ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в первом и втором разделах первой части пособия элементы и устройства систем автоматизации относятся к полевому уровню. В третьем разделе введены общие понятия об уровнях построения промышленных систем автоматизации, позволяющие уяснить место полевых устройств в многоуровневой иерархии. Материал четвертого раздела содержит информацию о функционировании устройств, располагаемых на границе раздела УСО и ПЛК полевого уровня.

Во второй части пособия будут приведены сведения о принципах работы устройств автоматизации, начиная с указанной границы и выше, в частности, о модулях расширения ПЛК, полевых протоколах взаимодействия их с УСО, специальных УСО для опасных и вредных производств.

Таким образом, обе части пособия представят целостную картину о способах и устройствах реализации автоматизированного управления технологическими процессами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации : учеб. для студентов вузов / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. – М. : Академия, 2007. – 368 с.

2. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 180 с.

3. Герман, А. Е. Основы автоматизации эксперимента. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие / А. Е. Герман. – Гродно : ГрГУ, 2004. – 150 с.

4. Купов, А. В. Программные средства систем комплексной автоматизации : учеб. пособие / А. В. Купов, А. В. Купова. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – 85 с.

5. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами : пер. с англ. / Дж. Барнс. – М. : Мир, 1990. – 238 с.

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

А. В. Купов, А. В. Купова, Е. Н. Землянская

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Часть 1

Утверждено в качестве учебного пособия
Ученым советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Комсомольск-на-Амуре
2012

2.8. Регулирующие органы 51
2.9. Сопутствующие электроприводам электроаппараты систем автоматизации технологического оборудования 53
3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ 63
3.1. Виды технологических процессов 63
3.2. Уровни автоматизации производств 67
4. ПОДГОТОВКА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ 68
4.1. Общие сведения о преобразовании информации в системах автоматизации производственных процессов 68
4.2. Электрические фильтры 69
4.3. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи 72
4.3.1. Параллельные аналого-цифровые преобразователи 74
4.3.2. Аналого-цифровые преобразователи последовательного счета 76
4.3.3. Аналого-цифровые преобразователи с компенсационным цикличным 78
4.3.4. Цифроаналоговые преобразователи 80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 84
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 84

Представим входной код в виде суммы всех разрядов с соответствующими двоичными весами: $N_x = a_n 2^{n-1} + a_{n-1} 2^{n-2} + \ldots + a_2 2 + a_1$, где n – разрядность входного кода, а коэффициенты a соответствуют значениям разрядов входного кода.

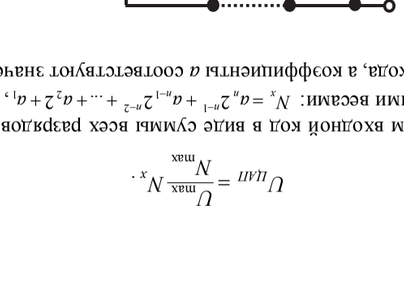


Рис. 4.12. Простейший ЦАП с суммированием весовых токов

При большом числе разрядов n можно принять, что $N_{max} = 2^n - 1 \approx 2^n$. Тогда статическая характеристика ЦАП примет вид

$$U_{ЦАП} = U_{max}\left(a_n 2^{-1} + a_{n-1} 2^{-2} + \ldots + a_2 2^{-(n-1)} + a_1 2^{-n}\right).$$

Отсюда следует, что выходной сигнал ЦАП содержит *n* слагаемых с двоичными весами. Наличие или отсутствие того или иного слагаемого в сумматорном сигнале определяется значением соответствующего разряда входного кода.

Статическая характеристика вида реализуется с применением резистивных многоплечников с двоично-весовым соотношением токов в ветвях. Наиболее часто используются многоплечники типа R-2R (рис. 4.13, 4.14).

Отличительной особенностью данного многоплечника является то, что напряжения в узлах и, следовательно, токи в ветвях последовательно отличаются друг от друга в два раза. Многоплечник работоспособен только в том случае, если все его ветви замкнуты на нулевой провод.

Упрощенная схема ЦАП с многоплечником R-2R приведена на рис. 4.15.

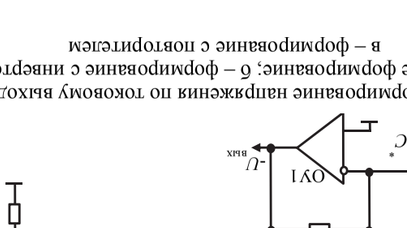


Рис. 4.13. Схема ЦАП с R-2R матрицей постоянного импеданса

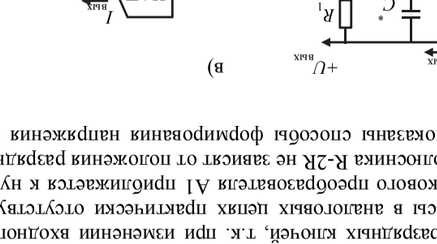


Рис. 4.14. Схема инверсного включения ЦАП с R-2R матрицей

Схема преобразователя включает в себя входной регистр (триггеры D1 – D*n*), блок разрядных ключей К1 – К*n*, резисторный многополюсник R-2R и преобразователь «ток – напряжение» на операционном усилителе А1. При поступлении сигнала записи на входы с триггеров D1 – D*n* разряды входного кода *a*1 – *an* фиксируются во входном регистре. Каждый триггер входного регистра управляет положением соответствующего разрядного ключа. Если *i*-й триггер находится в единичном состоянии, то ключ К*i* коммутирует соответствующую ветвь резисторного многополюсника с входом токового преобразователя А1. В противном случае ветвь многополюсника замыкается на нулевой провод. В итоге операционный усилитель А1 суммирует токи всех ветвей резисторного многополюсника, для которых разряды входного кода равны логической «1». Сумма разрядных токов преобразуется в выходное напряжение с коэффициентом $R_{ос}$. Систематическая погрешность преобразования определяется разрядностью *n* и выражается через единицу младшего значащего разряда $1мзр = R_{ос}\frac{U_{пит}}{2^{n-1}R}$.

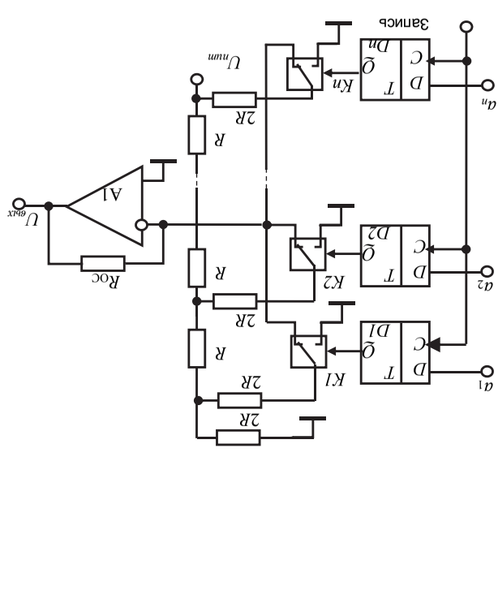


Рис. 4.15. ЦАП с многополюсником R-2R

Время преобразования определяется только быстродействием входного регистра и разрядных ключей, т.к. при изменении входного кода переходные процессы в аналоговых цепях практически отсутствуют (входное напряжение токового преобразователя А1 приближается к нулю, и токи в ветвях многополюсника R-2R не зависят от положения разрядных ключей). На рис. 4.16 показаны способы формирования напряжения по токовому выходу ЦАП.

Рис. 4.16. Формирование напряжения по токовому выходу ЦАП:
а – прямое формирование; б – формирование с инвертором;
в – формирование с повторителем

УДК 004:658.011.56
ББК 32.96.4 + 32.965
К923

Рецензенты:
С. В. Власьевский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика»
ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»;
Р. Ф. Крупский, главный научный сотрудник – начальник
научно-производственного отдела
ОАО «КнААПО» (г. Комсомольск-на-Амуре)

Кунов, А. В.
К923 Технические средства автоматизации и управления. В 2 ч. Ч. 1 : учеб. пособие / А. В. Кунов, А. В. Кунова, Е. Н. Земляная ; под ред. А. В. Кунова. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2012. – 84 с.

ISBN 978-5-7765-0964-3

В учебном пособии рассмотрены некоторые типовые устройства автоматизации технологических процессов, обеспечивающие реализацию принципов замкнутых систем регулирования. Приводятся сведения о стандартных сенсорах и датчиках на их основе, применяемых в системах автоматизации для измерения физических величин, а также об исполнительных устройствах – актуаторах, выполняющих управляющие команды регуляторов. Указано место перечисленных устройств в системах автоматизации различного масштаба, для чего приведены типы современных архитектур систем управления технологическими процессами.

