ*, выходное напряжение которого должно быть равно по значению и противоположно по фазе первой гармонической составляющей нулевого сигнала.

Взаимная компенсация нулевого напряжения *МДКМ* и выходного напряжения *ФВ* происходит при помощи суммирующего усилителя *СУ*. Для уменьшения сигнала помехи датчик крутящего момента собирают из двух расположенных друг против друга (по диаметру гребного вала) ЭМУП. Дальнейшее уменьшение сигнала помехи происходит посредством полосового фильтра *ПФ* (см. рис. 1.39), который выделяет составляющую выходного сигнала *МДКМ*, пропорциональную среднему крутящему моменту на гребном валу. С выхода *ПФ* напряжение поступает на выпрямитель *В*, откуда выпрямленное напряжение подается на фильтр нижних частот *ФНЧ*. Этот фильтр служит для выделения постоянной составляющей, пропорциональной крутящему моменту. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения подается на



измерительный прибор, по показаниям которого можно судить о значении крутящего момента на гребном валу.

**Датчики крутящего момента с индукционными преобразователями.** На рис. 1.40 приведена схема датчика крутящего момента с индукционными преобразователями.

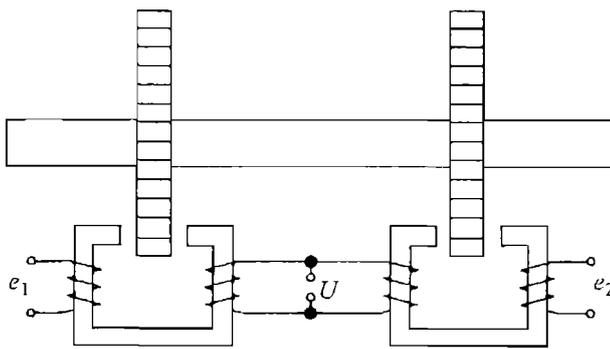


Рис. 1.40. Индукционный датчик крутящего момента

На валу на определенном расстоянии один от другого находятся одинаковые диски из ферромагнитного материала. Диски установлены одинаково относительно сердечников преобразователей. По окружности дисков равномерно расположены зубцы, которые при вращении вала проходят между полюсами сердечников индукционных преобразователей.

Во время вращения вала при отсутствии крутящего момента в измерительных обмотках индукционных преобразователей наводятся переменные ЭДС, сдвиг по фазе между которыми равен нулю. При наличии крутящего момента один из дисков поворачивается относительно другого на угол закручивания  $\varphi$ . Поэтому при вращении вала в измерительных обмотках преобразователей наводятся переменные ЭДС, со сдвигом по фазе между ними.

Интервал времени, соответствующий углу закручивания вала, составляет

$$t = \frac{\varphi}{2\pi} T_{\text{в}} = \frac{30\varphi}{\pi n}, \quad (1.3)$$

где  $T_{\text{в}} = 60/n$  — период вращения вала;  $n$  — частота вращения вала.

Частота переменной ЭДС преобразователя:

$$f_{\Pi} = \frac{Zn}{60}, \quad (1.4)$$

где  $Z$  — число зубцов диска.

Период переменной ЭДС составляет

$$T = \frac{1}{f_{\Pi}}.$$

Время  $t$  соответствует сдвигу по фазе  $\alpha$  переменной ЭДС:

$$\alpha = \frac{2\pi t}{T} = Z\varphi.$$

Таким образом, угол сдвига по фазе  $\alpha$  пропорционален числу зубцов диска и углу закручивания вала  $\varphi$ .

Если измерительные обмотки преобразователи включить между собой последовательно, то выходное напряжение будет равно разности наводимых в них ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ :

$$u_{\text{вых}} = e_1 - e_2.$$

При синусоидальном изменении ЭДС  $e_1$  и  $e_2$ :

$$\begin{aligned} u_{\text{вых}} &= E_m \sin \omega_{\Pi} t - E_m \sin(\omega_{\Pi} t - \alpha) = \\ &= 2E_m \sin \frac{\alpha}{2} \cos(\omega_{\Pi} t - \frac{\alpha}{2}), \end{aligned}$$

где

$$\omega_{\Pi} = 2\pi f_{\Pi}.$$

При малых  $\alpha$

$$u_{\text{вых}} = E_m \alpha \cos(\omega_{\Pi} t - \frac{\alpha}{2}).$$

Переменные ЭДС обычно содержат высшие гармоники, которые вносят большую погрешность при описанном простом способе измерения. Для уменьшения погрешности применяют более сложную схему, представленную на рис. 1.41.

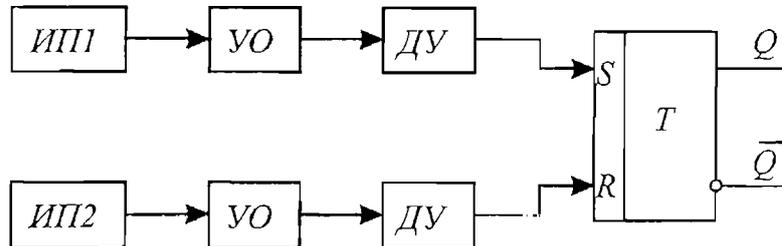


Рис. 1.41. Схема измерения крутящего момента

ЭДС индукционных преобразователей *ИП1* и *ИП2* подаются на усилители-ограничители *УО*, преобразующие произвольную форму ЭДС в прямоугольную. Напряжения прямоугольной формы с *УО* подаются на дифференцирующие устройства *ДУ*, с выхода которых кратковременные импульсы поступают на входы *RS*-триггера. При работе датчика на одном из выходов триггера появляются прямоугольные импульсы, длительность  $t_{и}$  которых, в соответствии с выражением (1.3), изменяется пропорционально углу закручивания вала. Среднее значение напряжения прямоугольных импульсов составляет

$$u_{\text{ср}} = A t_{и} f_{п},$$

где  $A$  — амплитуда импульса.

С учетом выражений (1.3), (1.4) можно найти

$$u_{\text{ср}} = A \frac{Z\varphi}{2\pi}.$$

При постоянной амплитуде прямоугольных импульсов получим

$$u_{\text{ср}} = k\varphi,$$

где

$$k = \frac{AZ}{2\pi}.$$

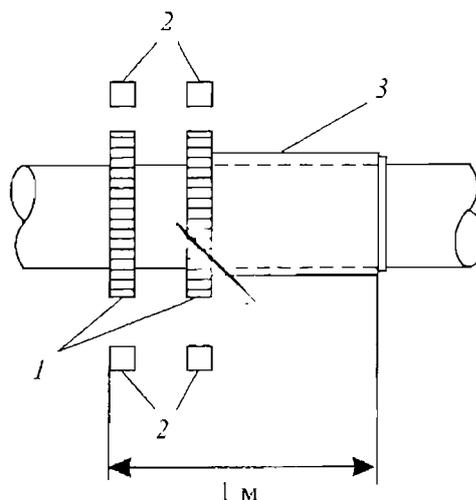
## ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Таким образом, среднее значение напряжения изменяется пропорционально углу  $\varphi$ , и, следовательно, крутящему моменту.

Датчики крутящего момента с индукционными преобразователями выпускает фирма FURUNO Electric Co. В датчике FURUNO применены два индукционных преобразователя с постоянными магнитами. Преобразователи располагаются на расстоянии свыше 2,5 м один от другого.

**Датчики крутящего момента с индукционным редуктосином.** Схема работы такого датчика показана на рис. 1.42.

Датчик состоит из двух зубчатых колес 1. Одно из них установлено на валу, второе — на трубе 3, которая крепится к валу на определенном расстоянии от первого колеса. Расстояния между сечениями вала составляют 1 м.



На каждом из зубчатых колес располагаются по два зубчатых сектора 2. На каждом секторе имеются три обмотки. Одна из обмоток питается от сети переменного тока, а с остальных двух снимаются выходные сигналы. Зубчатое колесо с секторами ра-

Рис. 1.42. Датчик крутящего момента с индукционным редуктосином

ботает в режиме индукционного редуктосина — многополюсного синусно-косинусного трансформатора. Такой трансформатор (рис. 1.43) имеет три обмотки: обмотку возбуждения 1, синусную 2 и косинусную 3 обмотки.

Напряжения синусной и косинусной обмоток характеризуют следующие выражения:

$$u_s = u_m \sin Z\alpha \cos \omega_0 t;$$

$$u_c = u_m Z\alpha \cos \omega_0 t,$$



Выходное напряжение зубчатых секторов второго колеса можно выразить следующим образом:

$$u_{\text{вых}2} = u_{\text{мд}} \sin[(\omega_0 + \omega_{\text{д}})t \pm \beta - 45^\circ],$$

где знак (-) соответствует положительному значению крутящего момента, а (+) — отрицательному.

Функциональная схема датчика представлена на рис. 1.44.

Гармонические напряжения  $u_{1\Sigma}$  и  $u_{2\Sigma}$  подаются на фильтры верхних частот  $Z1$  и  $Z2$ , с выхода которых получают два напряжения:  $u_{\text{вых}1}$  и  $u_{\text{вых}2}$ .

Синусоидальные напряжения  $u_{\text{вых}1}$  и  $u_{\text{вых}2}$  поступают на усилители-ограничители  $УО$ , где происходит преобразование синусоидальной формы сигналов в прямоугольную.

Изменение знака прямоугольных колебаний происходит при прохождении синусоидальных напряжений  $u_{\text{вых}1}$  и  $u_{\text{вых}2}$  через нулевые значения.

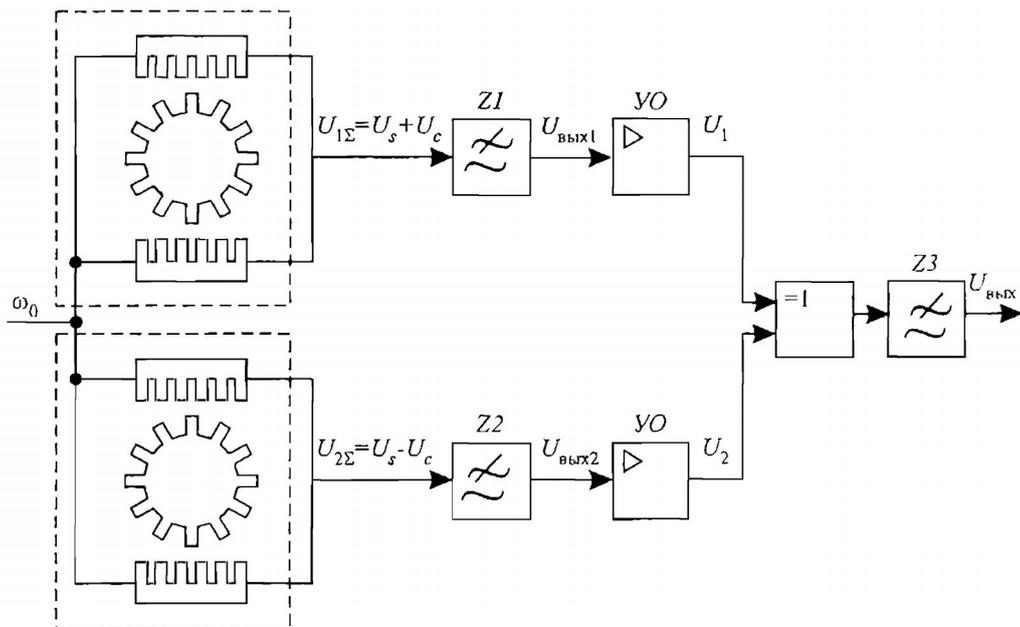


Рис. 1.44. Функциональная схема датчика с редуктосином

С усилителей прямоугольный разнополярные импульсы поступают на логическую схему “исключающее ИЛИ”. С выхода логической схемы сигнал подается на фильтр нижних частот  $Z3$ .

При  $M_{кр} = 0$  на выходе логической схемы получаются разнополярные импульсы равной длительности, поэтому их постоянная составляющая с выхода  $Z3$  равна нулю.

При  $M_{кр} \neq 0$  на выходе логической схемы получаются несимметричные разнополярные импульсы. Если  $M_{кр} > 0$ , длительность положительных импульсов больше длительности отрицательных, поэтому постоянная составляющая разнополярных импульсов больше нуля.

При  $M_{кр} < 0$  длительность отрицательных импульсов становится больше длительности положительных, поэтому постоянная составляющая разнополярных импульсов меньше нуля.

Разность между положительными и отрицательными импульсами изменяется пропорционально сдвигу по фазе  $\beta$ . Поэтому постоянная составляющая прямоугольных импульсов на выходе фильтра нижних частот изменяется пропорционально измеряемому крутящему моменту.

Погрешность такого датчика не превышает 0,3%.

Датчики крутящего момента с индукционным редуктосином выпускает фирма Jungner Instrument.

## 1.7. Датчики уровня

По характеру выходного сигнала датчики уровня можно разделить на две группы: сигнализаторы уровня и уровнемеры.

*Сигнализаторы* уровня фиксируют одно или несколько заданных дискретных значений уровня. *Уровнемеры* осуществляют непрерывное измерение уровня в заданном диапазоне.

**Поплавковые датчики уровня.** В поплавковых датчиках в качестве чувствительного элемента выступает поплавок. Уровень погружения поплавка и его подъемная сила для одной и той же



жидкости остаются постоянными и зависят только от геометрических размеров поплавка.

Поплавковым датчикам свойственны следующие недостатки: наличие движущихся деталей; возможность коррозии тонких стенок поплавка, приводящей к его потоплению; трудности при передаче показаний.

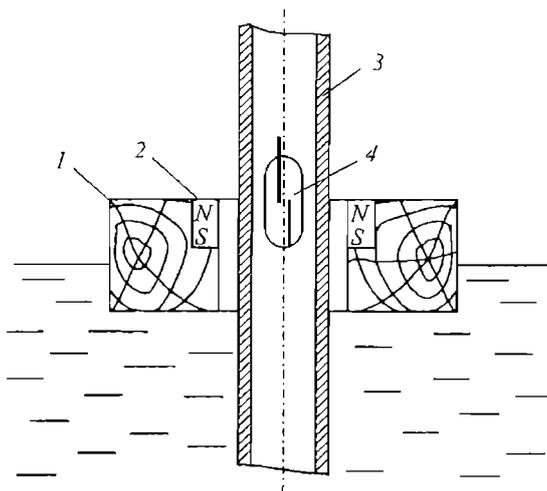


Рис. 1.45. Поплавковый сигнализатор уровня с магнитоуправляемыми контактами

*Поплавковый сигнализатор уровня с магнитоуправляемыми контактами.* Показанный на рис. 1.45 поплавковый сигнализатор уровня с магнитоуправляемыми контактами (МУК) состоит из поплавка 1, на котором находится кольцеобразный магнит 2, и трубы 3, внутри которой расположен МУК 4.

Обычно предусмотрено несколько МУК, расположенных на разных уровнях. При перемещении поплавка вдоль трубы в зависимости от уровня жидкости происходит замыкание соответствующих МУК. Замыкание МУК приводит к подаче сигнала в систему контроля уровня жидкости. Подобные датчики находят применение в системах контроля уровня воды паровых котлов.

*Электромеханический поплавковый датчик уровня.* Схема датчика этого типа представлена на рис. 1.46.

В отличие от схемы датчика, рассмотренного выше, в этом случае поплавок 1 перемещается при помощи троса, проходящего через шкив 2 и наматываемого на барабан 7. Барабан приводится во вращение через редуктор электродвигателем постоянного тока 6. Для предотвращения самопроизвольного вращения барабана меж-

ду ним и электродвигателем установлен тормоз. Шкив 2 шарнирно закреплен на рычаге 3 с противовесом. Противовес служит для уравнивания поплавок системы.

Принцип действия датчика заключается в следующем. На шкив 2 передается усилие  $F$  со стороны троса, которое определяется выталкивающей силой жидкости, воздействующей на поплавок, и

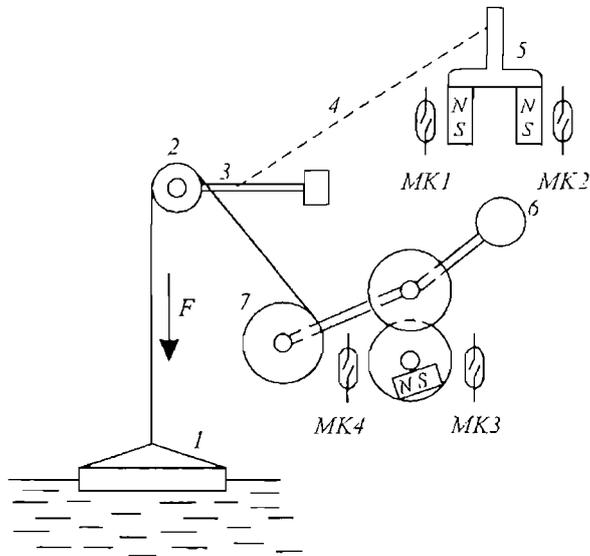


Рис. 1.46. Электромеханический поплавковый датчик уровня

поплавок находится на поверхности жидкости рычаг с балансиром занимает нейтральное положение. При понижении уровня жидкости уменьшается выталкивающая сила и, следовательно, увеличивается усилие  $F$ . Под действием этого усилия шкив 2 опускается вниз, поворачивая рычаг 3 против часовой стрелки. При повороте рычага 3 перемещается второй рычаг 4, связанный с вилкой 5. На этой вилке расположены постоянные магниты. Перемещение рычага 4 влечет за собой поворот вилки против часовой стрелки и замыкание магнитоуправляемого контакта  $МК1$ , что приводит к включению электродвигателя. При вращении электродвигателя поплавок опускается. Когда поплавок достигает поверхности жидкости, появляется выталкивающая сила, и рычаг 3 поворачивается в нейтральное положение, отключая электродвигатель.