Кроме этого в пособии содержатся сведения об основах подготовки сигналов к дальнейшей обработке с помощью электрических фильтров и о способах представления обработки аналоговых сигналов для использования их в цифровых устройствах автоматизации.

Учебное пособие предназначено для студентов технических специальностей, изучающих системы автоматизации и управления производственных предприятий.

УДК 004:658.011.56
ББК 32.96.4 + 32.965

ISBN 978-5-7765-0964-3

© ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1. ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ 5
1.1. Общие характеристики датчиков технологических параметров 5
1.2. Датчики угловой скорости 8
1.3. Датчики давления – манометры 11
1.4. Датчики температуры 11
1.5. Датчики угла 12
1.6. Электроконтактные датчики 13
1.7. Реостатные датчики 14
1.8. Тензорезисторные датчики 16
1.9. Пьезоэлектрические датчики 17
1.10. Датчики производственных параметров на основе эффекта Холла 18
1.11. Емкостные преобразователи 19
1.12. Оптоэлектронные преобразователи 21
1.13. Электромагнитные преобразователи 23
1.14. Датчики для систем числового программного управления 29
1.15. Типовые способы измерения производственных параметров 33
2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ИМ УСТРОЙСТВА 36
2.1. Общие требования к исполнительным механизмам в системах автоматизации 36
2.2. Управляемые исполнительные электродвигатели постоянного тока 38
2.3. Электродвигатели переменного тока 44
2.4. Синхронные шаговые электродвигатели 45
2.5. Электромагниты 47
2.6. Гидравлические серводвигатели 47
2.7. Муфты как исполнительные устройства 50

$$U_{A1} = U_{A1}(t_2) - \frac{1}{T_u}\int_{t_2}^{t_3} U_Э d\tau .$$

В момент времени t_3 достигается равенство $U_{A1} = U_0$, компаратор А2 устанавливается в нулевое состояние, размыкает ключ К2 и запрещает дальнейшее прохождение тактовых сигналов на счетчик D3. На выходах счетчика фиксируется код, эквивалентный числу

$$N_x = \frac{t_3 - t_2}{t_T} = \frac{t''}{t_T},$$

где τ_T – период следования тактовых сигналов, с.

Если напряжения U_x и $U_Э$ постоянны во времени, то справедливо равенство

$$U_x t' = U_Э t'' .$$

Учитывая, что $t'' = 2^n t_T$, получим статическую характеристику АЦП в виде

$$N_x = 2^n \frac{U_x}{U_Э}.$$

Систематическая погрешность преобразования, как и в предыдущем случае, определяется 1 мзр, но случайная погрешность существенно ниже за счет эффективной фильтрации входного сигнала при интегрировании. Время преобразования выше по сравнению с классическим АЦП последовательного счета

$$t_{пр} = \frac{2^n + N_x}{f_{такт}}.$$

4.3.4. Цифроаналоговые преобразователи

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) предназначены для преобразования многоразрядных кодовых комбинаций (чаще всего – позиционных двоичных кодов) в аналоговый сигнал тока или напряжения (рис. 4.12).

Амплитуда аналогового сигнала должна быть пропорциональна числу, эквивалентному входной кодовой комбинации. Если принять, что число N_x, эквивалентное входному коду, может изменяться в пределах от 0 до N_{max}, а выходное напряжение $U_{ЦАП}$ – в пределах от 0 до U_{max}, то статическая характеристика ЦАП будет иметь вид

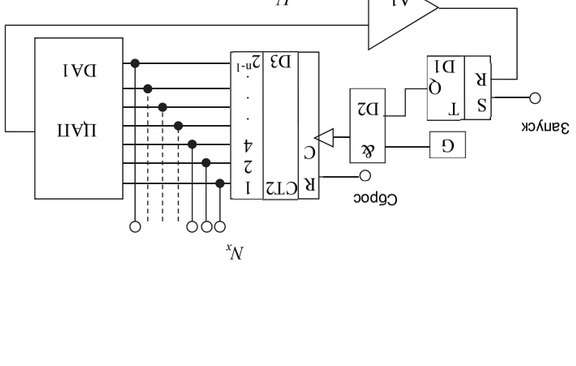


Рис. 4.8. Упрощенная схема АЦП последовательного счета

Временная диаграмма работы АЦП представлена на рис. 4.9. В исходном состоянии на выходах триггера D1 и компаратора A1 установлен логический нуль. Прохождение тактовых сигналов через элемент D2 на счетчик D3 запрещено. Кодовая комбинация на выходах счетчика D3 эквивалентна нулю, выходное напряжение ЦАП равно нулю. Сигнал запуска устанавливает триггер D1 в единичное состояние и прохождение тактовых сигналов через элемент D2 на счетчик D3 разрешается. С приходом каждого тактового импульса счетчик D3 наращивает выходную кодовую комбинацию на единицу. ЦАП преобразует этот код в аналоговый сигнал. Таким образом, выходное напряжение ЦАП ступенчато нарастает во времени.

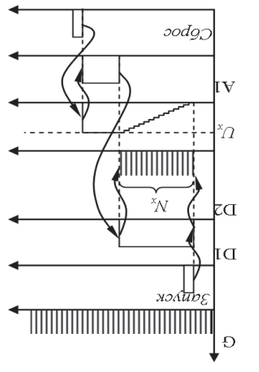


Рис. 4.9. Временная диаграмма работы АЦП последовательного счета

Амплитуда ступеньки соответствует 1 мзр. Счет тактовых сигналов продолжается до тех пор, пока выходное напряжение ЦАП не превысит входное преобразуемое напряжение U_x. В этот момент на выходе компаратора A1 устанавливается логическая единица, триггер D1 сбрасывается, и счет тактовых сигналов прекращается. На выходах счетчика D3 фиксируется кодовая комбинация N_x, эквивалентная входному преобразуемому напряжению U_x.

3) ***Коэффициентный характер*** переходного процесса. Выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению, совершая за время переходного процесса одно или несколько колебаний, превышая на время новое значение выходной величины, а затем возвращается к нему.

Динамические процессы в датчиках характеризуются *шиберглавным показателем качества переходного процесса* (обычно представляет собой полиэтрглавную площадь кривой переходного процесса) и такими *показателями качества переходного процесса*, как:

а) время завершения переходного процесса;

б) величина превышения в течение переходного процесса выходного параметра над его новым установившимся значением;

в) число колебаний выходной величины за время завершения переходного процесса.

Для получения статических и динамических характеристик датчиков технологических параметров на входы подают типовые воздействия и наблюдают, как испытуемый датчик реагирует на подаваемое воздействие.

К числу таких типовых входных воздействий относятся:

- ударное (мгновенное);
- ступенчатое;
- линейное;
- гармоническое.

Для датчиков технологических параметров важными характеристиками являются также *диапазон измерений* и *полоса пропускания*.

Диапазон измерений представляет собой разность между допустимыми максимальным и минимальным установившимся значениями измеряемой величины.

Полоса пропускания представляет собой разность между максимальной и минимальной частотами изменения входной величины, для работы с которыми предназначен данный датчик.

Практически во всех системах автоматизации неизбежно возникают ошибки, которые можно классифицировать следующим образом: систематические, прогрессирующие, случайные, погрешности применения.

1.2. Датчики угловой скорости

К датчикам угловой скорости относятся тахогенераторы постоянного и переменного тока, цифровые датчики скорости (ЦДС).

Тахогенератор постоянного тока представляет собой электрическую машину постоянного тока с независимым возбуждением или постоянными магнитами (рис. 1.1). Входной координатой тахогенератора посто-

ВВЕДЕНИЕ

Практически во всех отраслях народного хозяйства в настоящее время существует тенденция к увеличению мощности технологических агрегатов, росту их комплексности, повышению производительности, непрерывному усложнению технологий. Управление такими высококомплексными агрегатами и другими крупномасштабными производствами намного сложнее, чем управление отдельными объектами и требует согласования работы всех элементов комплекса. Это привело к созданию сложных иерархических распределенных систем управления на основе автоматизированных рабочих мест диспетчеров и операторов, управляющих контроллеров, модулей аналогового и цифрового ввода-вывода, объединенных локальными и промышленными сетями.

Данное пособие позволяет изучить технические средства (ТС), используемые для решения задач контроля и управления, особенности выбора ТС, исходя из системных требований, принципов построения систем автоматизации и управления на базе стандартных модулей.

1. ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1. Общие характеристики датчиков технологических параметров

Управление техническими системами осуществляется при помощи сигналов, поступающих с датчиков. Зачастую в технической литературе используют как взаимозаменяемые понятия «датчик» (англ. pick up) и «измерительный преобразователь» (англ. sensor). Тем не менее измерительный преобразователь представляет собой устройство, отображающее одну физическую величину с помощью другой физической величины или набора величин. А датчиком является ***первичный измерительный преобразователь, помещенный в корпус и снабженный устройствами для его установки и фиксации на объекте, а также кабелем для передачи сигнала и соответствующими разъемами***. Датчик может состоять из одного или нескольких измерительных преобразователей.

В реальных производственных условиях на датчик может воздействовать большее число параметров, среди которых только один является измеряемой (входной) величиной, тогда как остальные – помехи. Условия эксплуатации датчиков могут оказаться весьма сложными (высокие давления, температуры) с большим количеством помех. Тем не менее датчик должен вырабатывать адекватную выходную величину (код выходной величины). Кроме того при эксплуатации датчиков не по назначению воз-

Статическая характеристика преобразователя будет иметь вид

$$N_x = 2^n \frac{U_x}{1мзр}.$$

Систематическая погрешность преобразования определяется разрядностью n и ограничена 1 мзр.

Время преобразования определяется из соотношения

$$t_{пр} = \frac{N_x}{f_{такт}},$$

где $f_{такт}$ – частота генератора тактовых сигналов, Гц.

4.3.3. Аналого-цифровые преобразователи с компенсационным интегрированием

Интегрирование входного аналогового сигнала позволяет значительно повысить точность и помехозащищенность АЦП, поскольку спектральные характеристики полезных сигналов и шумов существенно различны. Упрощенная схема АЦП с компенсационным интегрированием приведена на рис. 4.10.

Основными элементами преобразователя являются: аналоговый интегратор на операционном усилителе A1, компаратор напряжения A2, аналоговые ключи K1 и K2, управляемые триггерами D4 и D5, а также генератор тактовых сигналов G и многоразрядный счетчик D3 со схемами управления D1 и D2. В исходном состоянии на выходах триггеров D4, D5 и компаратора A2 установлен логический нуль, ключи K1 и K2 разомкнуты, выходное напряжение интегратора A1 равно нулю, прохождение тактовых сигналов через элемент D2 на счетчик D3 запрещено, выходная кодовая комбинация счетчика эквивалентна нулю.

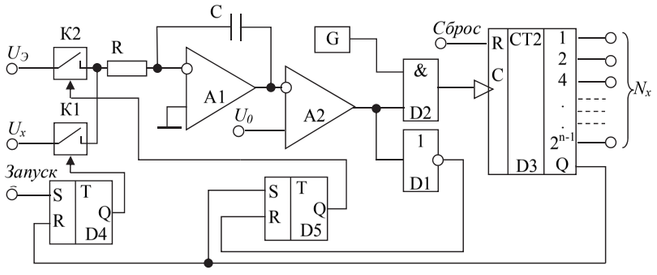


Рис. 4.10. Упрощенная схема интегрирующего АЦП

Временна́я диаграмма работы АЦП приведена на рис. 4.11. В момент времени t_0 на триггер D4 поступает сигнал запуска. Триггер устанавливается в единичное состояние и замыкает ключ K1. На вход интегратора подается входное преобразуемое напряжение U_x.

Выходное напряжение интегратора будет изменяться во времени в соответствии с соотношением

$$U_{A1} = \frac{1}{T_u}\int_0^t U_x dt,$$

где T_u – постоянная времени интегратора, равная RC.

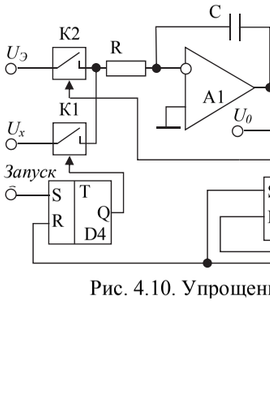


Рис. 4.11. Временна́я диаграмма интегрирующего АЦП

Это напряжение поступает на один из входов компаратора A2. На другой вход подается опорное напряжение U_0, определяющее зону нечувствительности АЦП к низкочастотным помехам. В момент времени t_1 U_{A1} достигает величины U_0 и на выходе компаратора A2 устанавливается логическая единица. Счетчик D3 начинает счет тактовых сигналов, поступающих с генератора G через элемент D2. Интегрирование напряжения U_x производится в течение фиксированного промежутка времени $t' = t_2 - t_1$, длительность которого определяется разрядностью счетчика D3 и частотой тактовых сигналов.

К концу интервала времени t' выходное напряжение интегратора достигает величины

$$U_{A1}(t_2) = U_0 + \frac{1}{T_u}\int_{t_1}^{t_2} U_x d\tau.$$

В момент времени t_2 разрядность счетчика переполнится, и выдастся на сигнал переполнения Q, который сбрасывает триггер D4 и устанавливает в единичное состояние триггер D5. Ключ K1 разомкнется, и замыкается ключ K2, который подает на вход интегратора эталонное напряжение $U_э$, полярность которого противоположна полярности U_x.

Счетчик D3 продолжает счет тактовых сигналов, а выходное напряжение интегратора будет изменяться по закону

никают *ошибки применения*, избежать которых можно при рациональном размещении датчиков с учетом физических принципов их построения.

Различают датчики *параметрические* и *генераторные*.

Параметрический датчик должен быть подключен к какому-либо внешнему источнику энергии, он изменяет какой-либо из своих параметров под воздействием самой измеряемой величины.

К параметрическим датчикам относятся:

- резистивные;
- индуктивные;
- трансформаторные;
- емкостные.

Генераторный датчик сам генерирует выходной сигнал и не требует подключения к внешнему источнику энергии.

В качестве примеров датчиков такого рода можно назвать различные термопары, пьезоэлектрические датчики давления или тахогенераторные датчики скорости вращения.

К генераторным датчикам относятся:

- термоэлектрические;
- индукционные;
- пьезоэлектрические;
- фотоэлектрические.

Применительно к датчикам используются следующие основные определения и термины [1].

Функция преобразования измерительного преобразователя – это зависимость выходной величины данного измерительного преобразователя от входной, задаваемая либо аналитическим выражением, либо графиком, либо таблицей.

Чувствительность преобразователя – это именованная величина, показывающая, насколько изменится выходная величина при изменении входной величины на одну единицу. Для термопары единицей чувствительности будет мВ/К (милливольты на градус Кельвина), для регулировочного электродвигателя – (с$^{-1}$)/В (обороты в секунду на вольт) и т.д.

Разрешающая способность преобразования – это наименьшее изменение входного сигнала, которое может быть измерено преобразователем.

Точность (погрешность) измерения показывает, насколько измеренное датчиком значение параметра близко к его истинному значению. Обычно точность задается в пределах от *нулевой* шкалы измерительного прибора и в результате представляет собой некоторую абсолютную величину.

Воспроизводимость является мерой того, насколько близки друг к другу результаты измерений одной и той же физической величины.

Правильность – степень близости результата измерений к истинному или условно истинному (действительному) значению измеряемой вели-

чины или в случае отсутствия эталона измеряемой величины – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений (или результатов испытаний) к принятому опорному значению. Показателем правильности обычно является значение систематической погрешности (см. п. 3.7 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002)*.

Прецизионность – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях. Эта характеристика зависит только от случайных факторов и не связана с истинным или условно истинным значением измеряемой величины (см. п. 3.12 ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002).

В большинстве случаев при измерении механических величин нагрузка воспринимается не самим преобразователем, а *упругим элементом*, который под воздействием измеряемой величины деформируется. Входной величиной в таком случае может быть сосредоточенная сила, крутящий момент, давление газа или жидкости и др. Выходным сигналом может быть как непосредственно воспринимаемая человеком информация, так и электрический параметр.

Различают *статическую* и *динамическую* характеристики датчика.

Статическая характеристика датчика есть зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин.

В реальности практически не существует датчиков с идеализированной линейной зависимостью. Это означает, что приращение выходной величины вследствие единичного приращения входной величины не является постоянным во всем интервале изменения измеряемой величины. В ряде случаев возможна операция ***линеаризации*** – операция замены нелинейной статической характеристики датчика линейным эквивалентом (в определенных *пределах измерения и с определенным влиянием на показания* этого датчика).

Динамическая характеристика датчика показывает поведение выходной величины во время переходного процесса в ответ на ступенчатое изменение измеряемой входной величины.

Для динамических характеристик датчиков характерны три случая:

1) ***Чистое запаздывание*** в датчике. Выходная величина просто повторяет (в определенном масштабе) входную величину, запаздывая по отношению к ней на постоянную величину.

2) ***Апериодический характер*** переходного процесса. Выходная величина постепенно приближается к новому установившемуся значению монотонным образом (монотонно убывая или же монотонно возрастая).

*ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений

• радиационные пирометры для измерения температуры по тепловому действию лучеиспускания накаленного тела во всем спектре длин волн.