При повышении уровня жидкости выталкивающая сила поплавок увеличивается и, следовательно, уменьшается усилие, действующее на шкив 2. Это приводит к повороту рычага 3 по часовой стрелке, что вызывает поворот вилки 5, тоже по часовой стрелке, и замыкание магнитоуправляемого контакта  $МК2$ . Замы-



кание *МК2* приводит к реверсу электродвигателя и подъему поплавка. Когда поплавок достигает поверхности жидкости выталкивающая сила уменьшается, и рычаг 3 возвращается в нейтральное положение, отключая электродвигатель. Таким образом, при изменении уровня жидкости происходит включение электродвигателя, который перемещает поплавок в соответствующем направлении до тех пор, пока он не достигает поверхности жидкости. Иначе говоря, с помощью электродвигателя поплавок “следит” за уровнем жидкости.

Измеряемый уровень определяется по числу оборотов барабана. Для этого на шестеренке редуктора установлен постоянный магнит, управляющий двумя магнитоуправляемыми контактами *МК3* и *МК4*, которые замыкаются через каждые пол-оборота. Замыкание контактов приводит к подаче сигнала в реверсивный счетчик, индикация состояния которого позволяет судить об измеряемом уровне жидкости.

Рассмотренный датчик предназначен для измерения уровня жидкости в танках танкеров. Он измеряет уровень до 36 м с точностью  $\pm 0,5$  см. Такой датчик представляет собой основную часть системы управления грузовыми операциями танкера.

**Мембранные датчики уровня.** Эти датчики также используются для измерения уровня жидкости в танках. Принцип действия мембранных датчиков основан на свойстве контролируемой жидкости (как, впрочем, любой другой) оказывать давление — в данном случае на дно танка. Гидростатическое давление столба жидкости  $p$  пропорционально его высоте  $h$ :

$$p = \rho h,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости.

С учетом давления газа (воздуха) на поверхность жидкости при определении ее уровня необходимо измерить перепад давлений

$$p = p_1 - p_2,$$

где  $p_1$  — суммарное давление столба жидкости и газа над ней;  $p_2$  — давление газа на поверхности жидкости.

Для измерения давления на судах наиболее широко используются мембраны, перемещение которых, пропорциональное гидростатическому давлению, преобразуется в электрический сигнал. В качестве примера рассмотрен датчик уровня (рис. 1.47).

Датчик имеет две мембранные коробки 2, каждая из которых состоит из двух одинаковых мембран, соединенных по периферии. Мембранные коробки сообщаются между собой посредством капиллярной трубки 3. Под действием давления столба жидкости нижняя мембранная коробка сжимается, вследствие чего происходит выдавливание воздуха через капиллярную трубку в верхнюю мембранную коробку. Давление в этой коробке повышается, и она расширяется. Деформация мембранной коробки происходит до тех пор, пока давление воздуха не уравновешивается силой упругости мембран.

К верхней мембранной коробке прикреплен якорь 1 дифференциально-трансформаторного преобразователя. При деформации коробки происходит перемещение якоря, поэтому выходное напряжение преобразователя определяется уровнем контролируемой жидкости. Верхняя мембранная коробка с дифференциально-трансформаторным преобразователем находится на значительном расстоянии от нижней коробки. Это обстоятельство позволяет использовать датчик для измерения уровня жидкости во взрывоопасных помещениях, например, в танках танкеров.

На судах встречаются датчики уровня, в которых деформация мембраны под действием давления столба жидкости преобразуется непосредственно в электрический сигнал — при помощи потен-

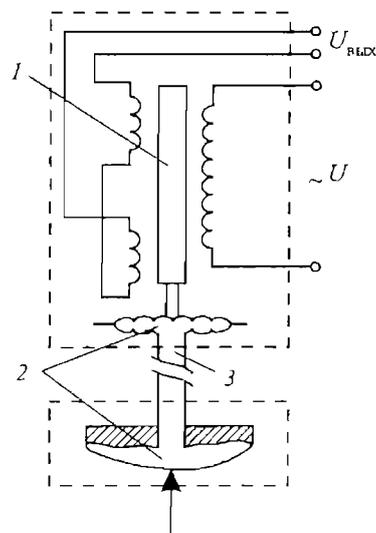


Рис. 1.47. Пневмоэлектрический датчик уровня



циометрических или дифференциально-трансформаторных преобразователей.

**Пьезометрические датчики уровня.** Датчик уровня, в котором измерение гидростатического давления осуществляется посредством измерения давления в трубке, погруженной в резервуар с жидкостью (например, в танк), называют пьезометрическим. Также этот способ измерения называют пневматическим. Принципиальная схема такого датчика представлена на рис. 1.48.

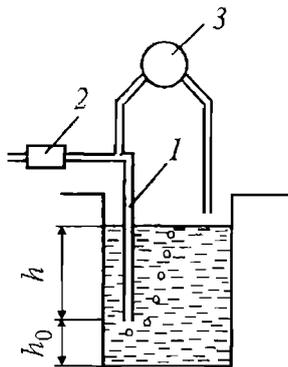


Рис. 1.48. Пьезометрический датчик уровня:  $h_0$  — не контролируемое значение уровня

Пьезометрическая трубка 1 размещается в танке с жидкостью. В трубку через дроссель 2, служащий для ограничения расхода воздуха, поступает воздух или инертный газ. При подаче воздуха давление в пьезометрической трубке повышается до тех пор, пока не станет равным давлению столба жидкости высотой  $h$ . При равенстве давлений из нижнего конца трубки начинает выходить воздух. Давление воздуха в пьезометрической трубке измеряет дифманометр 3. При неизменном удельном весе жидкости давление в пьезометрической трубке однозначно определяет измеряемый уровень. Давление, измеряемое дифманометром, преобразуется в токовый сигнал. Для стабилизации расхода воздуха в пьезометрических уровнемерах применяют регуляторы расхода.

Подобный датчик измеряет уровень жидкости в диапазоне 1...30 м с погрешностью 0,5% полной шкалы. Расход воздуха составляет 5 л в час. Давление воздуха питания 1 МПа.

Подобный датчик измеряет уровень жидкости в диапазоне 1...30 м с погрешностью 0,5% полной шкалы. Расход воздуха составляет 5 л в час. Давление воздуха питания 1 МПа.

**Поплавковые датчики рычажного типа.** В качестве сигнализаторов уровня на судах находят применение поплавковые датчики рычажного типа. Принцип действия такого датчика понятен из рассмотрения рис. 1.49.

Поплавок 1 закреплен на рычаге 2. При перемещении поплавок рычаг воздействует на электрические контакты 3.

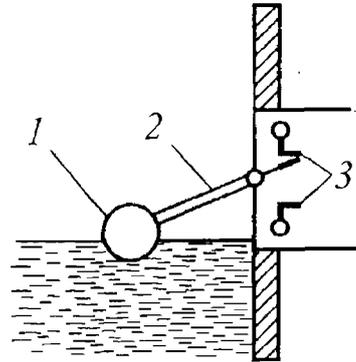


Рис. 1.49. Поплавковый датчик рычажного типа

На рис. 1.50 показана конструкция одного из судовых рычажных датчиков — с постоянным магнитом. Датчик состоит из трех основных частей (рис. 1.50, а): поплавок 4, фланца 5 и контактной коробки 1. Рычаг 3 поплавок крепится к вилке 2 фланца 5.

При изменении уровня контролируемой жидкости поплавок поворачивается в вилке фланца. При помощи фланца происходит герметизация стенки танка (рис. 1.50, б).

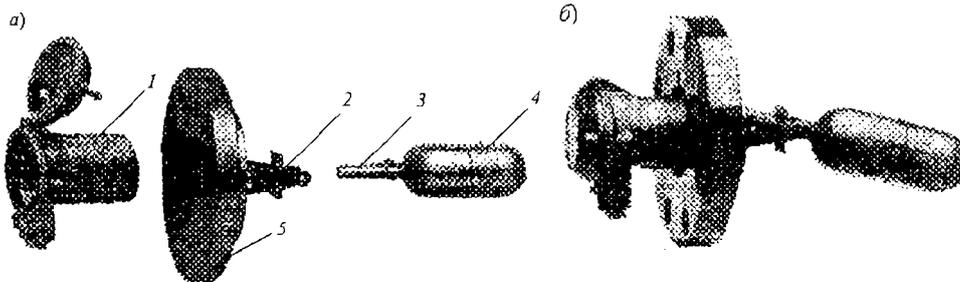


Рис. 1.50. Поплавковый рычажный датчик с постоянным магнитом

На конце рычага поплавок 4 находится постоянный магнит. Такой же постоянный магнит располагается внутри контактной коробки 1. Поворот поплавок приводит к повороту постоянного магнита рычага и к соответствующему повороту постоянного магнита контактной коробки, что вызывает коммутацию ее контактов. Таким образом, рычажный поплавковый датчик позволяет контролировать заданные значения уровня жидкости.



**Емкостные датчики уровня.** В емкостных датчиках уровня наиболее часто применяются цилиндрические емкостные преобразователи.

Емкость между двумя электродами зависит от относительной диэлектрической проницаемости среды; значение диэлектрической проницаемости для всех диэлектриков больше единицы. Различные виды топлива представляют собой хорошие диэлектрики, относительная диэлектрическая проницаемость которых находится в пределах от 1,97 до 2,14. Относительная диэлектрическая проницаемость воды составляет 81. Следует отметить, что емкостные датчики могут быть использованы и при измерении уровня электропроводящих жидкостей.

На рис. 1.51, а представлена схема емкостного датчика уровня, у которого в качестве электродов используются две трубы.

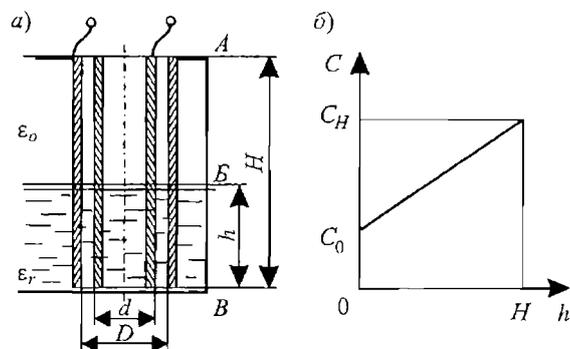


Рис. 1.51. Схема (а) и характеристика (б) емкостного цилиндрического датчика уровня:  $C_0$  — емкость пустого танка;  $C_H$  — емкость заполненного танка

Емкостный датчик можно рассматривать как два параллельно включенных конденсатора с емкостями  $C_1$  и  $C_2$ , где  $C_1$  — емкость между электродами на участке  $AB$  (см. рис. 1.51, а), а  $C_2$  — емкость между электродами на участке  $BB$ .

Емкость датчика составляет:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(H - h)}{\ln(D / d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r h}{\ln(D / d)} =$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D / d)} [H + h(\epsilon_r - 1)],$$

где  $H$  — высота танка;  $h$  — уровень жидкости;  $D$  и  $d$  — внутренний и наружный диаметры наружной и внутренней труб соответственно;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость.

На рис. 1.51, б показана зависимость емкости датчика от уровня.

Если цистерна или танк имеют небольшие размеры, то в качестве наружного электрода при измерении уровня непроводящей жидкости используется металлическая стенка цистерны или танка (рис. 1.52).

В качестве внутреннего электрода используется металлический стержень 1. При измерении уровня 3 электропроводящей жидкости в качестве электродов датчика выступают металлический стержень, имеющий изолирующее покрытие 2, и сама жидкость.

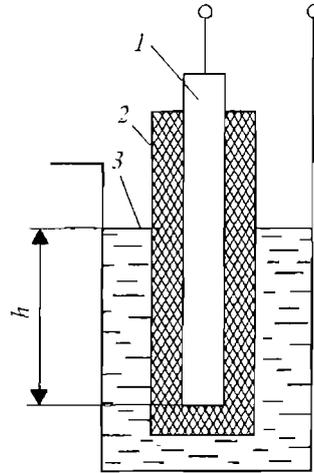


Рис. 1.52. Емкостный датчик уровня

Емкостные датчики можно применять для измерения уровня в танках сложной конфигурации, т.к. электрод датчика возможно сделать гибким. Вообще емкостные датчики обладают большой чувствительностью, высоким быстродействием, имеют небольшие габариты и массу. Вместе с тем, этим датчикам присущи и определенные недостатки. Емкость датчика зависит не только от уровня жидкости, но и от диэлектрической проницаемости, которая изменяется при колебаниях температуры и влажности окружающей среды. Диэлектрическая проницаемость зависит от вида жидкости, а также от состава примесей в ней. Поэтому при запол-



нении танка топливом другого вида или с другим содержанием примесей показания датчика не будут соответствовать действительному значению уровня контролируемой жидкости. Следовательно, в емкостных датчиках могут возникать большие погрешности, связанные с нестабильностью диэлектрической проницаемости жидкости. Кроме того, на точность работы таких датчиков оказывает влияние паразитная емкость кабельной линии, соединяющей датчик со схемой измерения.

**Омические датчики.** Принцип действия омических датчиков основан на замыкании электрической цепи жидкостью, обладающей определенным, достаточно малым омическим сопротивлением. Такие датчики используются в качестве сигнализаторов критического уровня жидкости, поскольку непрерывное измерение ими уровня затруднительно — из-за колебаний электрической проводимости и сильного влияния сопротивления изоляции датчиков. При больших колебаниях электрической проводимости омические датчики настраивают на минимально возможное ее значение. Омические датчики можно использовать для контроля уровня жидкости с электрической проводимостью  $2 \cdot 10^{-3}$  См и выше.

В качестве чувствительных элементов датчиков выступают электроды, которые представляют собой металлические стержни или трубы. Способ и место установки электродов зависят от расположения и конструкции цистерны (или танка) с контролируемой жидкостью. Независимо от значения контролируемого уровня наиболее целесообразна вертикальная установка электродов, при которой их длина может достигать 10 м. Горизонтальная установка позволяет использовать электроды меньшей длины, но при этом из-за выпадения осадков и образования накипи возникают серьезные затруднения с обеспечением изоляции между электродами и стенками цистерны (танка). По условиям техники безопасности напряжение питания датчиков не должно превышать 36 В. Схема преобразования сигнала омического датчика зависит от значения электрической проводимости контролируемой жидко-

сти. При высоком значении омический датчик включают в цепь низковольтного электромагнитного реле (рис. 1.53). При низкой проводимости они подключаются к усилителям, которые управляют электромагнитными реле (рис. 1.54). На судах омические датчики используются для контроля уровня жидкости в танках и цистернах забортной воды, в фекальных установках, системах контроля льяльных вод.

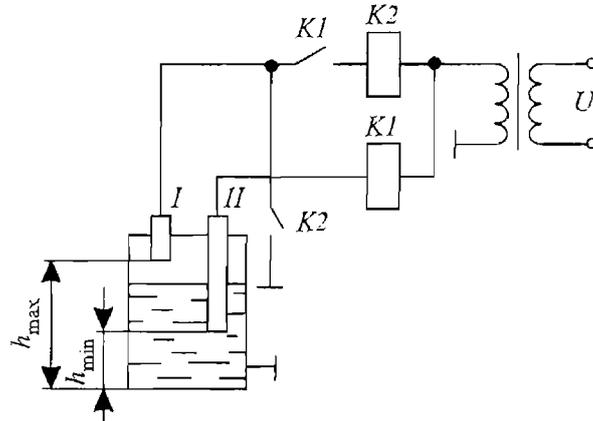


Рис. 1.53. Омический датчик уровня жидкости в фекальной установке:  $h_{min}$  и  $h_{max}$  — минимальное и максимальное значения уровня, соответственно

Схема сигнализатора уровня, представленная на рис. 1.53, используется для контроля уровня жидкости в фекальной установке.

В исходном состоянии при пустом танке реле  $K1$  и  $K2$  обесточены. Заполнение танка жидкостью приводит к замыканию через электрод  $II$  электрической цепи реле  $K1$ , которое своим замыкающим контактом подготавливает цепь питания реле  $K2$ . При достижении уровнем жидкости электрода  $I$  срабатывает реле  $K2$ , которое своими контактами включает сигнализацию и дает сигнал для включения насосной установки. Понижение уровня жидкости не вызывает отключения реле  $K2$ , т.к. оно получает питание через свой контакт  $K2$ , минуя электрод  $I$ . Возвращение системы в исходное состояние происходит при обнажении электрода  $II$ .

Схема сигнализатора уровня, представленная на рис. 1.54, используется для контроля уровня жидкости в танке с забортной водой.

Омический датчик имеет два электрода. В исходном состоянии при пустом танке реле  $K$  обесточено. При достижении уровнем

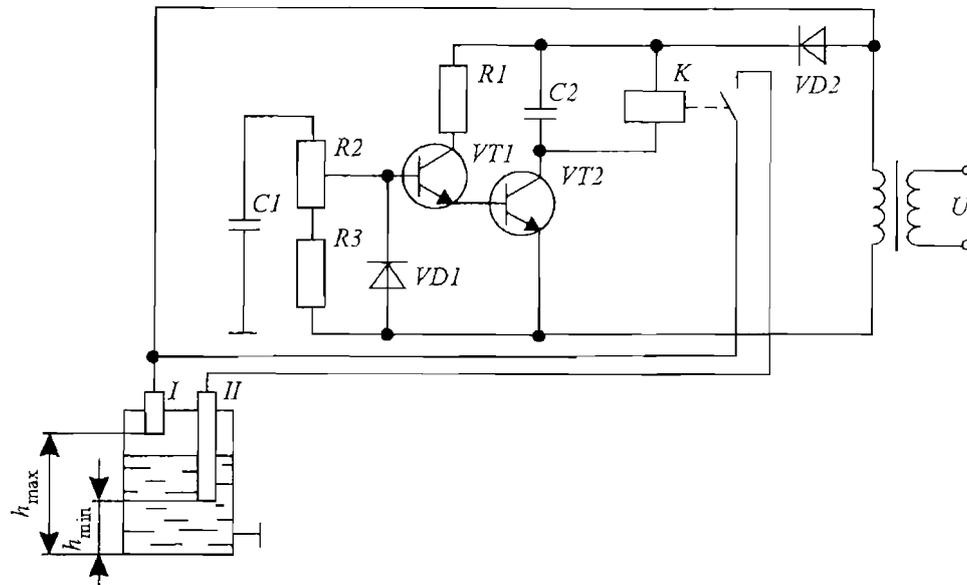


Рис. 1.54. Омический датчик уровня жидкости в танке с забортной водой

жидкости электрода *I* через этот электрод и конденсатор *C1* напряжение переменного тока подается на вход полупроводникового усилителя на транзисторах *VT1* и *VT2*. При помощи диода *VD1* на базу транзистора *VT1* будет поступать положительный потенциал, поэтому при наличии входного сигнала произойдет открытие транзистора *VT1* и, следовательно, транзистора *VT2*, что вызывает срабатывание реле *K*. Снижение уровня жидкости не влечет немедленного отключения реле *K*, т.к. напряжение переменного тока будет подаваться на вход полупроводникового усилителя через электрод *II* и контакт реле *K*. Возвращение системы контроля в исходное состояние происходит при обнажении электрода *II*.

**Радиоволновые датчики уровня.** Радиоволновыми называются уровнемеры, принцип действия которых основан на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости. К таким датчикам относится радиолокационный уровнемер, в котором использовано явление отражения элект-

ромагнитных волн от границы раздела сред с различными электрическими и магнитными свойствами.

Скорость  $v$  распространения электромагнитной волны в среде определяется значениями ее диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей в соответствии с выражением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Показанный на рис. 1.55 датчик уровня состоит из излучателя 1, приемника 2 электромагнитной волны и схемы 3 измерения интервала времени.

Значение уровня  $h$  определяется посредством измерения временного интервала между моментом посылки сигнала излучателя 1 и приходом отрицательного сигнала на приемник 2.

Временной интервал можно определить из следующего выражения:

$$\Delta t = 2(H - h) \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{c}.$$

Обычно локация происходит через газовую среду над жидкостью, т.к. в этом случае излучатель и приемник не подвергаются воздействию жидкости, а значения магнитной и диэлектрической проницаемости газов невелики и практически не зависят от изменения параметров и свойств газов.

Радиолокационный датчик уровня SUM-21 изготавливает фирма SAAB MARINE. Этот датчик предназначен для измерения уровня жидкости в танке при тяжелых условиях окружающей среды.

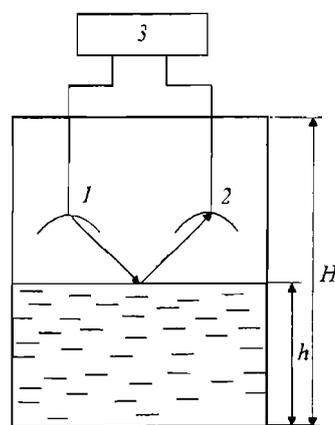


Рис. 1.55. Радиоволновой датчик уровня:  $H$  — высота танка;  $h$  — измеряемый уровень



Все элементы датчика отличаются высокой надежностью. Для измерения уровня используется стрелочный прибор с автоматическим переключением шкалы в соответствии с измеряемым уровнем. Каждый танк оборудован системой сигнализации об аварийном уровне.

Для установки передатчика требуется отверстие в танке диаметром 500 мм. Погрешность измерения этим датчиком составляет  $5 \text{ мм} \pm 0,05\%$  от измеряемого уровня. Для танка высотой до 1 м погрешность увеличивается и может достигать 120 мм.

### **1.8. Датчики перемещения рейки топливных насосов дизеля**

В некоторых системах дистанционного автоматизированного управления нагрузка дизеля определяется по положению рейки топливных насосов. В датчике перемещения используется реверсивный индуктивный преобразователь, якорь которого посредством рычага связан с рейкой топливных насосов. Максимальное перемещение якоря составляет 80 мм.

Принципиальная схема такого датчика приведена на рис. 1.56 (с. 75).

Индуктивности  $L1$ ,  $L2$  катушек преобразователя и резисторы  $R1$ ,  $R2$  образуют мостовую схему, получающую питание от трансформатора  $TV$ . Частота напряжения питания равна 5 кГц.

Выходное напряжение мостовой схемы подается на инвертирующий усилитель с операционным усилителем  $DA1$ . Схема на операционном усилителе  $DA2$  и полевой  $p$ -канальный МОП-транзистор  $VT2$  представляют собой двухполупериодный выпрямитель.

В зависимости от состояния полевого транзистора, усилитель на  $DA2$  может работать в двух режимах: при открытом полевом транзисторе в режиме инвертирующего усилителя, а при закрытом — в режиме дифференциального усилителя с общим входным сигналом.

индуктивного преобразователя. Выходной сигнал с *DA3* подается на неинвертирующий усилитель с *DA4*.

Посредством резистора *R19* изменяют коэффициент усиления усилителя таким образом, чтобы при предельном перемещении якоря реверсивного индуктивного преобразователя выходное напряжение с *DA4* было равным  $-10$  В.

Коэффициент передачи апериодического звена первого порядка на *DA5* равен единице, поэтому в установившемся режиме при предельном положении якоря индуктивного преобразователя выходное напряжение *DA5*, которое является выходным напряжением датчика, равно  $+10$  В.

Схема на *DA5* служит для сглаживания кратковременных изменений выходного напряжения датчика. Выходное напряжение датчика изменяется по линейному закону в функции перемещения якоря реверсивного индуктивного преобразователя. Выходное напряжение датчика поступает в схемы индикации и управления дизелем.

### **1.9. Датчики расхода жидкости**

Для измерения расхода жидкости применяют следующие датчики: 1) переменного перепада давления; 2) постоянного перепада давления; 3) турбинные; 4) объемные; 5) электромагнитные и 6) ультразвуковые.

В число недостатков датчиков типов 1)...4) входит необходимость наличия в трубопроводе (для работы датчиков) диафрагм, тел обтекания, турбинок, крыльчаток, овальных и винтовых шестеренок. Электромагнитные датчики используют для измерения расхода электропроводной жидкости, поэтому их невозможно применять для измерений расхода нефтепродуктов.

**Ультразвуковые датчики расхода.** Скорость распространения ультразвуковых колебаний в движущейся среде относительно выбранной системы отсчета определяется геометрической суммой



скоростей ультразвуковых колебаний  $C$  и движения среды  $v$ . По измеренному значению суммарной скорости при известном значении  $C$  определяется скорость протекания среды.

Принцип действия ультразвукового датчика расхода заключается в измерении разности ультразвуковых импульсов по направлению потока среды и против него.

Время  $t_1$  распространения импульсов по потоку можно определить из следующего выражения:

$$t_1 = \frac{L}{C + v \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 - \frac{v}{C} \cos \alpha\right),$$

а время  $t_2$  прохождения импульсов против потока определяется следующим образом:

$$t_2 = \frac{L}{C - v \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 + \frac{v}{C} \cos \alpha\right),$$

где  $L$  — расстояние между излучателем и приемником;  $\alpha$  — угол между векторами скоростей потока  $v$  и ультразвука  $C$ .

Разность интервалов времени прохождения импульсов составляет:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2L \frac{\cos \alpha}{C^2} v.$$

Объемный расход жидкости определяется выражением:

$$Q = vS,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения трубопровода.

Поэтому

$$\Delta t = 2L \frac{\cos \alpha}{C^2 S} Q.$$

Основные трудности при использовании ультразвукового метода связаны с тем, что скорость звука в среде зависит от ее физико-химических свойств, температуры, давления. Скорость звука

**ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЙКИ ТОПЛИВНОГО НАСОСА**

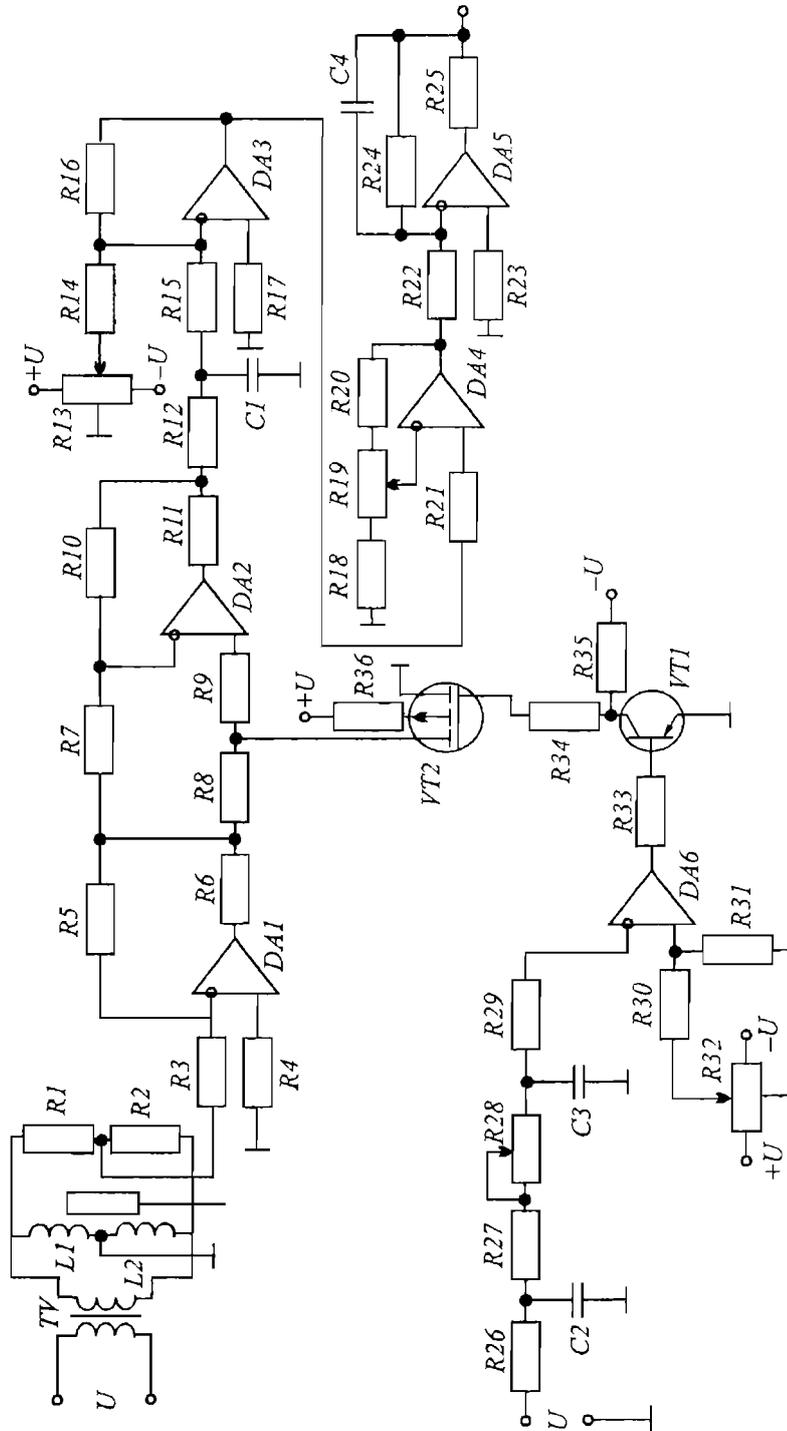


Рис. 1.56. Датчик перемещения рейки топливных насосов



Полевым транзистором  $VT2$  управляет биполярный транзистор  $VT1$ , которым управляет компаратор на операционном усилителе  $DA6$ . На вход компаратора подается напряжение с того же источника, что и на трансформатор  $TV$ . Между входными сигналами операционных усилителей  $DA1$  и  $DA2$  возникает сдвиг по фазе — из-за влияния мостовой схемы.

Для согласования по фазе входных сигналов операционных усилителей служит фазосдвигающая цепочка на резисторах  $R26—R28$  и конденсаторах  $C2, C3$ . Согласование по фазе осуществляется с помощью резистора  $R28$ . На неинвертирующий вход  $DA6$  с резисторов  $R30—R32$  подается напряжение смещения, позволяющее получить на выходе компаратора прямоугольные импульсы одинаковой длительности. Прямоугольные разнополярные импульсы напряжения с выхода компаратора подаются на базу биполярного транзистора  $VT1$ .

При отрицательной полуволне напряжения питания на выходе  $DA6$  получается импульс положительной полярности, приводящий к закрытию транзистора  $VT1$  и, следовательно, — к закрытию полевого транзистора  $VT2$ , т.к. на его затвор подается отрицательный потенциал. В этом случае положительная полуволна напряжения с выхода  $DA1$  появляется на выходе  $DA2$ .

При положительной полуволне напряжения питания полевой транзистор  $VT2$  открывается, а отрицательная полуволна напряжения с выхода  $DA1$  появляется на выходе  $DA2$  с переменной знака. Таким образом, на выходе  $DA2$  получается двухполупериодное выпрямленное напряжение положительной полярности.

Посредством резистора  $R12$  и конденсатора  $C1$  осуществляется фильтрация выпрямленного напряжения. Выпрямленное и отфильтрованное напряжение постоянного тока подается на инвертирующий вход операционного усилителя  $DA3$ . На тот же вход через резисторы  $R13, R14$  подается напряжение смещения.

При помощи резистора  $R13$  добиваются нулевого значения выходного сигнала  $DA3$  при нулевом положении якоря реверсивного

индуктивного преобразователя. Выходной сигнал с *DA3* подается на неинвертирующий усилитель с *DA4*.

Посредством резистора *R19* изменяют коэффициент усиления усилителя таким образом, чтобы при предельном перемещении якоря реверсивного индуктивного преобразователя выходное напряжение с *DA4* было равным  $-10$  В.

Коэффициент передачи аperiodического звена первого порядка на *DA5* равен единице, поэтому в установившемся режиме при предельном положении якоря индуктивного преобразователя выходное напряжение *DA5*, которое является выходным напряжением датчика, равно  $+10$  В.

Схема на *DA5* служит для сглаживания кратковременных изменений выходного напряжения датчика. Выходное напряжение датчика изменяется по линейному закону в функции перемещения якоря реверсивного индуктивного преобразователя. Выходное напряжение датчика поступает в схемы индикации и управления дизелем.

### 1.9. Датчики расхода жидкости

Для измерения расхода жидкости применяют следующие датчики: 1) переменного перепада давления; 2) постоянного перепада давления; 3) турбинные; 4) объемные; 5) электромагнитные и 6) ультразвуковые.

В число недостатков датчиков типов 1)...4) входит необходимость наличия в трубопроводе (для работы датчиков) диафрагм, тел обтекания, турбинок, крыльчаток, овальных и винтовых шестеренок. Электромагнитные датчики используют для измерения расхода электропроводной жидкости, поэтому их невозможно применять для измерений расхода нефтепродуктов.

**Ультразвуковые датчики расхода.** Скорость распространения ультразвуковых колебаний в движущейся среде относительно выбранной системы отсчета определяется геометрической суммой



скоростей ультразвуковых колебаний  $C$  и движения среды  $v$ . По измеренному значению суммарной скорости при известном значении  $C$  определяется скорость протекания среды.

Принцип действия ультразвукового датчика расхода заключается в измерении разности ультразвуковых импульсов по направлению потока среды и против него.

Время  $t_1$  распространения импульсов по потоку можно определить из следующего выражения:

$$t_1 = \frac{L}{C + v \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 - \frac{v}{C} \cos \alpha\right),$$

а время  $t_2$  прохождения импульсов против потока определяется следующим образом:

$$t_2 = \frac{L}{C - v \cos \alpha} \approx \frac{L}{C} \left(1 + \frac{v}{C} \cos \alpha\right),$$

где  $L$  — расстояние между излучателем и приемником;  $\alpha$  — угол между векторами скоростей потока  $v$  и ультразвука  $C$ .

Разность интервалов времени прохождения импульсов составляет:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2L \frac{\cos \alpha}{C^2} v.$$

Объемный расход жидкости определяется выражением:

$$Q = vS,$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения трубопровода.