1.5. Датчики угла

Датчики угла – это устройства, преобразующие угловую координату в электрическое напряжение; далее это напряжение используется в системах автоматики как сигнал обратной связи по углу или как управляющий сигнал в задающих устройствах. В качестве датчиков угла используются сельсины.

Сельсин – небольшая электрическая машина переменного тока, имеющая две обмотки: однофазную (обмотку возбуждения) и трехфазную (обмотку синхронизации) (рис. 1.5, *а*).

Входной координатой сельсина является угол поворота его ротора θ. Выходные координаты – амплитуда $U_{\text{вых}\,m}$ и фаза φ выходного напряжения по отношению к переменному опорному напряжению (рис. 1.5, *б*).

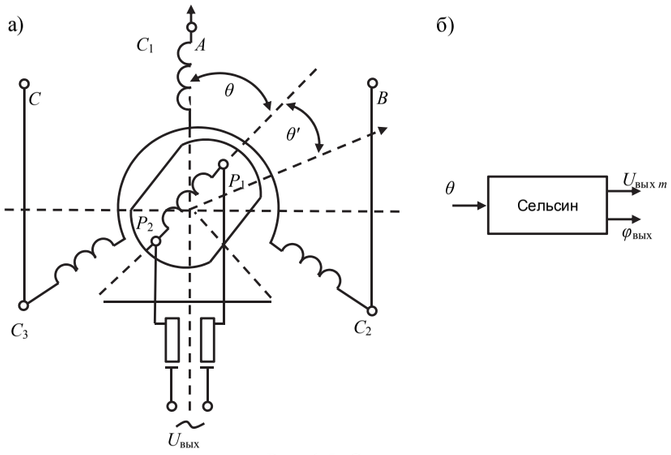


Рис. 1.5. Сельсин:
а – схема; б – координаты

Для измерения углов в больших диапазонах и с высокой точностью используются дискретные датчики. Их функциональной выходной величиной является число, представленное в двоичной системе счисления с

Аналоговыми электрическими величинами, которые должны восприниматься, обрабатываться и тем или иным образом использоваться в дальнейшем, могут являться: напряжение, сопротивление, сила тока, частота и сдвиг фазы.

Принципиальным достоинством цифровых устройств, по сравнению с аналоговыми, является отсутствие явления, называемого «дрейфом нуля», т.е. изменения показаний на выходе при неизменном значении входной величины. Недостатком цифровой информационной технологии по сравнению с аналоговой является более высокая сложность цифровых устройств, хотя они и строятся из повторяющихся однотипных ячеек. Сравнительная диаграмма наиболее распространенных видов АЦП показана на рис. 4.5.

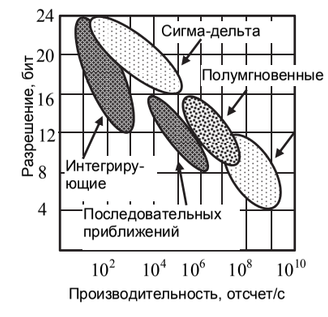


Рис. 4.5. Сравнение различных видов АЦП по разрешению и производительности

Полученную тем или иным образом аналоговую величину, как правило, целесообразно преобразовывать в цифровую форму и представлять в виде кода некоторого числа. Делается это с помощью одного из следующих способов преобразования в код:

- квантования по уровню;
- квантования по времени;
- квантования по уровню и времени.

Как правило, в цифровых измерительных приборах и цифровых системах автоматизации осуществляется представление входной аналоговой величины в виде цифрового кода с помощью комбинированного подхода, сочетающего квантование и по уровню, и по времени. Для дальнейшей обработки наиболее удобным является двоичный код, но для индикации и визуального восприятия более удобным является десятичный код. Поэтому перевод (трансляция) двоичного кода в десятичный обычно осуществляется на выходе всей системы автоматизации после выполнения операций квантования в двоичный код и действий над квантованными величинами.

В основу классификации АЦП, которая схематично изображена на рис. 4.6, положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования.

выходе возникнет число 111, т.е. семь. Величина ошибки в этом случае составит половину измеряемого диапазона.

Так как результаты АЦ-преобразования записываются, как правило, в запоминающее устройство, существует вероятность получить полностью неверную величину. Решить эту проблему можно, например, с помощью устройства выборки-хранения (УВХ), подключаемого непосредственно к входному напряжению $U_{\text{вх}}$ так, что выход УВХ подключается к входам компараторов. Некоторые АЦП, например MAX100, снабжаются сверхскоростными УВХ, имеющими время выборки порядка 0,1 нс. Другой путь состоит в использовании кода Грея, характерной особенностью которого является изменение только одной кодовой позиции при переходе от одного кодового значения к другому. Наконец, в некоторых АЦП (например, MAX1151) для снижения вероятности сбоев при параллельном АЦ-преобразовании используется двухтактный цикл, когда сначала состояния выходов компараторов фиксируются, а затем, после установления состояния приоритетного шифратора, подачей активного фронта на синхровход выходного регистра в него записывают выходное слово АЦП.

Как видно из табл. 4.1, при увеличении входного сигнала компараторы устанавливаются в состояние 1 по очереди – снизу вверх. Такая очередность не гарантируется при быстром нарастании входного сигнала, т.к. из-за различия во временах задержки компараторы могут переключаться в другом порядке. Приоритетное кодирование позволяет избежать ошибки, возможной в этом случае, благодаря тому, что единицы в младших разрядах не принимаются во внимание приоритетным шифратором.

Благодаря одновременной работе компараторов параллельный АЦП является самым быстрым. Например, восьмиразрядный преобразователь типа MAX104 позволяет получить 1 млрд отсчетов в секунду при времени задержки прохождения сигнала не более 1,2 нс.

Недостатком этой схемы является высокая сложность. Действительно, N-разрядный параллельный АЦП сдержит $2N$-1 компараторов и $2N$ согласованных резисторов. Следствием этого является высокая стоимость (сотни долларов США) и значительная потребляемая мощность. MAX104, например, потребляет около 4 Вт.

4.3.2. Аналого-цифровые преобразователи последовательного счета

Упрощенная схема классического преобразователя последовательного счета приведена на рис. 4.8.

Преобразователь включает в себя генератор тактовых сигналов G, двоичный триггер D1, логический элемент «И» D2, двоичный счетчик D3, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и компаратор напряжения A1.

янного тока является угловая скорость ω, выходной – напряжение $U_{\text{вых}}$, выделяемое на сопротивлении нагрузки.

Тахогенератор переменного тока – наиболее часто выполнен на базе асинхронной двухфазной машины (рис. 1.2). На статоре имеются две взаимно перпендикулярные обмотки: обмотка возбуждения, расположенная по оси α, и выходная управляющая обмотка, расположенная по оси β, включенная на сопротивление нагрузки тахогенератора $Z_{\text{тт}}$. Для уменьшения момента инерции ротор выполняется тонкостенным в виде полого стакана из немагнитного материала (обычно алюминиевого сплава). Внутри ротора размещается неподвижный стальной шихтованный сердечник, по которому замыкается магнитный поток.

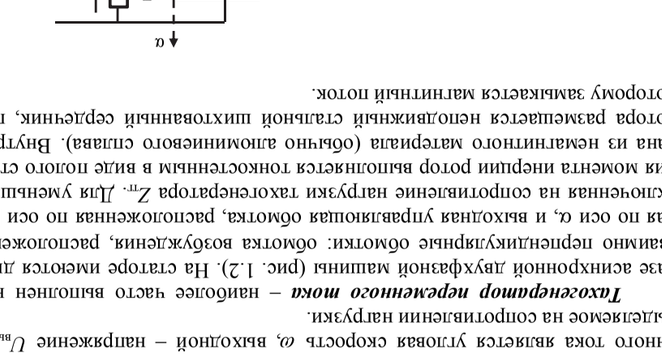


Рис. 1.1. Тахогенератор постоянного тока

Рис. 1.2. Тахогенератор переменного тока

Цифровые датчики скорости. Функционально в ЦДС можно выделить две основные части:

1) *импульсный преобразователь скорости* – датчик импульсов (ДИ), преобразующий угловую скорость вала в импульсы с частотой f, пропорциональной скорости;

2) *кодовый преобразователь* – счетчик импульсов (СИ), формирующий на интервале измерения T цифровой код A_n выходной величины датчика скорости.

Датчик импульсов может быть выполнен, например, на основе фотоэлектрического кодового диска (рис. 1.3). На двух дорожках расположены пропускающие свет щели. Свет от источников ИС1 и ИС2 через щели попадает на фотодиоды Ф1 и Ф2, которые при этом открыты и пропускают ток. Когда щель выходит из луча света, фотодиоды запирают цепь. При

вращении диска с угловой скоростью ω Ф1 и Ф2 дают чередование максимального и минимального сигналов.