Поэтому

$$\Delta t = 2L \frac{\cos \alpha}{C^2 S} Q.$$

Основные трудности при использовании ультразвукового метода связаны с тем, что скорость звука в среде зависит от ее физико-химических свойств, температуры, давления. Скорость звука

## ДАТЧИКИ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

значительно превышает скорость движения среды, поэтому действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от его скорости в среде неподвижной.

Упомянутые трудности обуславливают применение специальных методов компенсации возникающих погрешностей.

Достаточно широкое использование ультразвуковых датчиков связано с их достоинствами, в число которых входят:

- отсутствие перепада давления на первичном преобразователе;
- высокое быстродействие, которое позволяет проводить измерение пульсирующих потоков с большой частотой пульсации;
- возможность работы на жидкостях с любыми значениями вязкости, а также на неэлектропроводных жидкостях.

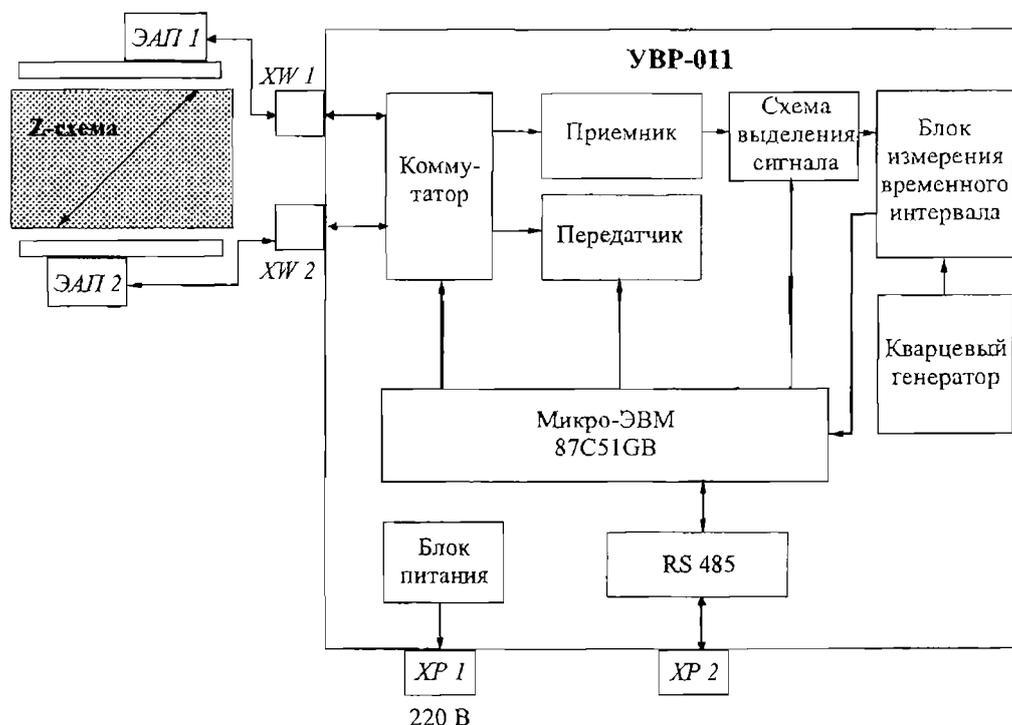


Рис. 1.57. Структурная схема ультразвукового время-импульсного расходомера УВР-011



В качестве излучателей и приемников в датчиках применяют пьезоэлектрические преобразователи, в которых используется прямой и обратный пьезоэффект.

На рис. 1.57 представлена функциональная схема ультразвукового датчика расхода УВР-011 с накладными электроакустическими преобразователями (ЭАП), смонтированными на внешней стороне трубопровода. Электронная схема измерения датчика выполнена на базе микропроцессора 87С51GB фирмы Intel.

Цикл измерения, инициируемый микро-ЭВМ, начинается с выбора одного из направлений излучения ультразвукового импульса, что достигается установкой коммутатора в соответствующее положение. При этом ЭАП2 излучает сигнал, а ЭАП1 принимает его.

Принятый сигнал через коммутатор поступает на схему выделения полезного сигнала, где происходят его усиление и фильтрация от помех. Определение времени распространения сигнала осуществляется в блоке измерения временного интервала, с выхода которого значения  $t_1$  поступают в микро-ЭВМ. Затем по команде микро-ЭВМ направление излучения изменяется на противоположное, после чего повторяется процедура измерения времени  $t_2$  распространения импульсов против потока. На этом процесс измерения завершается, и микро-ЭВМ осуществляет расчет текущего значения расхода жидкости.

Основные технические характеристики датчика расхода:

диапазон измерения, м <sup>3</sup> /ч	2,3...43000;
погрешность измерения, %, не более	1,5;
диапазон рабочих температур преобразователей, °С	-20...+100.

Датчик УВР-011 выпускает фирма "ТАХИОН" (Украина). Аналогичные датчики расхода выпускают также фирмы KROHNE (Германия) и PANAMETRICS (США).

## 1.10. Интеллектуальные датчики

Бурное развитие интегральной схемотехники привело к созданию принципиально новых измерительных преобразователей — интеллектуальных датчиков (ИД). Они содержат собственно преобразователь и микропроцессор в одном корпусе, что позволяет выполнять основные операции по преобразованию и повышению достоверности измерительной информации в месте ее возникновения.

Использование интеллектуальных датчиков предоставляет возможность по-новому подойти к распределению функций между основными элементами систем контроля и управления, в частности, — освободить центральный процессор от необходимости обработки больших объемов первичной информации.

Интеллектуальный датчик позволяет обеспечивать выполнение соответствующих функций, повышающих информативность выходного сигнала, формирование потока данных с необходимой достоверностью на основе анализа достаточно большого числа результатов отдельных, относительно недостоверных измерений.

Метрологические характеристики интеллектуальных датчиков оказываются лучше характеристик обычных датчиков.

ИД представляет собой совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих отображение свойств объекта контроля или управления в виде некоторой структуры данных, формируемых в результате обработки выходного сигнала измерительного преобразователя по определенному алгоритму.

Интеллектуальные датчики обладают следующими свойствами:

- способность к самонастройке, т.е. к изменению чувствительности и динамических характеристик в соответствии с диапазоном и скоростью изменения входной величины, а также к подавлению помех;
- адаптивность к условиям окружающей среды;
- способность к самодиагностике, включая коррекцию ошибок.



Можно предложить следующее определение такого датчика:

*Интеллектуальный датчик — это датчик, обладающий способностью автоматической адаптации к источнику сигнала и окружающей среде, а также способностью контролировать собственные функции и корректировать ошибки измерений.*

ИД представляет собой электронное устройство, основанное на объединении чувствительных элементов, схем преобразования сигналов и средств микропроцессорной техники.

Использование микропроцессоров и однокристалльных микро-ЭВМ непосредственно в составе датчиков обеспечивает возможность улучшения их метрологических и эксплуатационных характеристик.

По сравнению с традиционными датчиками ИД имеют следующие особенности, отмеченные ниже.

Алгоритмы улучшения статических характеристик ИД позволяют производить коррекцию нулевого сигнала и крутизны для линейных статических характеристик, корректировку масштаба измерительного тракта, линеаризацию статических характеристик.

Благодаря способности к самонастройке ИД выбирает наилучший диапазон измерения и посылает соответствующую информацию на верхний иерархический уровень системы. В случае выхода за границы выбранного диапазона измерений подается аварийный или предупредительный сигнал. В ИД возможна коррекция влияния помех и различных возмущений.

По сравнению с традиционными, интеллектуальные датчики обладают большей надежностью, поскольку позволяют:

— упростить измерительный преобразователь, используя возможности коррекции его характеристик при помощи программного обеспечения (в том числе посредством коррекции масштаба и внесения поправок на температуру);

— увеличивать число однотипных измерительных ячеек;

- свести к минимуму аналоговую часть — источник появления неисправностей и искажений;
- ввести системы автоматического контроля старения компонентов;
- контролировать состояние окружающей среды для обнаружения отклонений и исключения работы датчика вне установленных пределов;
- контролировать работоспособность отдельных элементов и узлов.

Программное обеспечение позволяет автоматически управлять процессом измерений, сменой диапазонов, переключением каналов измерений, частотой калибровки.

Связь ИД с управляющей ЭВМ и другими периферийными устройствами реализуется программными способами на общей шине.

Интеллектуальные датчики обеспечивают доступ к внутренней информации, которая может быть использована в целях диагностики и профилактического обслуживания. Через портативный пульт или пульт дистанционного управления ИД предоставляет оператору следующие сведения:

- о мгновенных значениях напряжений питания, результатах измерений;
- о совокупности параметров, занесенных в память перед возникновением неисправности;
- о дате последнего проведения контроля (калибровок, проверки нулевого сигнала и т.п.);
- о причинах устраненных отказов;
- о вторичных параметрах, превысивших допустимые пределы (внутренней температуре, абсолютном давлении и т.д.).



## Глава 2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

---

---

### 2.1. Электромеханические элементы

**Общая характеристика.** Исполнительным элементом (исполнительным устройством, исполнительным механизмом) в системе автоматического управления принято называть устройство, осуществляющее перемещение рабочего органа (регулирующего органа) в соответствии с управляющими сигналами, поступающими от чувствительного или управляющего элемента.

Рабочими органами могут быть различного рода дроссельные заслонки, клапаны, задвижки, рукоятки потенциометрических релюэтов, антенны радиолокаторов и многие другие регулирующие и запорные органы, способные изменять количество энергии или рабочего вещества, поступающего в объект управления. При этом перемещение рабочих органов может быть как поступательным, так и вращательным в пределах одного или нескольких оборотов.

Широкое распространение имеют исполнительные устройства, состоящие из следующих элементов:

а) исполнительного двигателя, служащего источником силового воздействия на рабочий орган;

б) передаточно-преобразовательного устройства (различного рода редукторы, храповики, муфты и т.д.), располагающегося между исполнительным двигателем и рабочим органом системы и предназначенного для получения определенной скорости, направления или характера движения последнего;

в) конечных выключателей, предназначенных для осуществления автоматической остановки или переключения исполнительно-



го устройства в конечных или промежуточных (при необходимости) положениях;

г) системы управления, включающей необходимую аппаратуру пуска, реверсирования, остановки, регулирования скорости, программирования (контакторы, пускатели, реле, золотники, клапаны и т.п.), защиты (реле максимального тока, предохранительные и запорные клапаны, реле давления и т.п.) и сигнализации (световые и звуковые сигнальные устройства).

Во многих случаях в функциональную схему исполнительного устройства могут входить и усилительные элементы (усилители), элементы обратной связи по скорости исполнительного двигателя и положению выходного органа, указатель его положения и др. В некоторых исполнительных устройствах судовых систем автоматического управления отдельные элементы могут отсутствовать.

На рис. 2.1 представлена в наиболее общем виде функциональная схема исполнительного устройства.

В исполнительных устройствах используются электромагниты постоянного и переменного тока, электродвигатели постоянного тока, двухфазные электродвигатели переменного тока, шаговые двигатели, электромагнитные муфты, гидравлические и электрогидравлические устройства, пневматические двигатели и т.д.

**Классификация электрических исполнительных устройств.** Все электрические исполнительные устройства, используемые в системах автоматики, можно разделить на две основные группы: электромагнитные и электродвигательные.

К *электромагнитным* исполнительным устройствам относятся соленоидные электроприводы, используемые для управления различного рода регулирующими и запорными клапанами, вентилями, золотниками и т.п.

К *электродвигательным*, наиболее распространенным, устройствам относятся исполнительные механизмы с электродвигателями. Электродвигательный исполнительный механизм состоит, как правило, из двигателя, редуктора и тормоза (последний иногда отсутствует). Сигнал управления поступает одновременно к двига-

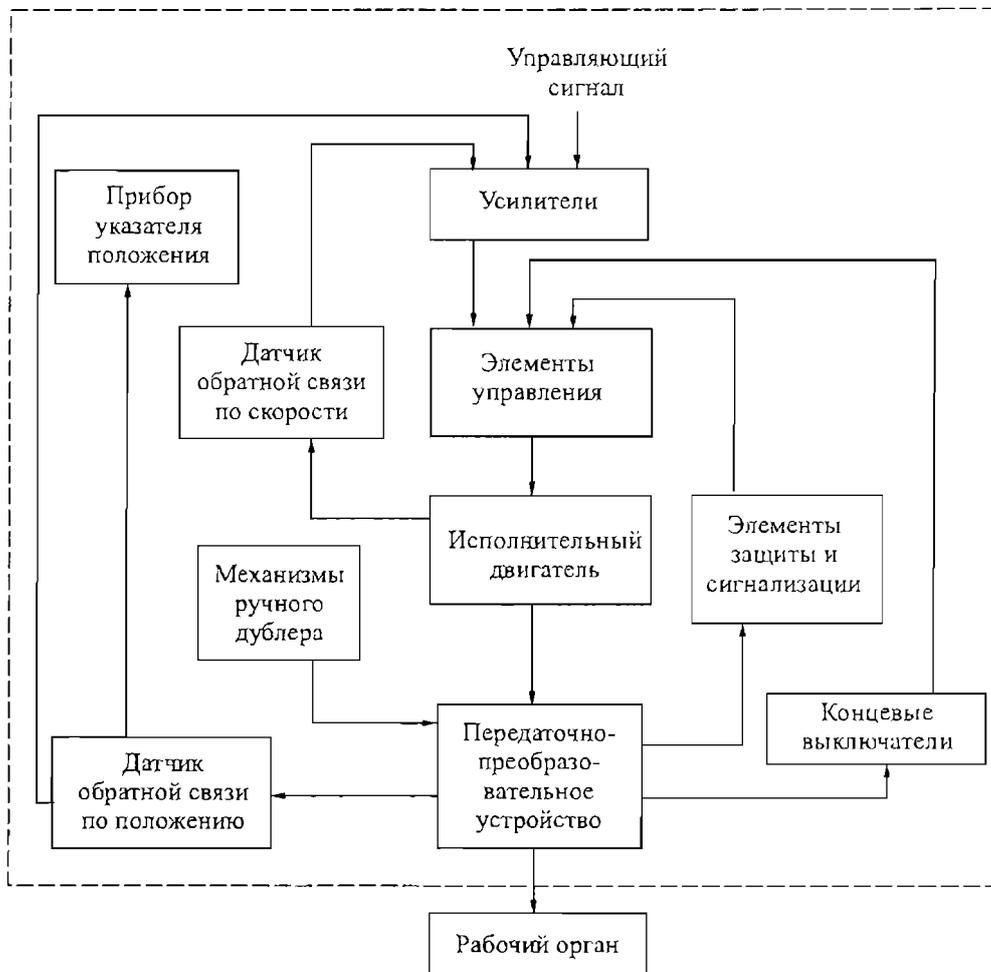


Рис. 2.1. Обобщенная схема исполнительного механизма

телю и тормозу, механизм растормаживается, и двигатель приводит в движение выходной орган. При исчезновении сигнала двигатель выключается, а тормоз останавливает механизм.

Простота схемы при малом числе элементов, участвующих в формировании регулирующего воздействия, и хорошие эксплуатационные свойства сделали управляемые двигатели основой создания исполнительных устройств современных систем автоматического управления.



В последнее время все более широкое распространение получают *бесконтактные* электрические исполнительные устройства, обладающие повышенной надежностью и позволяющие сравнительно легко получать как постоянную, так и переменную скорость перемещения рабочего органа. Отсутствие контактных аппаратов в рассматриваемых исполнительных устройствах — их важнейшее достоинство с точки зрения эксплуатации в судовых условиях.

Для бесконтактного управления исполнительными устройствами используют магнитные или полупроводниковые усилители, а также их сочетание.

Электрические исполнительные устройства с контактным и бесконтактным управлением можно подразделить по следующим признакам:

а) по назначению (с вращательным движением выходного вала — однооборотные и многооборотные; с поступательным движением выходного вала — прямоходные);

б) по характеру действия (позиционного действия, пропорционального действия).

*Однооборотные* исполнительные механизмы (выходной вал может вращаться в пределах одного полного оборота) характеризуются значением крутящего момента на выходном валу и временем его полного оборота. В отличие от однооборотных, *многооборотные* исполнительные устройства, выходной вал которых может осуществлять перемещение в пределах нескольких (а иногда значительного числа) оборотов, характеризуются также полным числом оборотов выходного вала.

Прямоходные устройства имеют поступательные движения выходного штока и оцениваются усилием на штоке, величиной полного хода штока и временем его перемещения на участке полного хода.

Часто оценка исполнительного устройства проводится не по времени одного оборота или полного хода, а по частоте вращения выходного органа для однооборотных и многооборотных

устройств и по скорости перемещения выходного органа для прямоходных устройств.

Для конструкции исполнительных устройств *позиционного* действия характерно то, что посредством их рабочие органы можно устанавливать только в определенные фиксированные положения. Чаще всего таких положений два: открытое и закрытое. Исполнительные устройства позиционного действия обычно не имеют датчиков обратной связи по положению выходного органа.

Конструктивная особенность исполнительных устройств *пропорционального* действия заключается в том, что они обеспечивают в заданных пределах установку рабочего органа в любое промежуточное положение, в зависимости от значения длительности управляющего сигнала.

### **2.2. Электродвигательные исполнительные устройства**

Исполнительными, или управляемыми, двигателями называются электрические машины, предназначенные для преобразования электрического сигнала — амплитуды или фазы напряжения управления — в частоту вращения или угол поворота вала.

Большинство исполнительных двигателей имеют две обмотки. К одной из них, обмотке возбуждения, постоянно подается питание из сети; к другой, обмотке управления, электрический сигнал подается лишь тогда, когда необходимо осуществить вращение или поворот вала.

В настоящее время в качестве электрических исполнительных двигателей применяются: двухфазные асинхронные двигатели, двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или постоянными магнитами, шаговые двигатели, электромагнитные муфты.

Исполнительные двигатели практически никогда не работают в установившемся режиме. Для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы. Энергетические показатели исполнитель-



ных двигателей: максимум полезной мощности, высокие значения КПД и  $\cos \varphi$  — не являются определяющими при оценке их качества.

Спецификой работы исполнительных двигателей в автоматических системах определяются следующие основные требования к ним: отсутствие самохода, устойчивая работа двигателя в заданном диапазоне изменения частоты вращения, широкий диапазон регулирования частоты вращения, линейность механических и регулировочных характеристик, большой пусковой момент, малая инерционность, малое напряжение трогания, малая мощность управления, надежность в работе, малые масса и габариты.

Явление самохода состоит в том, что исполнительный двигатель продолжает вращаться при снятом сигнале управления.

Устойчивая работа исполнительного двигателя зависит от его характеристик и характера момента сопротивления.

### **Электрические двигатели постоянного тока**

**Общие понятия.** Электродвигатели постоянного тока широко применяются в качестве исполнительных электродвигателей автоматических систем. В условиях непрерывной работы систем в переходных режимах особое значение приобретают динамические свойства исполнительных двигателей. Изучению этих свойств уделяется большое внимание.

Преимущественное применение в качестве исполнительных устройств систем автоматики имеют двигатели с независимым возбуждением. Их основное достоинство — жесткость механических характеристик и связанная с этим возможность получения устойчивого вращения под нагрузкой при низких скоростях. Отечественная промышленность выпускает такие двигатели с мощностью от десятков ватт до десятков киловатт. Однако их широкому применению препятствует наличие коллектора. Коллектор снижает надежность, усложняет эксплуатацию систем и ограничивает срок службы двигателей постоянного тока.

В исполнительных двигателях постоянного тока применяют электромагнитное возбуждение или постоянные магниты. В отличие от обычных двигателей постоянного тока, для уменьшения влияния вихревых токов в переходных процессах, в исполнительных двигателях шихтованными выполняют не только якорь, но и статор, и полюсы.

Исполнительные двигатели с независимым возбуждением имеют две обмотки: обмотку возбуждения, подключаемую к сети с постоянным напряжением  $U_{\text{в}} = \text{const}$ , и обмотку управления, на которую подается напряжение управления  $U_{\text{у}} = \text{var}$ . Для исполнительных двигателей применяют якорное или полюсное управление. При якорном управлении напряжение управления подается к обмотке якоря  $\text{Я}$ , которая представляет собой обмотку управления, а напряжение возбуждения — к обмотке полюсов, которая является обмоткой возбуждения (рис. 2.2, а). При полюсном управлении напряжение управления подается на обмотку полюсов, которая представляет собой обмотку управления а напряжение возбуждения через добавочный резистор  $R_{\text{доб}}$  — на обмотку якоря, которая является обмоткой возбуждения (рис. 2.2, б).

Исполнительные двигатели с постоянными магнитами имеют только якорное управление.

Исполнительным двигателям постоянного тока присущи следующие достоинства: широкий диапазон регулирования частоты вращения (рис. 2.3), линейность механических и регулировочных характеристик, отсутствие самохода, значительный пусковой момент, малые масса и габариты.

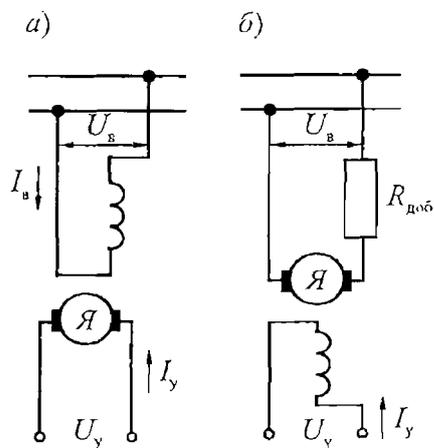


Рис. 2.2. Схемы включения исполнительных двигателей постоянного тока

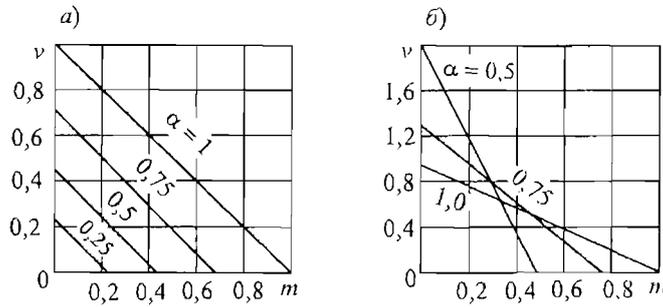


Рис. 2.3. Механические характеристики исполнительных двигателей постоянного тока: а — при якорном управлении; б — при полюсном управлении

На рис. 2.3, а показаны характеристики исполнительного двигателя постоянного тока с якорным управлением, где  $\nu = \omega / \omega_0$  — относительная угловая скорость;  $m = M / M_{п. ном}$  — относительный момент;  $\alpha$  — коэффициент сигнала, равный  $\alpha = U_y / U_B$ . На рис. 2.3, б представлены характеристики исполнительного двигателя постоянного тока с полюсным управлением (обозначения те же).

## Двухфазные асинхронные двигатели

**Общие понятия.** В качестве исполнительных двигателей переменного тока основное применение находят двухфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (рис. 2.4).

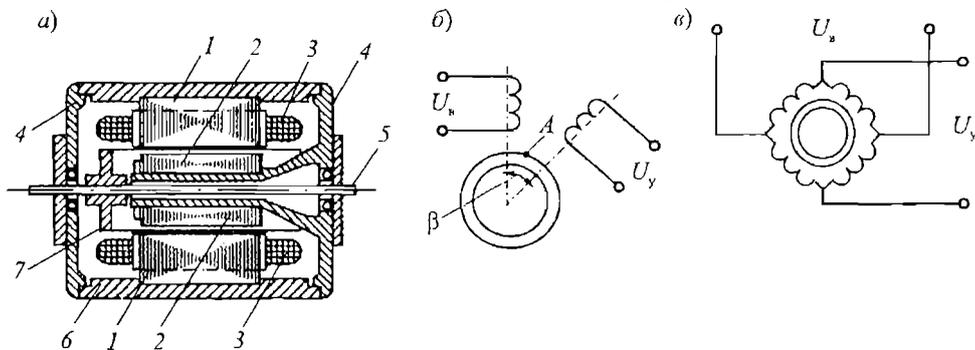


Рис. 2.4. Двухфазный асинхронный исполнительный двигатель: а — конструкция; б, в — схемы соединения обмоток

Исполнительный двигатель имеет две статорные обмотки, расположенные в пространстве под углом  $90^\circ$  одна относительно другой. Одна обмотка постоянно питается от сети с напряжением  $U_B$  и называется обмоткой возбуждения. К другой обмотке — обмотке управления — подается управляющее напряжение  $U_U$ .

В зависимости от конструкции короткозамкнутого ротора исполнительные двигатели бывают: с полым немагнитным ротором, с обычным короткозамкнутым ротором, с полым ферромагнитным ротором и с массивным ферромагнитным ротором.

На судах в основном применяют двухфазные асинхронные двигатели с полым ротором. Выпускаются двигатели мощностью от десятых долей ватта до нескольких сотен ватт. Двигатели используют при промышленной частоте (50 Гц) и повышенных частотах (200, 400, 500 и 1000 Гц). Конструктивное устройство двигателя представлено на рис. 2.4, а. Двигатель имеет два статора (внешний 1 и внутренний 2); ротор 7, выполненный в виде полого немагнитного цилиндра; корпус 6; подшипниковые щиты 4.

Внешний статор набирается из листов электротехнической стали и не отличается от статора обычной асинхронной машины. В его пазах располагаются обмотки управления и возбуждения 3. Статорные обмотки либо изолированы одна от другой (рис. 2.4, б), либо соединены по мостовой схеме (рис. 2.4, в). Внутренний статор 2 также набирается из электротехнической стали и служит для уменьшения магнитного сопротивления на пути магнитного потока, проходящего через воздушный зазор. Полый ротор 7 выполняется из сплавов алюминия. Дном ротор жестко крепится к валу 5. Толщина стенок ротора, в зависимости от мощности двигателя, колеблется в пределах от 0,2 до 1,0 мм.

Вследствие малой массы ротор обладает незначительным моментом инерции — это ценное свойство двигателя рассматриваемого типа. Величина зазоров между ротором и статором не превосходит 0,15...0,25 мм. С учетом толщины немагнитного ротора общая величина воздушного зазора между статорами составляет 0,5...1,5 мм.



Большая величина воздушного зазора приводит к росту намагничивающего тока, низкому коэффициенту мощности и малому КПД. Из-за большого намагничивающего тока приходится увеличивать размеры машины. По габаритам и массе двигатель с полым немагнитным ротором больше исполнительных двигателей постоянного тока той же мощности в 2...4 раза.

Принцип действия исполнительного двигателя состоит в следующем: под действием вращающегося магнитного поля (эллиптического или кругового), возникшего в результате протекания токов в статорных обмотках, в роторе создаются вихревые токи. Взаимодействие этих токов с вращающимся магнитным полем приводит к возникновению вращающего момента, который увлекает ротор в сторону вращения магнитного поля. Направление вращения результирующей МДС при эллиптическом и круговом вращающихся магнитных полях зависит от сдвига по времени между МДС, создаваемыми обмотками управления и возбуждения. Изменение фазы МДС обмотки возбуждения на  $180^\circ$  приводит к изменению направления вращения результирующей МДС и, следовательно, к реверсу двигателя.

Регулирование частоты вращения исполнительного двигателя осуществляют путем изменения напряжения управления  $U_y$  по модулю или фазе. На практике находят применение три способа управления (рис. 2.5):

- амплитудное, при котором изменяется амплитуда напряжения управления при его неизменной фазе (рис. 2.5, а);
- фазовое, при котором изменяется фаза напряжения управления при его неизменной амплитуде (рис. 2.5, б);
- амплитудно-фазовое, при котором одновременно изменяются амплитуда напряжения управления и сдвиг по фазе между напряжениями управления и возбуждения (рис. 2.5, в).

При всех способах управления изменение угловой скорости исполнительного двигателя происходит за счет деформации вращающегося магнитного поля. Максимальной угловой скоростью исполнительного двигателя окажется при круговом вращающемся

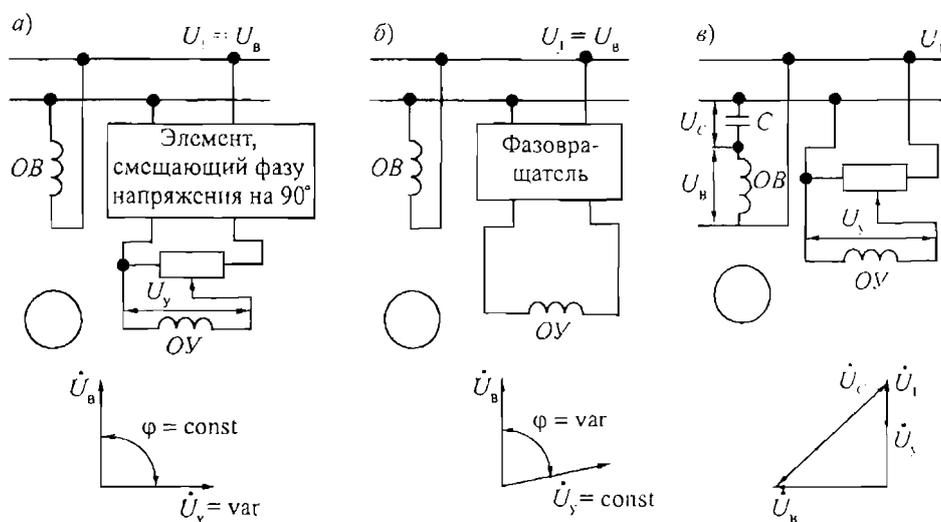


Рис. 2.5. Схемы управления двухфазными асинхронными исполнительными двигателями: а — амплитудное; б — фазовое; в — амплитудно-фазовое

магнитном поле, когда отсутствует обратное (тормозное) магнитное поле. Уменьшение угловой скорости достигается за счет увеличения эллиптичности магнитного поля, в результате чего возрастает обратное (тормозное) круговое поле. После преобразования эллиптического поля в пульсирующее исполнительный двигатель должен остановиться. Основное применение на судах находит амплитудно-фазовый способ управления (рис. 2.5, в).

Механические характеристики двухфазных асинхронных двигателей приведены на рис. 2.6. Здесь напряжения управления  $U_{y1} > U_{y2} > U_{y3}$ ;  $\omega_{дв}$  — уг-

ловая частота вращения двигателя;  $M_{дв}$  — момент двигателя.

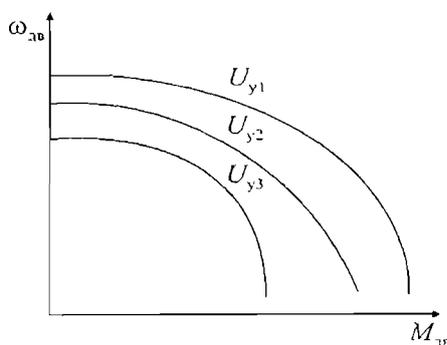


Рис. 2.6. Характеристики двухфазных асинхронных двигателей

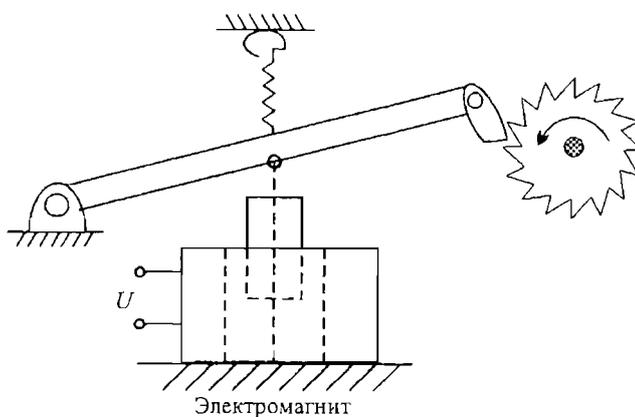


## Шаговые двигатели

**Общие понятия.** Шаговые двигатели (ШД) в подавляющем большинстве представляют собой многофазные многополярные синхронные машины без пусковой короткозамкнутой обмотки. Питание обмоток статора осуществляется прямоугольными однополярными или разнополярными импульсами напряжения. При однополярных импульсах напряжение меняется от нуля до  $U$ , при разнополярных — от  $U$  до  $-U$ . Заданная последовательность управляющих импульсов преобразуется в  $m$ -фазную систему однополярных или разнополярных импульсов с помощью коммутатора.

Импульсное питание ШД обуславливает дискретное угловое или линейное перемещение ротора двигателя. Шаговые двигатели с коммутатором осуществляют преобразование заданной последовательности импульсов в угол поворота вала. Под воздействием каждого управляющего импульса ротор совершает дискретное перемещение, называемое *шагом*. Величина шага определяется конструкцией двигателя и схемой коммутации его обмоток. Частота вращения и суммарный угол поворота вала пропорциональны частоте и числу импульсов управления.

Шаговые двигатели подразделяют на две группы по виду связи



между ротором и статором, которая может быть *кинематической* или *электромагнитной*.

На рис. 2.7 показан шаговый двигатель с электромагнитом и храповым колесом.

Подача питания в обмотку электромагнита приводит к пере-

Рис. 2.7. Шаговый искатель

мещению храпового колеса на определенный угол — шаг, величина которого определяется зубцовым делением храпового колеса. Для обеспечения реверса на валу электродвигателя устанавливаются два храповых колеса, повернутых на  $180^\circ$  одно относительно другого, и ШД имеет два электромагнита. Шаговые двигатели с храповым колесом нашли применение в телефонии в качестве привода шаговых искателей, в счетчиках импульсов, в программных автоматических системах регулирования.

Шаговые двигатели с кинематической связью имеют малое быстродействие — до 50 шагов в секунду. В автоматических системах регулирования такие ШД не находят широкого применения из-за низкого быстродействия и ограниченного срока службы.

Далее будут рассмотрены ШД с электромагнитной связью между статором и ротором. Эти ШД разделяют на активные и пассивные. Активные ШД имеют на роторе постоянные магниты (магнитоэлектрические ШД) или обмотку возбуждения (электромагнитные ШД). Пассивные ШД не имеют на роторе источника постоянного магнитного потока. В свою очередь, пассивные ШД делятся на реактивные и индукторные.

**Шаговые двигатели с активным ротором.** ШД с активным ротором подобны обычным синхронным двигателям. На роторе наиболее часто располагают постоянные магниты. Ротор имеет явно выраженные полюса. Для уменьшения величины шага полюса выполняют в виде магнитов — звездочек. Ограниченное число полюсов обуславливает сравнительно крупный шаг двигателей этого типа; обычно значение шага находится в пределах от  $15$  до  $90^\circ$ .