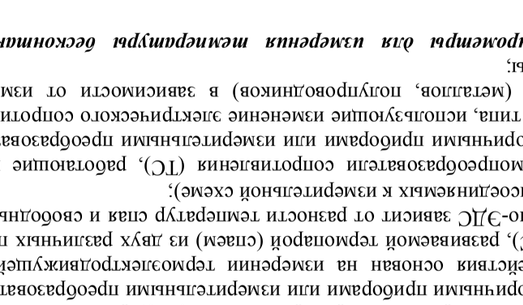


Рис. 1.3. Кодовый диск фотоэлектрического датчика импульсов

На рис. 1.4 представлена схема датчика импульсов. Токовый сигнал фотодиода Ф1 проходит через усилитель У1. Усилитель, собранный на транзисторах Т1 и Т2, работает с использованием положительной связи в релейном режиме и дает на выходе прямоугольные импульсы U_1 с постоянной амплитудой, равной напряжению питания U_n, но с переменной продолжительностью. Выходной импульс $U_{вых}$ с неизменными амплитудой и продолжительностью τ формируется с помощью одновибратора *S*.

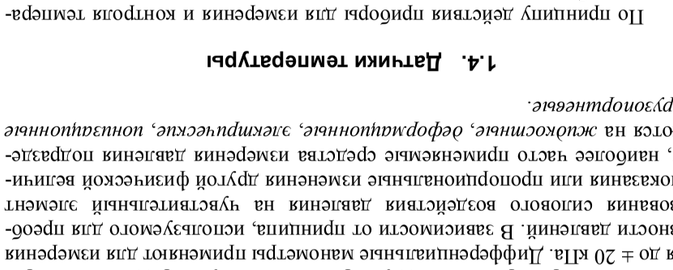


Рис. 1.4. Схема датчика импульсов

1.3. Датчики давления – манометры

Манометры подразделяются на барометры, манометры избыточного давления, вакуумметры и манометры абсолютного давления.

Манометры, предназначенные для измерения давления или разрежения в диапазоне до 40 кПа, называются ***напоромерами*** и ***тягомерами***.

Тягонапоромеры имеют двусторонною шкалу с пределами измерения до ± 20 кПа. Дифференциальные манометры применяют для измерения разности давлений. В зависимости от принципа, используемого для преобразования силового воздействия давления на чувствительный элемент в показания или пропорциональные изменения других физической величин, наиболее часто применяемые средства измерения давления подразделяются на *жидкостные*, *деформационные*, *электрические*, *поплавковые* и *грузоноршневые*.

1.4. Датчики температуры

По принципу действия приборы для измерения и контроля температуры могут быть разделены на следующие группы:

1) ***термометры для измерения температуры контактным методом:***

- термометры расширения, измеряющие температуру по тепловому расширению жидкости (жидкостные) или твердых тел (дилатометрические, биметаллические);
- манометрические термометры и преобразователи, использующие зависимость между температурой и давлением газа (газовые) или насыщенных паров жидкости (конденсационные);
- термоэлектрические преобразователи (ТП), работающие в комплекте с вторичными приборами или измерительными преобразователями; принцип действия основан на измерении термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), развиваемой термопарой (спаем) из двух разнящих проводников (термо-ЭДС) зависит от разности температур спая и свободных концов ТП, присоединяемых к измерительной схеме);
- термопреобразователи сопротивления (ТС), работающие в комплекте с вторичными приборами или измерительными преобразователями различного типа, использующие изменение электрического сопротивления материалов (металлов, полупроводников) в зависимости от изменения температуры;

2) ***пирометры для измерения излучательной способности:***

- яркостные пирометры, измеряющие температуру по яркости нагретого тела на данной длине волны;

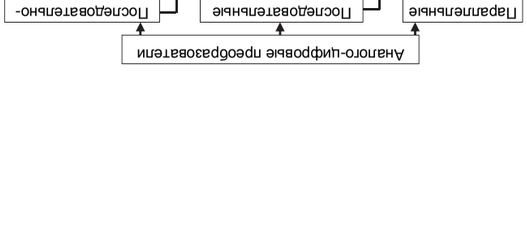


Рис. 4.6. Классификация АЦП

Они могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

4.3.1. Параллельные аналого-цифровые преобразователи

АЦП этого типа осуществляют квантование сигнала одновременно с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику входного сигнала. На рис. 4.7 показана реализация параллельного метода АЦ-преобразования для 3-разрядного числа.

С помощью трех двоичных разрядов можно представить восемь различных чисел, включая нуль, поэтому необходимо семь компараторов. Нуль квантуется отсутствием перекрытия компаратора.

Семь соответствующих эквидистантных опорных напряжений образуются с помощью резистивного делителя.

Если приложенное входное напряжение не выходит за пределы диапазона $5/2h$ – $7/2h$, где $h = U_{оп}/7$ – квант входного напряжения, соответствующий единице младшего значащего разряда (мзр) АЦП, то компараторы с 1-го по 3-й устанавливаются в состояние 1, а компараторы с 4-го по 7-й – в состояние 0. Преобразование этой группы кодов в трехзначное двоичное число выполняет логическое устройство, называемое приоритетным шифратором, диаграмма состояний которого приведена в табл. 4.1.

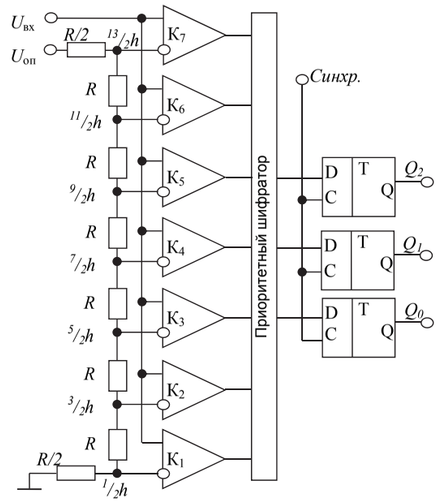


Рис. 4.7. Параллельный АЦП

Таблица 4.1

Коды на выходе АЦП

Входное напряжение	**Состояние компараторов**							**Выходы**		
$U_{вх}$/h	K_7	K_6	K_5	K_4	K_3	K_2	K_1	Q_2	Q_1	Q_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Подключение приоритетного шифратора непосредственно к выходу АЦП может привести к ошибочному результату при считывании выходного кода. Рассмотрим, например, переход от трех к четырем или в двоичном коде от 011 к 100. Если старший разряд вследствие меньшего времени задержки изменит свое состояние раньше других разрядов, то временно на

Примером электроконтактного датчика сопротивления может служить обычный угольный микрофон, преобразующий колебания акустического давления в соответствующие колебания электрического сопротивления.

Для повышения чувствительности и исключения температурных погрешностей в схемах промышленной автоматики часто используется дифференциальный угольный датчик.

1.8. Тензорезисторные датчики

Тензорезисторные датчики работают на основе явления изменения сопротивления проводников и полупроводников при их механической деформации (тензоэффект). Тензорезисторные датчики способны измерять деформации порядка одного микрона.

Различают тензорезисторные датчики двух типов: ***проводящие*** (проволочные, фольговые) и ***полупроводниковые***.

Проволочные тензодатчики могут быть ненаклеиваемыми и наклеиваемыми (рис. 1.10, *а*), а полупроводниковые – наклеиваемыми и диффузионными. Схема соединения приведена на рис. 1.10, *б*.

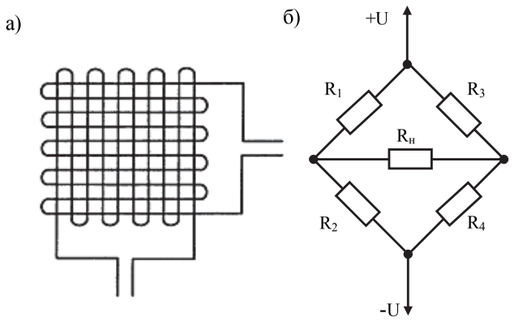


Рис. 1.10. Тензорезисторный датчик:
а – проволочный чувствительный элемент;
б – схема измерительного моста

Ненаклеиваемый проволочный тензодатчик обычно состоит из четырех проволочных секций, намотанных на рамки. Рамки ориентируются таким образом, что усилия, перпендикулярные к их плоскостям, будут вызывать увеличение напряжения в двух секциях, в то же время, уменьшая его в двух оставшихся секциях. Проволочные секции соединяют между собой таким образом, чтобы они образовывали четыре плеча измерительного моста.

4.2. Электрические фильтры

Важным компонентом систем автоматизации производства являются ***фильтры*** – устройства, в различной степени подавляющие или задерживающие электрические сигналы в зависимости от их частот. Фильтры становятся особенно необходимыми, если учесть, что в реальных производственных условиях системы автоматизации должны работать при воздействии электромагнитных излучений, возникающих вследствие процессов в электросети и в силовом электромагнитном оборудовании. Существенным способом борьбы с такого рода помехами является различного рода экранирование как соединительных кабелей, так и агрегатов в целом.

Различают следующие разновидности фильтров:

- *фильтры высокой частоты* (ФВЧ), пропускающие гармонические составляющие сигнала высокой частоты и подавляющие его низкочастотные гармонические составляющие (рис. 4.1);

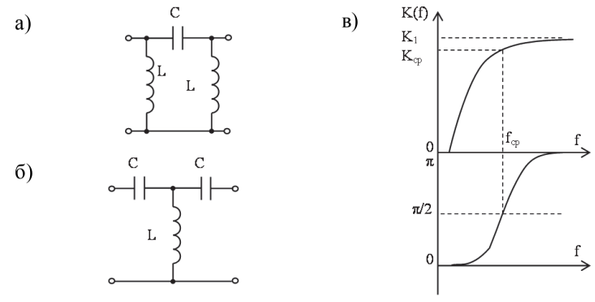


Рис. 4.1. Однотактные фильтры высокой частоты:
а – П-образный ФВЧ; б – Т-образный ФВЧ; в – АФЧХ

- *фильтры низкой частоты* (ФНЧ), пропускающие гармонические составляющие сигнала низкой частоты и подавляющие его высокочастотные гармонические составляющие (рис. 4.2);
- *полосовые фильтры* (ПФ), пропускающие гармонические составляющие сигнала только в заданном диапазоне частот (рис. 4.3);
- *режекторные фильтры* (РФ), подавляющие гармонические составляющие сигнала в заданном диапазоне частот (рис. 4.4).

Основные характеристики электрических фильтров – это полоса пропускания и избирательность.

Границы полос пропускания ($f_в$, $f_н$) определяются по частотам, на которых коэффициент усиления $K(f)$ уменьшается в $2^{-1/2} \approx 0{,}7$ раза.

производит инверсию фазы в области рабочих частот, а РФ показывает разрыв ФЧХ в окрестности резонансной частоты. Таким образом, фильтрация широкополосных электрических сигналов сопровождается не только амплитудными, но и фазовыми искажениями, приводящими к сложному изменению формы фильтруемого сигнала.

Кроме подавления помех, фильтрация сигналов широко применяется в области анализа спектрального состава электрических сигналов. В настоящее время инструменты для обработки сигналов чаще всего выполняют программным способом на основе аналого-цифрового преобразования («оцифровки») исходного широкополосного сигнала. Как известно [5], любой реальный сигнал может быть представлен в виде набора коэффициентов разложения в ряд по функциям. Фильтрация сводится к умножению спектральных коэффициентов на соответствующие значения передаточной функции фильтра. Классический спектральный анализ из-за наличия большого количества операций перемножения требует огромных затрат процессорного времени и при значительном числе отсчетов сигнала неосуществим в реальном масштабе времени. Для сокращения времени спектрального анализа дискретных сигналов разработаны специальные алгоритмы, учитывающие наличие связей между различными отсчетами сигнала и устраняющие повторяющиеся операции. Одним из таких алгоритмов является быстрое преобразование Фурье (БПФ). Также применяется алгоритм взйвлет-преобразования (*wavelet*). Основой цифрового фильтра является сигнальный процессор (*DSP – Digital signal Processor*). Работа этого фильтра, в принципе, основана на алгоритмах, подобных БПФ. Однако за счет того, что часть операций в нем реализована аппаратным путем, фильтр может работать в реальном времени, успевая обрабатывать синтезируемый сигнал в темпе его генерации. Форма АЧХ и ФЧХ фильтра изменяется программным путем.

4.3. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

Как говорилось выше, обработку и преобразование производственной информации производят с помощью различных технических устройств, к числу которых относят:

- фильтры;
- аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи;
- усилители;
- переключающие и логические элементы;
- триггерные и пересчетные схемы;
- преобразователи кодов.

помощью электрических дискретных сигналов. Необходимая точность достигается соответствующим числом разрядов датчика.

Цифровой датчик угла изображен на рис. 1.6. Диск жестко соединен с валом, угол поворота которого подлежит преобразованию в цифровой код. Кодовый рисунок диска состоит из концентрических колец (дорожек), каждое из которых имеет чередующиеся электрически проводящие и непроводящие участки. К заштрихованным токопроводящим участкам подводится напряжение через внешнее кольцо. Считывание осуществляется с помощью токосъемных щеток. Положению щетки на проводящем участке соответствует цифра 1 двоичного кода, а на непроводящем – 0.

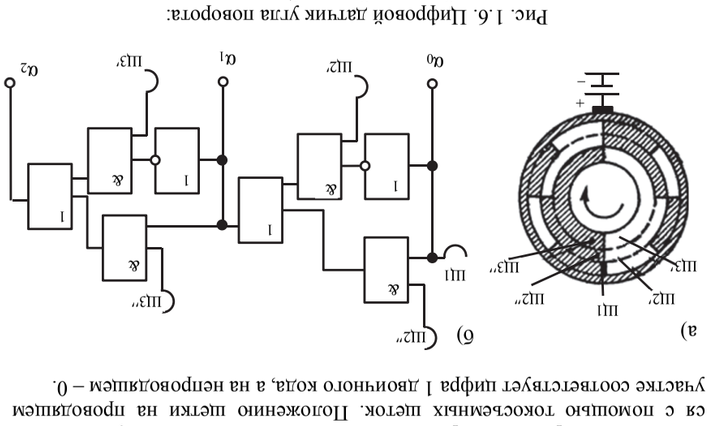


Рис. 1.6. Цифровой датчик угла поворота:
а – трехразрядный кодовый диск; б – схема считывания

1.6. Электроконтактные датчики

Электроконтактные датчики – датчики на основе преобразователей механического перемещения в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью.

Существует большое число конструкций электроконтактных преобразователей различного назначения. Достаточно широкое применение нашел ***двухконтактный преобразователь***. Для контроля и многодиапазонной сортировки деталей на размерные группы необходимо использовать ***многоконтактные преобразователи***. Принципиальная схема такого преобразователя представлена на рис. 1.7.

При построении и эксплуатации электроконтактных датчиков проблема заключается в уменьшении тока, протекающего через контакты. Эта проблема решается в электронных контактных реле, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.8.

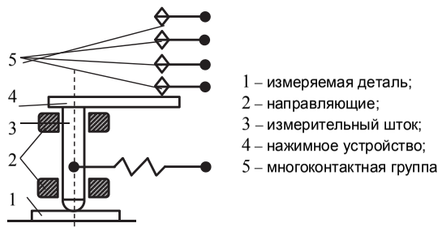


Рис. 1.7. Схема многоконтактного преобразователя

Электромагнитное реле включается/выключается при подаче напряжения на базу транзистора и при изменении соотношения величин сопротивления во входном делителе. По приведенной схеме можно получить схему фотореле путем замены резистора *2* фоторезистором.

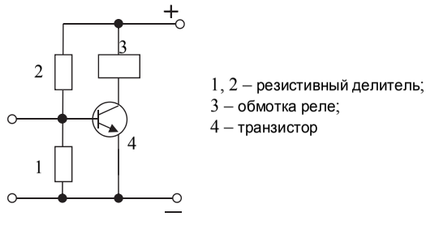


Рис. 1.8. Принципиальная схема электронного контактного реле

1.7. Реостатные датчики

Реостатные (потенциометрические) датчики – это датчики, которые строятся на основе преобразователей, представляющих собой реостат, движок которого движется под действием измеряемой неэлектрической величины. Входной величиной является при этом механическое перемещение движка, а выходной величиной – изменение сопротивления.

Реостатные датчики широко применяются при автоматизации производственных процессов машиностроения. Принципиальная схема и нагрузочная характеристика датчика приведены на рис. 1.9.

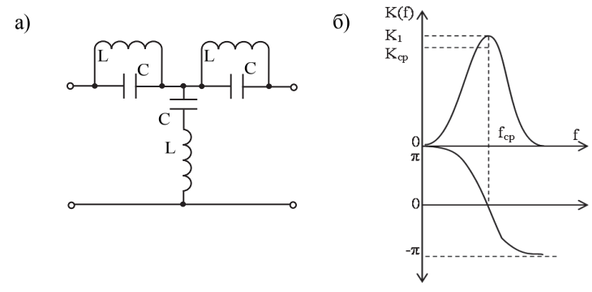


Рис. 4.4. Режекторный фильтр:
а – Т-образный РФ; б – АФЧХ

Избирательность – мера, характеризующая способность фильтра разделять две группы колебаний с близкими частотами. Она определяется крутизной спада коэффициента передачи $K(f)$ на переходном участке от полосы пропускания к полосе подавления. Обычно крутизна спада оценивается в логарифмических единицах, дБ/окт

$$D = 20Lg\left(\frac{K(f_2)}{K(f_1)}\right),$$

где $f_2 = 2f_1$.