На рис. 2.8 представлена схема двухфазного магнито-электрического ШД.

На статоре ШД размещены обмотки двух фаз. Число полюсов статора кратно четырем. Фазные обмотки являются обмотками управления. Каждая такая обмотка состоит из катушек, охватывающих один зубец и соединенных последовательно встречно через одну. Обмотки управления смещены одна относительно другой на

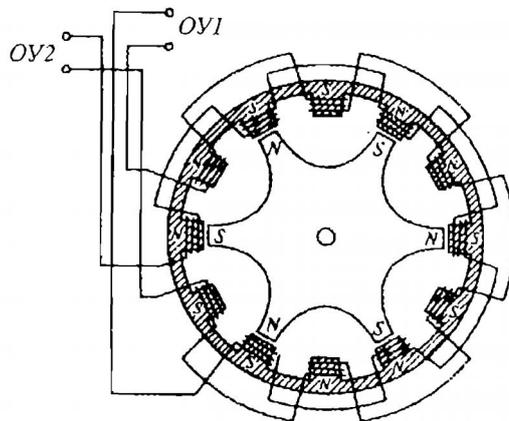


Рис. 2.8. Схема двухфазного шагового двигателя с активным ротором

одно зубцовое деление статора, т.е. на половину полюсного деления или на 90 эл. град. Ротор представляет собой звездочку из постоянных магнитов с числом полюсов, равным половине числа зубцов статора. При включении одной из обмоток управления зубцы статора возбуждаются через один с чередующейся полярностью. Полюса ротора ориентируются вдоль осей возбужденных зуб-

цов статора. При переключении обмоток управления ось результирующей МДС статора и ротор смещаются на одно зубцовое деление статора в ту или другую сторону, в зависимости от полярности напряжения очередной обмотки управления.

Для обеспечения реверса необходимо изменить полярность напряжения одной из обмоток управления, сохраняя очередность коммутации.

Рассмотренная схема переключения обмоток управления называется схемой четырехтактной разнополярной коммутации и обозначается следующим образом:

$$(+1) \rightarrow (+2) \rightarrow (-1) \rightarrow (-2) \rightarrow \dots$$

На рис. 2.9 приведены диаграммы токов обмоток управления ШД, соответствующие такой коммутации. Величина шага ротора составляет 30°.

Для лучшего использования обмоток в основном применяется схема четырехтактной коммутации с парным включением обмоток:

$$(+1)(+2) \rightarrow (+2)(-1) \rightarrow (-1)(-2) \rightarrow (-2)(+1) \rightarrow \dots$$

Парное включение обмоток увеличивает результирующую МДС, вследствие чего возрастает вращающий момент двигателя.

Иногда применяется схема восьмитактной коммутации  
 $(+1) \rightarrow (+1)(+2) \rightarrow (+2) \rightarrow (-1)(+2) \rightarrow (-1) \rightarrow (-1)(-2) \rightarrow$   
 $\rightarrow (-2) \rightarrow (-2)(+1) \rightarrow \dots,$

позволяющая вдвое уменьшить величину шага.

Управление двигателя, при котором для каждого устойчивого состояния возбуждается одинаковое число обмоток, называется симметричным. При возбуждении разного числа обмоток управление оказывается несимметричным.

Число тактов  $k_T$  схемы управления соответствует угловому перемещению результирующего магнитного потока статора на 360 эл. град. Число тактов схемы управления составляет

$$k_T = \gamma_1 \gamma_2 m_y,$$

где  $m_y$  — количество обмоток управления;  $\gamma_1$  — коэффициент, равный 1 при симметричной и 2 при несимметричной коммутации;  $\gamma_2$  — коэффициент, равный 1 при однополярной и 2 при разнородной коммутации.

Шаг двигателя определяется выражением

$$\alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{k_T p},$$

где  $p$  — число пар полюсов ротора.

Величина шага в электрических градусах составляет

$$\alpha_e = \frac{360^\circ}{k_T}.$$

Четырехфазная обмотка ШД представляет собой вариант двухфазной. Она получается путем расщепления каждой фазы двух-

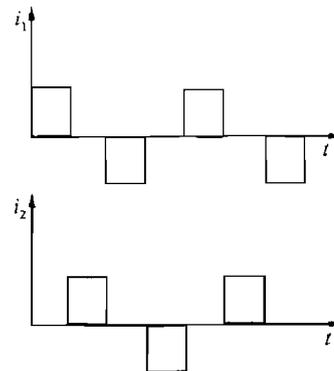


Рис. 2.9. Диаграммы токов  $i_1, i_2$  обмоток управления

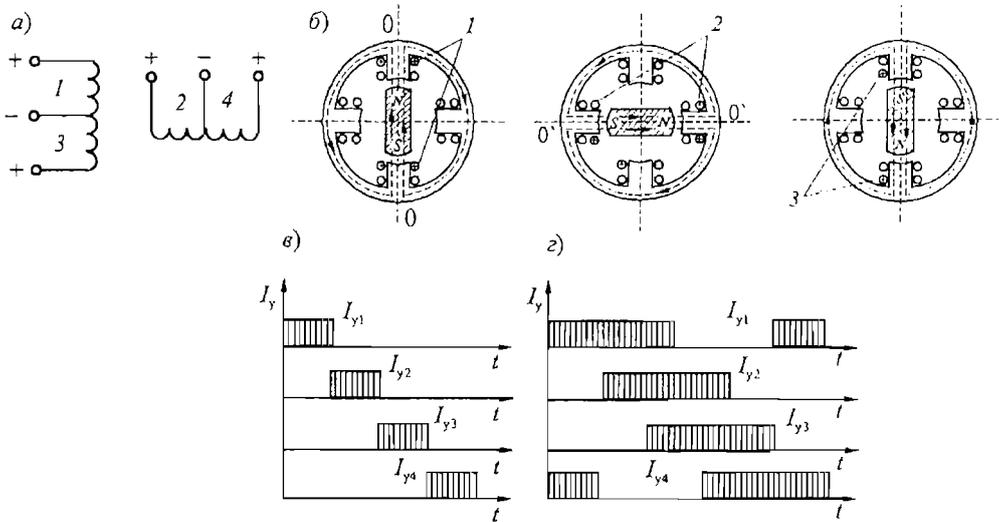


Рис. 2.10. Четырехфазный шаговый двигатель с активным ротором: а — расположение обмоток управления; б — положения ротора; в — диаграммы токов при однополярной четырехтактной коммутации; г — диаграммы токов при однополярной четырехтактной парной коммутации

фазной обмотки. В отличие от двухфазных четырехфазные ШД могут управляться однополярными импульсами напряжения, что упрощает коммутатор. При подключении к коммутатору фазы соединяются в четырехлучевую звезду с общей точкой (рис. 2.10, а).

На рис. 2.10, б, показаны три последовательных положения ротора ШД, соответствующие протеканию тока управления в обмотках 1, 2, 3 (при подаче питания в обмотку 4 ротор повернется в ту же сторону еще на  $90^\circ$ ). В ШД применена однополярная четырехтактная коммутация (рис. 2.10, в):

$$(+1) \rightarrow (+2) \rightarrow (+3) \rightarrow (+4) \rightarrow \dots$$

Величина шага  $\alpha_{\text{ш}} = 90^\circ$ . Реверс ШД осуществляется путем изменения порядка коммутации тока в фазах.

В четырехфазных ШД наиболее часто применяется однополярная четырехтактная парная коммутация (рис. 2.10, г):

(+1)(+2) → (+2)(+3) → (+3)(+4) → (+4)(+1) → ...

При парной коммутации импульсы тока перекрывают один другой на полтакта, поэтому в каждый момент времени ток протекает по паре обмоток соседних полюсов. Парная коммутация приводит к увеличению МДС статора и росту вращающего момента.

Магнитоэлектрические ШД выполняются с шагом до 15°. Дальнейшее уменьшение шага вызвано технологическими трудностями создания ротора с большим числом пар полюсов.

**Реактивные и индукторные шаговые двигатели.** Статор и ротор *реактивного* ШД набираются из листов магнитомягкой электротехнической стали. Магнитная система ШД состоит из зубчатого ротора с равномерно расположенными зубцами и статора с явно выраженными полюсами. Полюса статора имеют на торцах продольные пазы, вследствие чего каждый полюс имеет несколько зубцов. Геометрические размеры пазов и зубцов статора и ротора одинаковы. Число зубцов статора и ротора выбирают такими, чтобы обеспечить необходимую величину шага. На рис. 2.11 приведена схема трехфазного реактивного ШД.

Магнитная система ШД состоит из статора с шестью явно выраженными полюсами, имеющими зубцы, и ротора с 40 зубцами. При выбранном соотношении чисел зубцов ротора и статора зубцы ротора соосны с зубцами одной диаметрально расположенной пары полюсов статора и смещены на 1/3 зубцового деления соответственно по часовой стрелке и против нее по отношению к зубцам двух других пар полюсов. При трехтактной коммутации обмоток управления магнитный поток статора поворачивается на 120°, а ротор — на шаг, равный 1/3 зубцово-

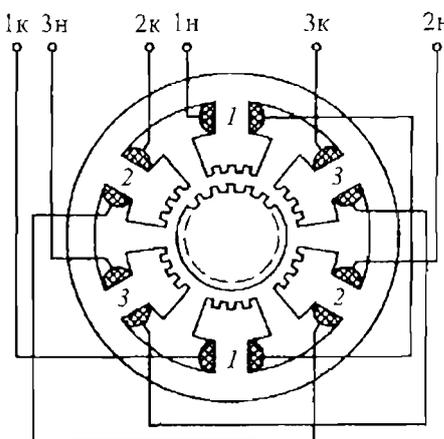


Рис. 2.11. Схема реактивного шагового двигателя



го деления статора, что составляет  $3^\circ$ . Для осуществления реверса необходимо изменить порядок коммутации обмоток управления. При несимметричном управлении — шестиконтактной схеме коммутации — шаг ротора равен  $1^\circ 30'$ .

В реактивном ШД изменение направления магнитного поля не влияет на положение ротора. Ротор стремится занять положение, соответствующее максимальной магнитной проводимости с возбужденным полюсом.

С учетом независимости положения ротора от полярности управляющих импульсов выражение для числа тактов системы управления  $k_T$  примет другой вид:

$$k_T = \gamma_1 m_y.$$

В реактивном ШД полный период изменения магнитного поля в воздушном зазоре соответствует повороту ротора относительно статора на одно зубцовое деление, поэтому зубец и паз ротора эквивалентны паре полюсов и соответствуют  $360$  эл. град. Шаг двигателя определяется выражением

$$\alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{k_T z_p},$$

где  $z_p$  — число зубцов ротора.

В электрических градусах

$$\alpha_e = z_p \alpha_{ш} = \frac{360^\circ}{k_T}.$$

*Индукторные ШД* отличаются от реактивных наличием постоянной составляющей магнитного потока в воздушном зазоре, которая создается либо постоянной составляющей тока обмоток управления, либо специальной обмоткой или постоянным магнитом. При этом улучшаются энергетические и динамические характеристики.

На рис. 2.12 представлена схема четырехфазного индукторного шагового двигателя с независимым электромагнитным возбужде-

нием. Постоянный магнитный поток создается специальной обмоткой возбуждения.

**Основные режимы работы и характеристики.** В зависимости от частоты и характера изменения управляющих импульсов различают следующие режимы работы ШД: статический, квазистатический, установившийся, переходный.

*Статическим* называется режим, при котором по обмоткам управления проходит постоянный ток ( $f = 0$ ), создающий неподвижное в пространстве магнитное поле. Основная характеристика статического режима — зависимость статического синхронизирующего момента  $M_c$  от угла рассогласования в электрических градусах  $\theta_e$  между осью МДС обмоток управления и осью ротора.

Статический синхронизирующий момент  $M_c$  — момент, устанавливающий ось ротора в согласованное положение с осью МДС обмоток управления. Он определяется как производная магнитной энергии двигателя по углу поворота ротора:

$$M_c = \frac{dW_M}{d\theta}.$$

Магнитная энергия  $W_M$  является периодической функцией угла электрического рассогласования ротора:  $W_M = W_M(\theta_e)$ . Статический синхронизирующий момент также является периодической функцией, которая может быть определена рядом Фурье. Для ШД с симметричной магнитной системой в целях упрощения учитывают только первую гармоническую составляющую (рис. 2.13), т.е.

$$M_c = -M_m \sin \theta_e.$$

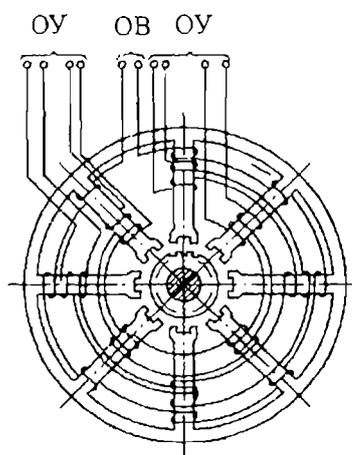


Рис. 2.12. Схема индукторного шагового двигателя

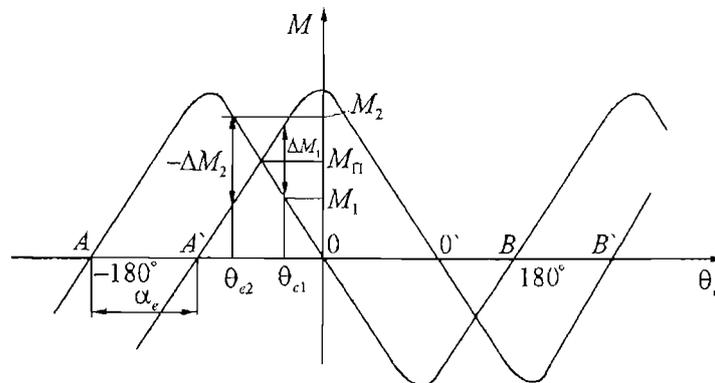


Рис. 2.13. Кривые статического синхронизирующего момента

Характеристика статического синхронизирующего момента (рис. 2.13) имеет точку устойчивого равновесия  $O$  и точки неустойчивого равновесия  $A$  и  $B$ .

В точке устойчивого равновесия  $O$  оси полюсов (зубцов) статора и ротора совпадают. В точках неустойчивого равновесия  $A$  и  $B$  полюс (зубец) ротора находится против паза статора. Зоной статической устойчивости является окрестность точки устойчивого равновесия  $O$  (при  $M_c = 0$ ), из любой точки которой после снятия возмущающего воздействия ротор возвращается в точку  $O$ , не проходя точек неустойчивого равновесия  $A$  и  $B$ . Зона статической устойчивости равна отрезку  $AB$ . Для ШД с симметричной магнитной системой зона статической устойчивости симметрична относительно точки  $O$ .

При переключении обмоток управления происходит скачкообразное перемещение вектора МДС статора на один шаг. Если время протекания электромагнитных переходных процессов значительно меньше, чем механических, то переключению обмоток управления соответствует мгновенное смещение на шаг кривой статического синхронизирующего момента, как показано на рис. 2.13.

Пусковым моментом ШД называется наибольший момент нагрузки, при котором возможен пуск и дальнейшая работа двигателя.

ля. Пусковой момент  $M_{\Pi}$  определяется точкой пересечения исходной кривой статического синхронизирующего момента со смещенной характеристикой.

При  $M_1 < M_{\Pi}$  после переключения обмоток управления синхронизирующий момент возрастает на величину  $\Delta M_1 > 0$ , вследствие чего ротор перемещается на один шаг в новое положение, когда  $M_c = M_1$  и  $\Delta M = 0$ . При  $M_2 > M_{\Pi}$  синхронизирующий момент будет иметь отрицательное приращение  $\Delta M_2 < 0$ , вследствие чего ротор не будет следовать за МДС статора, что приведет к сбою в работе ШД. Значение пускового момента зависит от шага двигателя. Как видно из рис. 2.13, при  $\alpha_e = 180^\circ$  пусковой момент  $M_{\Pi} = 0$ . Следовательно, для обеспечения отличного от нуля пускового момента минимально необходимое количество тактов коммутации должно быть больше двух ( $k_T > 2$ ). Поэтому ШД с активным ротором с разнополярной коммутацией должны иметь не менее двух обмоток управления, а ШД с пассивным ротором — не менее трех. Для ШД с несимметричной магнитной системой необходимо иметь одну обмотку управления и  $k_T = 2$ . С увеличением количества обмоток управления предельный момент нагрузки стремится к максимальному синхронизирующему моменту. В пределе, когда  $k_T \rightarrow \infty$  и  $\alpha_e \rightarrow 0$ , характеристики ШД совпадают с характеристиками синхронного двигателя. Дискретное перемещение вектора результирующей МДС и кривой статического синхронизирующего момента — главное отличие ШД от синхронных двигателей.

*Квазистатический* режим работы — это режим отработки единичных шагов. В квазистатическом режиме переходные процессы, сопровождающие отработку шага, к началу следующего шага полностью заканчиваются, и угловая скорость ротора в начале каждого шага равна нулю. Предельная частота управляющих импульсов, при которой наблюдается квазистатический режим, определяется временем протекания электромагнитных и механических переходных процессов.

*Установившийся* режим работы ШД соответствует постоянной частоте управляющих импульсов. В установившемся режиме ро-



тор двигателя, имея постоянную угловую скорость, может совершать как периодические, так и аperiodические колебания. При переходе ротора от одного устойчивого положения к другому происходят колебания, вызванные инерцией ротора. Амплитуда колебаний максимальна в режиме холостого хода. Если переключение обмоток управления произойдет в тот момент, когда ротор в процессе колебаний отклонится за точку  $A$  в сторону, противоположную направлению перемещения, то ротор переместится в предшествующую точку равновесия (сдвинутую относительно точки  $O$  на  $360^\circ$ ), вследствие чего произойдет сбой ШД. По этой причине для правильной работы двигателя необходимо, чтобы в момент переключения обмоток управления ротор находился в определенной зоне — зоне динамической устойчивости.

Зоной динамической устойчивости называется окрестность точки устойчивого равновесия  $O$  на исходной характеристике статического синхронизирующего момента, из любой точки которой ротор после окончания переключения обмоток управления попадает в точку устойчивого равновесия  $O'$  смещенной характеристики, не проходя точек неустойчивого равновесия  $A'$  и  $B'$  (см. рис. 2.13).

Зона динамической устойчивости несимметрична относительно исходной точки устойчивого равновесия. Отрицательная часть этой зоны  $OA'$  меньше положительной части  $OB'$ .

Установившийся режим работы оценивается предельными механическими характеристиками, которые представляют собой зависимость допустимого момента сопротивления от частоты управляющих импульсов.

Снижение допустимого момента сопротивления с ростом частоты импульсов объясняется электромагнитными процессами, протекающими в обмотках управления ШД.

С ростом частоты за время импульса ток обмоток управления не достигает установившегося значения, что приводит к снижению синхронизирующего момента и, следовательно, допустимого момента сопротивления.

Переходные процессы имеют место при пуске, торможении, ускорении, замедлении и реверсе ШД. Это основные эксплуатационные режимы ШД. Переходные процессы в переходных режимах определяются как параметрами самого двигателя и нагрузки, так и начальными условиями, при которых начинается соответствующий процесс.

Пуск ШД осуществляется из неподвижного состояния путем скачкообразного увеличения частоты управляющих импульсов. Максимальная частота импульсов, при которой двигатель втягивается в синхронизм без потери шага, называется *частотой приемистости*  $f_{\text{пр}}$ . Она возрастает с увеличением максимального синхронизирующего момента, с уменьшением шага, а также со снижением постоянной времени обмоток управления, нагрузки и момента инерции привода. Торможение двигателя осуществляется путем скачкообразного уменьшения частоты управляющих импульсов до нуля. Реверс ШД осуществляется путем изменения порядка коммутации обмоток управления.

**Автоматическая система измерения длины якорной цепи с использованием шагового двигателя.** В большинстве случаев измерение длины якорной цепи осуществляется косвенным образом — путем измерения числа оборотов якорной звездочки. Каждому обороту якорной звездочки соответствует определенная длина якорной цепи. В рассматриваемой системе измерение числа оборотов якорной звездочки производится посредством магнитоуправляемых контактов МУК (рис. 2.14).

Четыре магнитоуправляемых контакта расположены на фундаментной стойке подшипника брашпиля. Постоянные магниты располагаются на якорной звездочке. Количество постоянных магнитов зависит от диаметра якорной звездочки. Расстояние между магнитами и МУК равно 10 м.

Магнитоуправляемые контакты служат для управления электронным коммутатором, который построен на транзисторах  $VT1—VT4$ , работающих в ключевом режиме. При вращении якорной звездочки под действием постоянных магнитов происходит

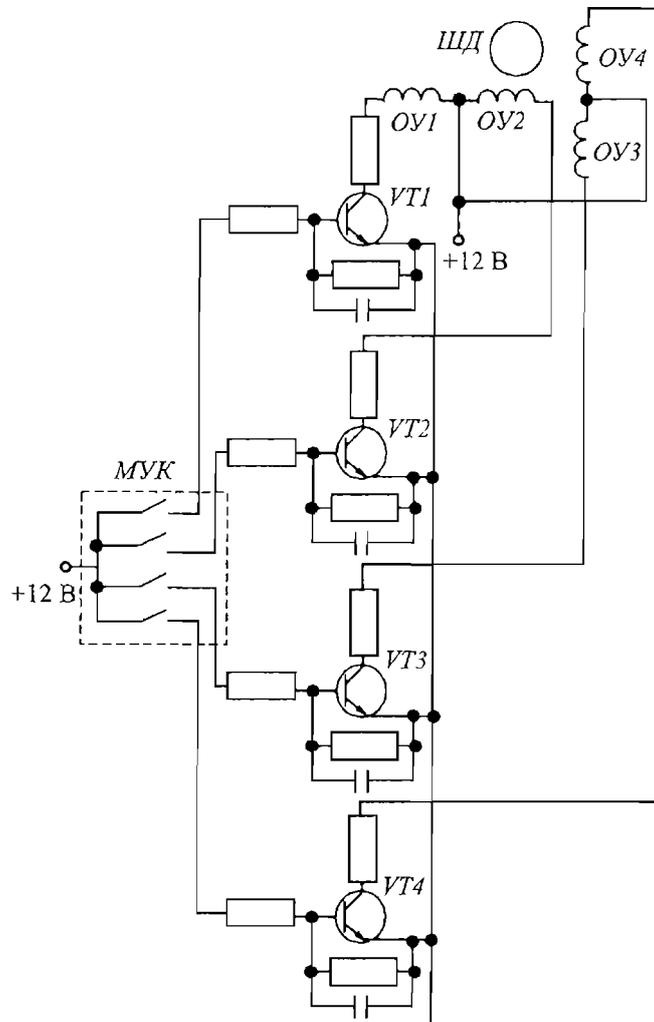


Рис. 2.14. Схема измерения длины якорной цепи

замыкание магнитоуправляемых контактов. Это приводит к подаче положительного потенциала на базы соответствующих транзисторов, в результате чего они открываются. При открытии транзисторов получают питание обмотки управления *ЩД*, что вызывает поворот его ротора (рис. 2.14).

За один оборот якорной звездочки происходит несколько замыканий *МУК*, и ротор *ЩД* поворачивается на определенный угол. При изменении направления вращения якорной звездочки изменя-

ется порядок коммутации магнитоуправляемых контактов, что приводит к реверсу ШД. С ротором ШД связана стрелка счетного устройства, по которому можно судить о длине якорной цепи — как при спуске, так и при подъеме якоря.

В автоматической системе применяется четырехфазный ШД с активным ротором. На роторе расположены 24 постоянных магнита. Шаг двигателя составляет  $7^{\circ}30'$ .

### Электромагнитные муфты

**Общие понятия.** Муфты служат для передачи вращения от одного вала (ведущего), соединенного с приводным двигателем, к другому валу (ведомому), связанному с приводным механизмом. В электромагнитных муфтах для передачи механического момента используются электромагнитные явления. Приводной двигатель в приводе с электромагнитными муфтами представляет собой источник механической мощности и может работать на любом виде энергии. В качестве приводного могут быть использованы наиболее надежные нерегулируемые асинхронные двигатели, обладающие хорошими энергетическими показателями. Электромагнитные муфты являются управляющими элементами. С помощью их производится передача энергии от приводного двигателя к нагрузке. На судах нашли применение фрикционные муфты.

Принцип действия фрикционных муфт основан на использовании сил трения (рис. 2.15).

Фрикционная муфта состоит из ведущей 4 и ведомой 7 полумуфт. Ве-

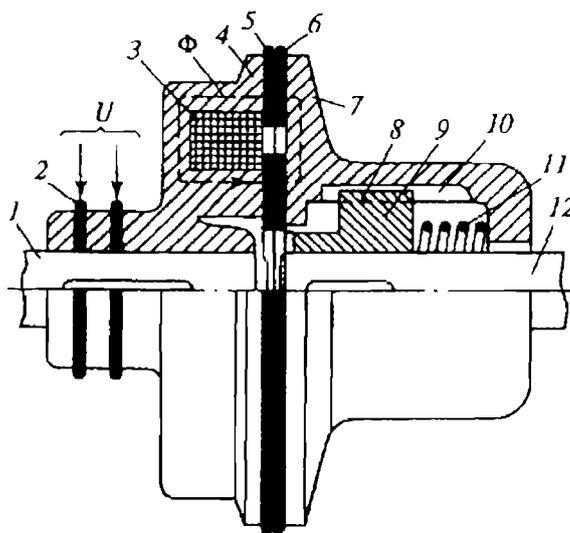


Рис. 2.15. Электромагнитная фрикционная муфта



домая полумуфта имеет пазы 10, в которые входят шлицы 8. Эта полумуфта может перемещаться вдоль ведомого вала 12. В ведущей полумуфте находится электромагнит 3, к которому через щетки и кольца 2 подается напряжение постоянного тока. В обесточенном состоянии пружина 11, упираясь в направляющую втулку 9, отодвигает ведомую полумуфту вправо. Ведомый 12 и ведущий 1 валы разобщены.

При подаче питания в электромагнит 3 ведомая полумуфта притягивается и прижимает фрикционный диск 6 к фрикционному диску 5. При соприкосновении фрикционных дисков возникают силы трения и происходит передача вращающего момента от ведущего вала к ведомому.

При отключении питания электромагнита под действием возвратной пружины ведомая полумуфта возвращается в исходное состояние. У большинства электромагнитных муфт форма фрикционных поверхностей плоская, в виде сплошных или расчлененных дисков.

В зависимости от количества сопряженных фрикционных пар электромагнитные муфты делятся на *однодисковые* и *многодисковые*. Число пар фрикционных муфт большого размера доходит до 20. В муфтах используются следующие фрикционные пары: сталь по стали и сталь по ферродо. В зависимости от конструкции электромагнитных систем муфты делятся на содержащие подвижные или неподвижные катушки. У муфт с подвижной катушкой имеются контактные кольца, у муфт с неподвижной — воздушные зазоры, отделяющие неподвижную часть магнитопровода. Крутящий момент, передаваемый муфтой, определяется выражением:

$$M = \frac{1}{k_3} \eta_{\text{тр}} R_{\text{ср}} (m-1) P_3,$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  — коэффициент трения;  $R_{\text{ср}}$  — средний радиус дисков;  $m$  — число дисков;  $P_3$  — электромагнитная сила;  $k_3$  — коэффициент запаса.

Рассмотрим процесс подключения ведомой полумуфты (рис. 2.16).

После подачи питания ток в катушке муфты изменяется по экспоненциальному закону. Через время трогания  $t_{тр}$  электромагнитная сила становится равной усилию пружины, и ведомая муфта начинает перемещаться

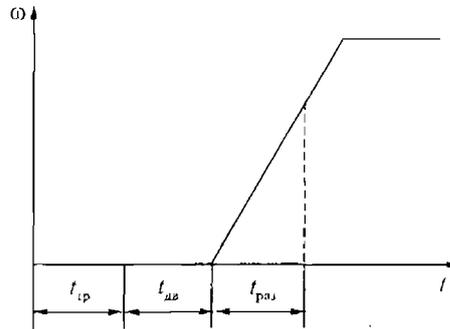


Рис. 2.16. График процесса включения муфты

вдоль вала. Время трогания определяется протеканием электромагнитных процессов в катушке. Спустя некоторое время фрикционные диски приходят в соприкосновение. Время движения  $t_{дв}$  зависит от массы ведомой полумуфты и согласования тяговой и механической характеристик. После соприкосновения дисков начинается разгон ведомой полумуфты, при котором происходит проскальзывание поверхностей трения и уменьшение угловой скорости приводного двигателя до тех пор, пока не наступит полное сцепление. Время разгона  $t_{разг}$  равно времени, протекающему от момента соприкосновения дисков до момента их полного сцепления. После разгона угловая скорость ведомого вала становится равной угловой скорости ведущего вала. Сцепление дисков приводит к набросу нагрузки на приводной двигатель, что вызывает снижение его угловой скорости. Поэтому процесс подключения заканчивается разгоном ведомой полумуфты до номинальной угловой скорости.

Полное время подключения фрикционных электромагнитных муфт измеряется сотыми и десятными долями секунды.

Вследствие скольжения фрикционных дисков происходит сильный износ поверхностей трения. Фрикционные муфты имеют остаточный вращающий момент холостого хода, передаваемый муфтой при отключенной катушке. Этот момент появляется вследствие залипания фрикционных дисков и перекосов, возникающих при сборке и во время эксплуатации. Мощность холостого



хода муфты расходуется на преодоление сил трения и целиком преобразуется в тепло, которое вызывает нагрев муфты в отключенном состоянии.

Пуск, торможение и вращение муфты при отключенной катушке связаны со скольжением между фрикционными дисками, приводящим к выделению тепла. Для уменьшения нагрева на корпусе муфты предусмотрены охлаждающие ребра. При нормальной работе температура в области катушки не должна превышать  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а фрикционные диски не должны нагреваться свыше  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В фрикционных электромагнитных муфтах для питания катушки, как правило, применяют постоянный ток. Такие муфты используются для жесткого соединения валов. Если для питания катушки муфты использовать прямоугольные импульсы напряжения с постоянной частотой и переменной скважностью, то можно осуществить гибкое сцепление валов. При этом во время импульса ведомый вал разгоняется, а во время паузы тормозится. Средняя частота вращения ведомого вала будет зависеть от скважности импульсов.

К основным достоинствам фрикционной муфты как исполнительного устройства относятся простота конструкции и малая мощность управления (при передаваемой мощности до нескольких киловатт мощность в цепи управляющего электромагнита имеет порядок нескольких ватт). Основные недостатки — неплавный характер изменения скорости регулирования и износ поверхностей трения.

### **2.3. Электромагнитные исполнительные устройства**

В системах регулирования релейного типа в качестве исполнительных механизмов используются электромагнитные приводы, преобразующие энергию электрического тока в поступательное движение регулирующего органа. Такие приводы, которые пред-

ставляют собой прямоходовой электромагнит со втягивающимся якорем, называют также *соленоидными* (рис. 2.17).

В отечественной практике в настоящее время наибольшее распространение получили электромагнитные приводы серии ЭВ, предназначенные для управления различными клапанами, вентилями, задвижками по схеме “включено/выключено”. По принципу действия такие приводы подразделяют на две группы.

К *первой* группе относят электромагнитные приводы, в которых при подаче напряжения на катушку электромагнита этого привода его якорь втягивается, открывая вентиль, а при снятии напряжения — опускается, закрывая вентиль.

Ко *второй* группе относятся электромагнитные приводы, имеющие катушку главного (тягового) электромагнита и катушку защелки. При поступлении тока в катушку главного электромагнита его якорь втягивается и открывает регулирующий орган, который удерживается в открытом положении защелкой. Главный электромагнит обесточивается концевым выключателем, когда регулирующий орган открывается полностью. При появлении сигнала на закрывание регулирующего органа питание поступает в катушку электромагнита защелки, которая освобождает регулирующий орган, и он движется под действием пружины возврата. Конечный выключатель в положении “закрото” отключает цепь питания электромагнита защелки.

Катушки главного электромагнита и электромагнита защелки состоят из двух секций, рассчитанных на питание от сети постоянного тока 110 В, а при последовательном соединении — от сети

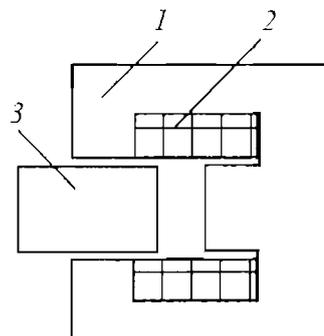


Рис. 2.17. Основные части электромагнитного исполнительного устройства: 1 — магнитопровод; 2 — обмотка электромагнита; 3 — втягивающийся якорь



напряжением 220 В. При работе от сети переменного тока в цепи питания включают выпрямители.

Достоинства электромагнитных устройств — простота их изготовления, надежность, высокое быстродействие.

## **2.4. Гидравлические и пневматические элементы**

**Общая характеристика.** В гидравлических и пневматических элементах происходит преобразование энергии потока жидкости или газа в механическую энергию перемещения поршня или вращения вала.

Гидравлические и пневматические элементы обычно строятся по одной принципиальной схеме. Отличия элементов обусловлены различными свойствами жидкости и газа.

Необходимо отметить некоторые особенности гидравлических элементов. К их достоинствам относятся: малая инерционность, связанная со слабой сжимаемостью жидкости; небольшие масса и объем на единицу мощности; низкая выходная скорость, не требующая редуцирования. К недостаткам следует отнести необходимость использования специальных жидкостей, наличие насосной установки, жесткие требования относительно герметизации системы.

Пневматические элементы взрыво- и пожаробезопасны, имеют легкую и компактную конструкцию. К пневматическим элементам не предъявляются жесткие требования относительно герметизации системы. В то же время значительная сжимаемость газов вызывает запаздывание в работе пневматических элементов. Для них требуются специальные источники питания. При использовании пневматических элементов предъявляются высокие требования к чистоте воздуха: в нем не должно быть пыли и влаги.

Гидравлические и пневматические элементы требуют высоко-го класса изготовления. Учитывая одинаковый принцип действия гидравлических и пневматических элементов, ниже подробно будут рассмотрены только гидравлические исполнительные элементы.

## Гидравлические исполнительные элементы с золотниковым управлением

Принципиальная схема исполнительного элемента представлена на рис. 2.18.