Фильтры бывают *пассивные*, состоящие только из пассивных элементов (резистор, конденсатор, катушка индуктивности), и *активные*, называемые ***гираторами***, в состав которых входят усилительные элементы (операционные усилители). Пассивные фильтры используют только энергию фильтруемого сигнала, для работы активных фильтров используют дополнительно подводимую энергию, необходимую для достижения $K_1 \geq 1$.

Простейшие однотактные фильтры, показанные на рис. 4.1 – 4.4, имеют малую крутизну АФЧХ. Чаще в системах обработки сигналов применяют многотактные (каскадные) фильтры, обеспечивающие более интенсивную крутизну АФЧХ. При использовании фильтров для обработки сигналов является важным учет влияния на форму сигнала ФЧХ фильтра. Фаза важна потому, что сигнал, прошедший через фильтр, будет в некоторой степени искажен по форме, т.к. фазовый сдвиг при прохождении через фильтр не будет постоянным для разных частот. На приведенных АФЧХ видно, что незначительные фазовые сдвиги возможны у ФНЧ в области очень низких частот и у ПФ в окрестности резонансной частоты. ФВЧ

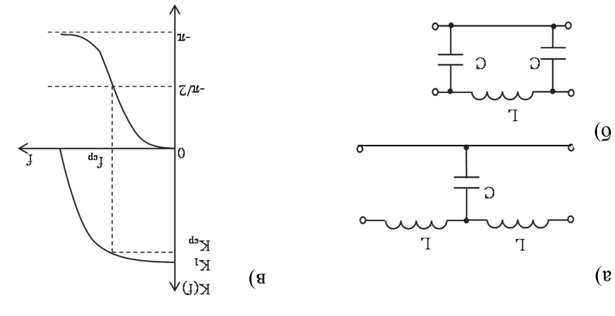


Рис. 4.2. Однотактные фильтры низкой частоты:
а – Т-образный ФНЧ; б – П-образный ФНЧ; в – АФЧХ

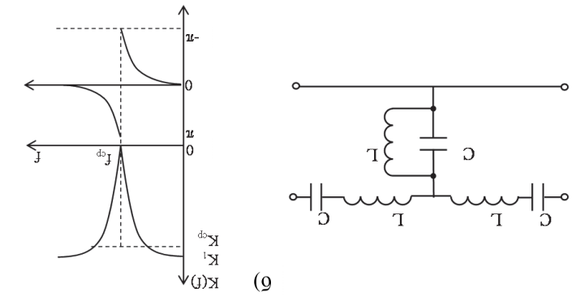


Рис. 4.3. Полосовой фильтр:
а – Т-образный ПФ; б – АФЧХ

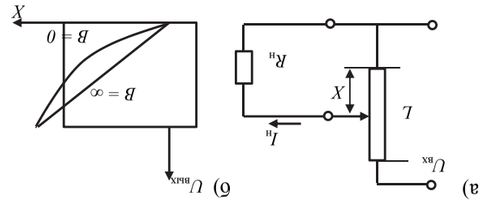


Рис. 1.9. Принципиальная схема и нагрузочная характеристика реостатного датчика:
а – принципиальная схема; б – нагрузочная характеристика

На каркас реостатного датчика, выполненного из изоляционного материала, с равномерным шагом наматывается проволока, обладающая определенным сопротивлением. Изоляция проволоки с одной стороны каркаса зачищается, и по зачищенному участку скользит токосъемная щетка. Вторая щетка скользит по токосъемному кольцу. Обе щетки изолируются от оси, на которой они установлены. Обычно в реостатных преобразователях используется намотанная проволока на основе сплавов платины, обладающих высокими показателями коррозионной стойкости и износостойкости. Используются также такие сплавы, как фехраль, манганин и константан. Минимальные габариты реостатных датчиков – в пределах 5 мм [1].

Форма каркаса влияет на характер зависимости между механическим перемещением движка и выходным сопротивлением (линейная, логарифмическая, антилогарифмическая и т.п.).

К недостаткам реостатных датчиков можно отнести ограниченный срок службы (не превышающий 1 млн циклов) и шумовой фон, возникающий вследствие механического перемещения контактов.

Реверсивный реостатный датчик – это датчик, у которого изменение знака входного перемещения приводит к изменению знака напряжения на выходе датчика. Такие реостатные датчики строятся на основе потенциометров со средней точкой.

Датчики на основе ***электроконтактного сопротивления*** – это датчики, омическое сопротивление которых изменяется под действием механического давления на проводящие элементы, разделенные слоями из плохо проводящего электричество материала. В качестве такого материала используют слои электропроводящей бумаги, электропроводящей резины или металлические пластины, на которые напыляют высокоомный резистивный слой.

4. ПОДГОТОВКА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

4.1. Общие сведения о преобразовании информации в системах автоматизации производственных процессов

Все процессы машиностроения, связанные с информацией, можно подразделить на три группы:

1) получение и индицирование информации о параметрах технологического процесса;

2) получение, переработка и индицирование информации о параметрах технологического процесса;

3) получение и переработка информации о параметрах технологического процесса с последующим использованием полученных результатов для воздействия на технологический процесс.

В первом случае следует говорить о показывающих и регистрирующих приборах. Примером могут служить различного рода измерительные и регистрирующие системы.

Во втором случае следует говорить о системах первичной обработки информации с последующей индикацией и (или) регистрацией переработанной информации. Примером могут служить системы статистической обработки результатов контроля и разбраковки, применяемые в массовом производстве, характерном, например, для подшипниковой промышленности или производства боеприпасов.

В третьем случае следует говорить об автоматических системах управления технологическими процессами. Примером здесь могут служить различные системы программного управления, в том числе ЧПУ станками, системы управления копировальными станками, системы, воспроизводящие изменение какой-либо задающей величины, к которым относятся системы «электрического вала» или системы «гидравлической оси», а также системы стабилизации параметров.

Большей частью системы автоматизации производственных процессов в машиностроении строятся из электрических компонентов.

Это объясняется удобством преобразования электрического сигнала и его передачи на большие расстояния. Однако в ряде случаев электрические компоненты систем автоматизации производства в машиностроении обладают недостаточными для своего предназначения мощностью и быстродействием. Поэтому для реализации подобных систем обычно стремятся разнообразить источники применяемой энергии и наряду с электросетью предприятия использовать также и заводскую сеть сжатого воздуха и (или) создавать локальные гидросистемы.

Ненаклеиваемые тензодатчики обладают меньшей чувствительностью, чем наклеиваемые, и имеют большие габаритные размеры. Они обычно используются в приборах, в которых представляют собой конструктивную часть какого-либо другого устройства, например, нагрузочного элемента или же акселерометра.

Для изготовления тензочувствительных элементов датчиков используются металлы, обладающие высокой температурной стабильностью, т.е. низким температурным коэффициентом сопротивления, что особенно важно при измерении статических напряжений.

1.9. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики работают на основе прямого или обратного пьезоэффекта.

При ***прямом пьезоэффекте*** механическое воздействие, приложенное определенным образом к пьезоэлектрическому кристаллу, приводит к появлению электрического напряжения. Такие элементы (рис. 1.11) применяются в датчиках силы, давления и ускорения.

При ***обратном пьезоэффекте*** электрическое напряжение, приложенное к пьезоэлектрическому кристаллу, вызывает механическую деформацию. Такие элементы применяются для излучения акустических, в том числе ультразвуковых колебаний, а также в пьезоэлектрических реле и в исполнительных элементах автоматических систем, перемещающих зеркала оптических приборов и т.д.

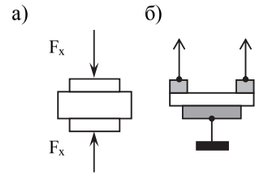


Рис. 1.11. Принципиальные схемы чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков:
а – с прямым пьезоэффектом;
б – с прямым и обратным пьезоэффектами

Пьезорезонаторы – преобразователи с прямым и обратным пьезоэффектами (рис. 1.11).

Пьезорезонаторы можно использовать как:

- резонансные фильтры, т.к. они имеют максимум преобразования на резонансной частоте и минимум вне этой частоты;
- задающий генератор колебаний (управляемые пьезорезонаторы), т.к. при включении в цепь положительной обратной связи усилителя они работают в режиме автоколебаний.