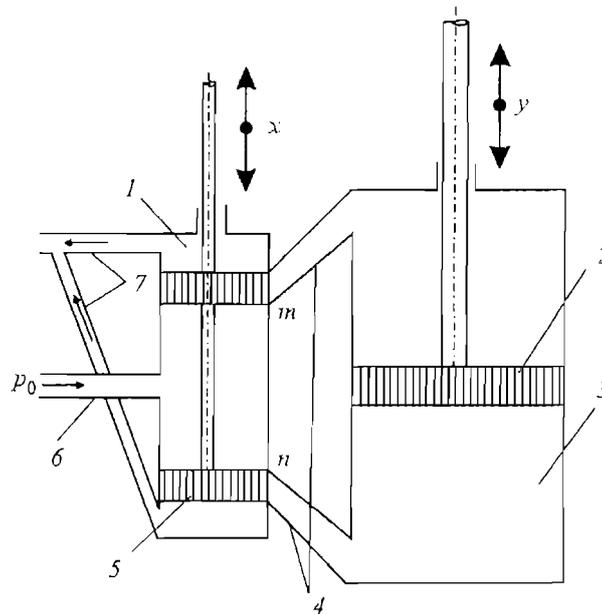


Рис. 2.18. Гидравлический исполнительный элемент с золотниковым устройством

К цилиндрическому золотнику 1 по трубе 6 специальным насосом под давлением  $p_0$  подается жидкость. Подвижная часть золотника представляет собой двойной поршень 5, который в нейтральном положении закрывает одновременно оба окна  $m$  и  $n$  каналов 4, соединяющих полость золотника с цилиндром исполнительного механизма 3. Перекрытия окон зависят от конструкции золотника.

Наиболее широко распространены золотники с малыми положительными или отрицательными перекрытиями. При смещении штока золотника вверх от нейтрального положения верхняя часть цилиндра исполнительного механизма через золотник соединяется с напорной трубкой 6, а нижняя — со сливной трубкой 7. Благодаря разности давлений, образующихся по обе стороны поршня 2,



поршень будет двигаться вниз. При смещении штока золотника вниз из нейтрального положения поршень 2 перемещается вверх.

Входной величиной исполнительного элемента служит перемещение  $x$  штока золотника, выходной — перемещение  $y$  штока поршня исполнительного механизма (ИМ).

Выходная мощность перемещения штока поршня 2, определяемая источником вспомогательной энергии двигателя насоса, значительно больше мощности, затрачиваемой на перемещение золотника.

Скорость перемещения поршня ИМ определяется объемом жидкости — втекающей в цилиндр и вытекающей из него за единицу времени.

При пропорциональном изменении площади проходного отверстия окна от перемещения золотника  $x$  расход жидкости  $Q$ , поступающей в цилиндр ИМ, пропорционален перемещению  $x$ , поэтому

$$Q = k_1 x$$

или

$$VS = k_1 x, \quad (2.1)$$

где  $V$  — скорость перемещения поршня ИМ;  $S$  — эффективная площадь поршня.

Из выражения (2.1) можно получить следующее

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k_1}{S} x = kx. \quad (2.2)$$

Полученное уравнение (2.2) соответствует идеальному интегрирующему звену.

Если учитывать второстепенные факторы, можно получить более сложные и трудноприменимые выражения.

Обычно рассмотренный элемент считают идеальным интегрирующим звеном с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{p}.$$

На рис. 2.19 приведена статическая характеристика гидравлического исполнительного элемента.

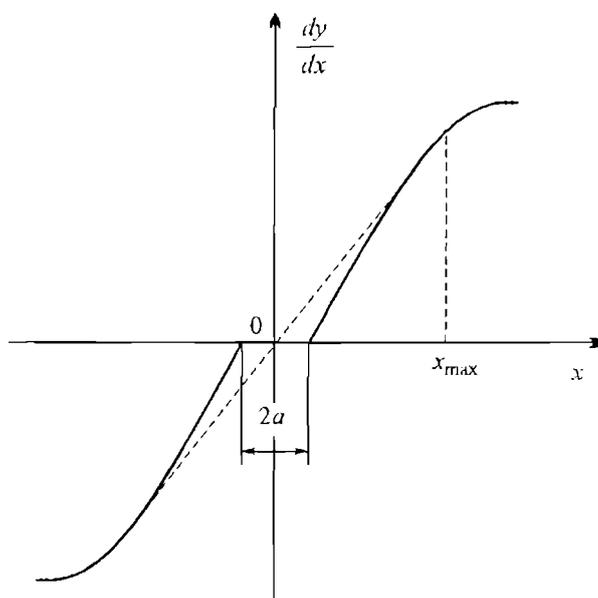


Рис. 2.19. Статическая характеристика гидравлического исполнительного элемента

Зона нечувствительности  $2a$  (рис. 2.19) возникает при применении золотника с положительным перекрытием. Зоной нечувствительности можно пренебречь при использовании золотника с отрицательным перекрытием. Участки насыщения соответствуют полному открытию золотниковых отверстий. Пунктирной линией показана статическая характеристика без учета зоны нечувствительности.

Для изменения характера перемещения штока ИМ вводят жесткую отрицательную обратную связь. Схема гидравлического исполнительного элемента с отрицательной обратной связью, выполненной в виде рычажной передачи, показана на рис. 2.20. При этом корпус золотника делают подвижным.

При перемещении штока золотника вверх поршень ИМ начинает опускаться. При этом шток ИМ через рычажную передачу поднимает корпус золотника до тех пор, пока окна не будут перекрыты. После этого поршень ИМ останавливается.

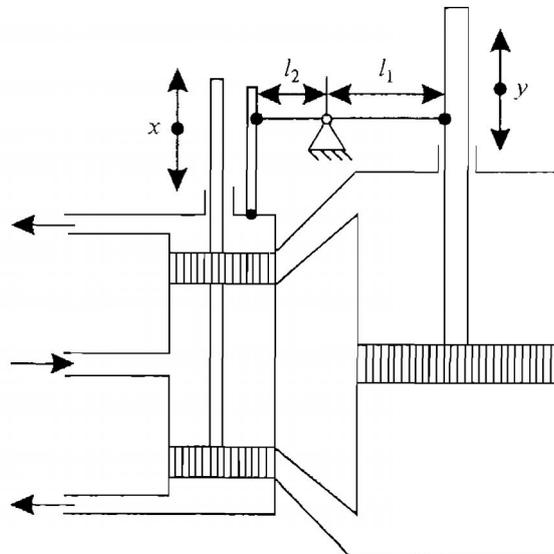


Рис. 2.20. Гидравлический элемент с жесткой отрицательной обратной связью

В данном случае перемещению штока золотника будет соответствовать не скорость, а перемещение штока ИМ.

Перемещение штока ИМ на величину  $y$  с помощью рычага вызовет перемещение корпуса золотника на величину, равную  $ay$ , где  $a = l_2 / l_1$ . Значение открытия окна составит  $(x - ay)$ .

Учитывая выражение (2.1), можно записать:

$$VS = k_1(x - ay)$$

или

$$\frac{dy}{dt} = \frac{k_1}{S}(x - ay). \quad (2.3)$$

Преобразовав выражение (2.3), получим

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx, \quad (2.4)$$

где  $T = S / (k_1 a)$ ,  $k = 1 / a$ .

Полученное выражение (2.4) соответствует апериодическому звену первого порядка.

Часто постоянная времени гидравлического исполнительного элемента с отрицательной обратной связью значительно меньше значений постоянной времени других элементов систем автоматического регулирования. По этой причине такой элемент можно считать безынерционным.

В рассмотренных гидравлических элементах используется исполнительный механизм двойного действия, в котором перемещение поршня в различные направления от среднего положения происходит под действием рабочей жидкости.

### Гидравлические исполнительные элементы со струйной трубкой

Схема гидравлического исполнительного элемента представлена на рис. 2.21.

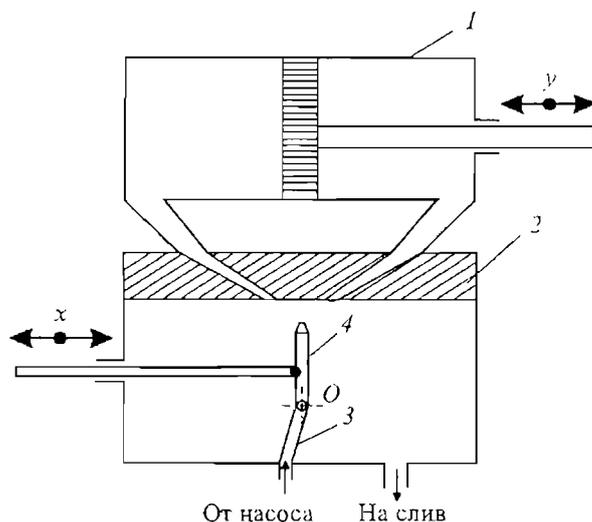


Рис. 2.21. Гидравлический исполнительный элемент со струйной трубкой

Основной элемент гидравлического усилителя — струйная трубка 4, которая может поворачиваться вокруг оси  $O$  вправо и влево на небольшой угол.

Напротив конической части струйной трубки располагается приемник 2 с двумя соплами. В струйную трубку под давлением



0,6...0,8 МПа поступает масло через трубку 3. Длина трубки составляет 150...170 мм, а ее диаметр — 5,0...6,0 мм. Диаметр конической насадки 1,8...2,0 мм. Расстояние между двумя соплами 2...2,5 мм.

Принцип действия струйной трубки основан на преобразовании кинетической энергии движения масла в потенциальную энергию давления. В конической трубке происходит приращение кинетической энергии.

В среднем положении струйной трубки струя рабочей жидкости одинаково перекрывает оба вихревых окна, создавая одинаковые давления в соплах приемника и в обеих полостях исполнительного механизма 1. Поршень исполнительного механизма находится в неподвижном состоянии. Сила реакции струи направлена по оси струйной трубки, и для ее поворота больших усилий не требуется.

При постоянной нагрузке гидравлический исполнительный элемент со струйной трубкой в первом приближении можно считать идеальным интегрирующим звеном.

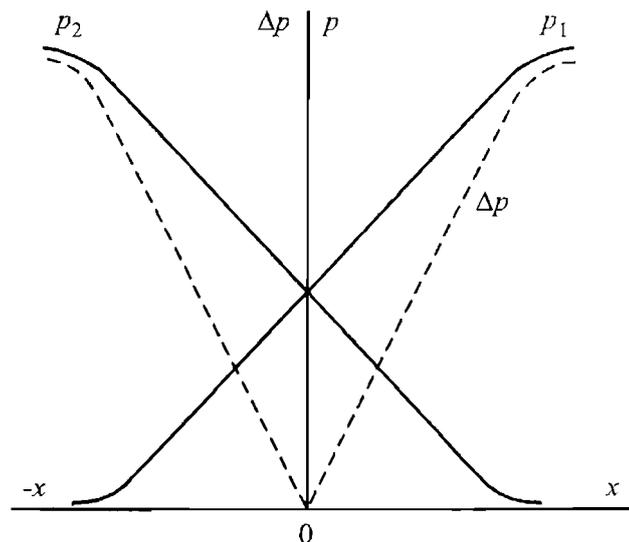


Рис. 2.22. Изменение давления в функции перемещения струйной трубки

На рис. 2.22 показаны кривые изменения давления в функции перемещения струйной трубки. Под действием разности давлений происходит перемещение поршня.

На рис. 2.23 изображен гидравлический исполнительный элемент со струйной трубкой, который соответствует апериодическому звену первого порядка.

Окна сопел приемника находятся в поршне ИМ. Через каналы в поршне сопла сообщаются с полостями цилиндра. При отклонении трубки вниз увеличивается давление в верхней полости, и поршень ИМ перемещается вниз вслед за трубкой. При перемещении поршня струйная трубка опять располагается между соплами, и движение поршня прекращается. Таким образом в рассматриваемом гидравлическом исполнительном элементе создается жесткая отрицательная обратная связь.

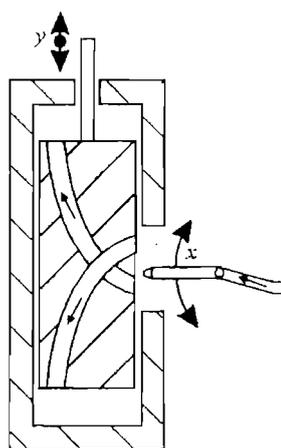


Рис. 2.23. Гидравлический исполнительный элемент со струйной трубкой и отрицательной обратной связью

Недостаток усилителей со струйной трубкой — непроизводительный расход потока рабочей жидкости.

### Гидравлические исполнительные элементы с усилителем “сопло-заслонка”

Принципиальная схема гидравлического исполнительного элемента этого типа представлена на рис. 2.24.

Усилитель “сопло-заслонка” состоит из входного дросселя 1 с постоянным проходным сечением, междроссельной камеры 2, сопла 3 и заслонки 4. Сопло-заслонка представляет собой дроссель с переменным проходным сечением.

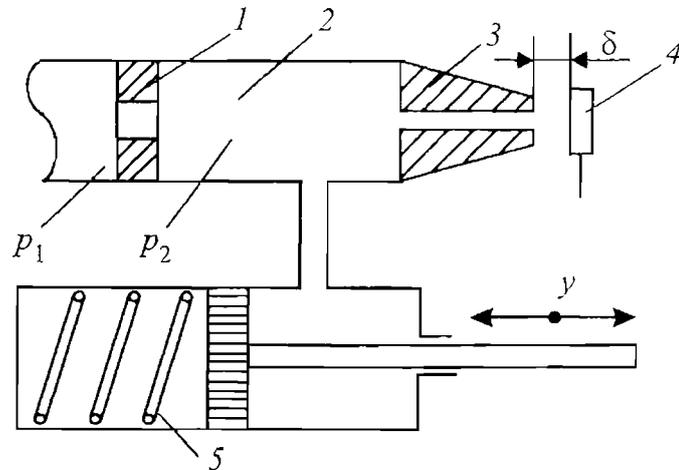


Рис. 2.24. Гидравлический исполнительный элемент с усилителем "сопло-заслонка"

Дроссель 1 и сопло-заслонка образуют делитель давления. Рабочая жидкость под постоянным давлением  $p_1$  протекает через дроссель 1 в междроссельную камеру 2, а оттуда через сопло 3 истекает наружу. Междроссельная камера соединена с полостью исполнительного механизма (ИМ). При изменении зазора  $\delta$  между торцом сопла и заслонкой изменяется расход рабочей жидкости через сопло, что приводит к изменению давления  $p_2$  в междроссельной камере.

Начальный зазор  $\delta$  устанавливают таким, чтобы давление  $p_2$ , создаваемое в междроссельной камере, уравновешивало нагрузку ИМ. Изменение давления  $p_2$  приводит к перемещению поршня исполнительного механизма. Небольшая мощность, затрачиваемая на перемещение заслонки, управляет мощным потоком рабочей жидкости, поступающей в ИМ.

Недостаток рассмотренного усилителя — неполное использование мощности потока рабочей жидкости, поступающей на вход усилителя.

В исполнительном элементе используется исполнительный механизм одностороннего действия, в котором перемещение по-

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

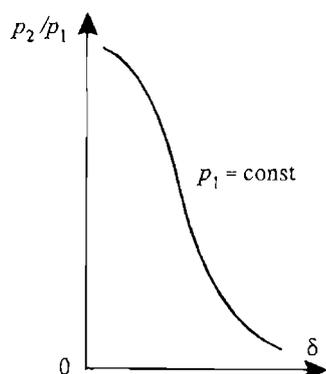


Рис. 2.25. Статическая характеристика усилителя "сопло-заслонка"

ршня под действием рабочей жидкости происходит в одну сторону. В другую сторону поршень перемещается под действием пружины 5 (рис. 2.24).

На рис. 2.25 представлен график статической характеристики усилителя "сопло-заслонка".



---

## Литература

1. *Жадобин Н.Е., Крылов А.П., Малышев В.А.* Элементы и функциональные устройства судовой автоматики. — СПб.: “Элмор”, 1998.
2. *Техническая документация транспортных судов.*

---

## Оглавление

<b>Введение</b> . . . . .	3
<b>Глава 1. Измерительные преобразователи и датчики</b> . . . . .	5
1.1. Общие понятия и определения . . . . .	—
1.2. Датчики температуры . . . . .	9
1.3. Датчики частоты вращения . . . . .	17
1.4. Датчики давления. . . . .	22
1.5. Датчики угла рассогласования. . . . .	36
1.6. Датчики крутящего момента. . . . .	44
1.7. Датчики уровня . . . . .	61
1.8. Датчики перемещения рейки топливных насосов дизеля . . . . .	74
1.9. Датчики расхода жидкости . . . . .	77
1.10. Интеллектуальные датчики. . . . .	81
<b>Глава 2. Исполнительные элементы</b> . . . . .	85
2.1. Электромеханические элементы . . . . .	—
2.2. Электродвигательные исполнительные устройства . . . . .	89
2.3. Электромагнитные исполнительные устройства . . . . .	112
2.4. Гидравлические и пневматические элементы. . . . .	114
<b>Литература</b> . . . . .	124



---

ДЛЯ ЗАМЕТОК

---



---

ДЛЯ ЗАМЕТОК

---