Датчики на основе пьезоэлементов позволяют проводить наиболее точные измерения, но при этом являются чувствительными к различного рода помехам (электромагнитным полям, вибрации и т.д.). Поэтому при их

Рис. 1.13. Принцип работы и статические характеристики емкостных чувствительных элементов:
а – схема емкостного чувствительного элемента; б – статическая характеристика с изменением расстояния между обкладками;
в – схема дифференциального емкостного чувствительного элемента; г – статическая характеристика с изменением расстояния между обкладками

Для измерения смещений менее 1 мм применяются емкостные преобразователи с изменяющимся расстоянием между пластинами. Для измерения смещений, превышающих 1 мм, чаще всего используется преобразователи с изменяющейся площадью перекрытия пластин. В современных емкостных преобразователях обеспечивается возможность измерения перемещений порядка долей микрона. Роль одной из пластин конденсатора может выполнять само изделие, перемещение которого подлежит измерению.

Емкостные преобразователи применяются главным образом в стационарных условиях для проведения стендовых исследований и для предизготовочных измерений физических величин.

Эти датчики чувствительны к температурным колебаниям и изменению влажности. Они могут давать ошибочный или искаженный сигнал, если соединительные провода имеют большую длину и собственные емкость и индуктивность. Калибровка таких датчиков должна производиться вместе с кабелем.

Примером бытового применения емкостного датчика является емкостный микрофон. Он преобразует акустические колебания окружающей воздушной среды в соответствующие электрические сигналы.

Емкостные датчики также используются и для измерения влажности. В этом случае датчик представляет собой конденсатор, состоящий из электрической пленки, на обе стороны которой путем напыления наносятся электроды из золота. Емкость такого датчика оказывается, примерно, прямо пропорциональной влажности окружающей среды, а его постоянная времени составляет примерно 2 мин.

автоматизации производственных процессов в машиностроении предполагает использование различных систем автоматического управления (САУ), которые можно классифицировать по ряду признаков.

По степени автоматизации различают:

- ***начальная степень***, при которой автоматизируются простейшие операции в технологическом процессе (включение/отключение механизмов путем нажатия кнопки и т.п.) – рис. 3.2;
- ***низкая степень***, при которой автоматизируется последовательность выполнения некоторых элементарных операций (смена режущего инструмента, цикл реза отрезального станка) – рис. 3.3;
- ***локальная автоматизация***, позволяющая перевести в полностью автоматический режим с заданной последовательностью выполнения всех необходимых технологических операций и контролем состояния этого технологического процесса (рис. 3.4);

Рис. 3.2. Начальная степень автоматизации

Рис. 3.3. Низкая степень автоматизации

Рис. 3.4. Локальная автоматизация:
$Д_0 \ldots Д_N$ – датчики;
$OY_1 \ldots OY_K$ – объекты управления

- ***комплексная автоматизация производства***, объединяющая локально автоматизированные или автоматические технологические в полностью управляемый и контролируемый единый автоматизированный объект (рис. 3.5);
- ***полная автоматизация***, переводящая комплексно автоматизированный объект в режим полного или частичного автоматического производства (рис. 3.6).

использовании в измерительной цепи предъявляется ряд требований как к установке (креплению) самого датчика, так и к соединительным кабелям.

Так, например, *акселерометр* – измеритель ускорения, работает в условиях больших вибраций, поэтому пьезоэлемент крепится к основанию прибора с помощью пайки. Кабели, соединяющие датчик с другими элементами цепи, должны иметь большое сопротивление изоляции, экранирующую оплетку, малую емкость между проводящей жилой и экранирующей оплеткой, гибкость и т.п.

Для обеспечения симметричности сопротивления связи пьезодатчик обычно выполняется из нечетного числа пластин. Для повышения чувствительности пьезодатчиков их обычно выполняют на основе батареи пьезоэлементов, соединяемых между собой при помощи металлических (фольговых) прокладок.

Также можно увеличить чувствительность за счет использования поперечного пьезоэффекта. Однако в этом случае тонкая пластинка, нагружаемая вдоль, может потерять устойчивость.

Высокой чувствительностью обладают пьезопреобразователи, работающие на изгиб. Пьезоэлемент, называемый в этом случае ***биморфным***, состоит из двух пластин. При действии изгибающей силы верхняя пьезопластина испытывает растяжение, а нижняя – сжатие, в результате чего на этих пластинах появляются заряды противоположного знака.

1.10. Датчики производственных параметров на основе эффекта Холла

Эффект Холла применяется для измерения напряженности магнитного поля (рис. 1.12). Если пластина полупроводника единичной толщины помещается в магнитное поле с напряженностью H, а вдоль нее течет ток величиной I и при этом вектор напряженности электрического поля составляет прямой угол с вектором напряженности магнитного поля, то на боковых гранях этой пластины возникает разность потенциалов U_0, определяемая выражением

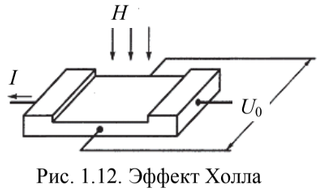


Рис. 1.12. Эффект Холла

$$U_0 = K_H IH,$$

где K_H – постоянная Холла, которая зависит от концентрации свободных носителей зарядов (электронов и ионов) в материале пластины.

Для того чтобы эффект Холла проявлялся в наибольшей степени, толщина пластины преобразователя должна быть наименьшей.

Несмотря на необходимость применения внешнего источника электрического тока I, датчики, использующие эффект Холла, являются генераторными. Они сами вырабатывают электрическое напряжение U_0, однозначно определяющее характеристики измеряемого магнитного поля.

Эффект Холла имеет место у всех материалов, но промышленные датчики такого рода реализуют на базе полупроводников. В качестве полупроводниковых материалов для пластин датчиков применяются обычно арсенид индия и фосфид-арсенид индия. Наиболее широко преобразователи, использующие эффект Холла, применяются для измерения параметров магнитных полей и для определения характеристик ферромагнитных материалов.

Также эти преобразователи находят применение и для измерения других физических величин, изменение которых легко преобразуется в изменение магнитной индукции. С помощью преобразователей, использующих эффект Холла, можно измерять угловые и линейные перемещения, электрические токи и др.

1.11. Емкостные преобразователи

Принцип работы ***емкостных измерительных преобразователей*** заключается в изменении электрической емкости под действием измеряемой физической величины.

Существуют различные принципиальные способы, по которым строятся емкостные измерительные преобразователи:

- Изменение электрической емкости путем изменения расстояния между пластинами конденсатора (рис. 1.13, *а*). Статическая характеристика такого преобразования приведена на рис. 1.13, *б*. Эта характеристика представляет собой обратно пропорциональную (гиперболическую) зависимость.
- Дифференциальное изменение электрической емкости путем введения дополнительной металлической пластины (рис. 1.13, *в*) между пластинами конденсатора, имеющей собственный электрический вывод. Статическая характеристика такого преобразования приведена на рис. 1.13, *г*.

Наибольшая чувствительность емкостного преобразователя имеет место, когда его пластины максимально близки друг к другу. Однако принято считать, что расстояние между ними не может быть менее чем 100 мкм, поскольку в реальности пластины могут быть непараллельными и неплоскими и обладать излишней шероховатостью, и существует опасность их соприкосновения. В результате оказывается предпочтительным иметь большие по площади пластины даже с большим зазором между ними.

3.2. Уровни автоматизации производств

В отличие от степени автоматизации понятие уровня автоматизации относится не к объекту, а к продукту производства.

Критерием разделения автоматизации производства по уровням может служить сложность и трудоемкость изготовления продукта.

С точки зрения локальной автоматизации в непрерывных процессах требуется регулировать расход, давление, температуру, напряжение, перемещение подвижных элементов и прочие величины во всем диапазоне их изменений («аналоговое» регулирование). Это разнообразные химические реакторы, процессы приготовления пищевых продуктов, металлургия, снабжение теплом, водой и электроэнергией. К дискретным относят производства с конечным числом состояний переменных, например, с включением и отключением клапанов, задвижек, пускателей по сигналам двухпозиционных датчиков.

При комплексной автоматизации объединяются в единую систему все или большинство локально автоматизированных технологических процессов рассмотренных производств.

С позиции комплексной автоматизации различают три типа производств: *непрерывное* (нефтепереработка, водоподготовка); *дискретное* (ковка, штамповка, деревообработка) и *дискретно-непрерывное*, в котором на некоторых из дискретных этапов производства осуществляется непрерывное течение процесса (электродуговое сталеплавильное производство).

В ***непрерывных техпроцессах*** занято мало людей, т.к. «аналоговое» регулирование требует высокой точности и является очень ответственным. За счет их автоматизации можно снизить затраты материалов и энергии или стабилизировать технологический процесс, исключив его зависимость от субъективных факторов. Для управления таким производством требуется согласование динамических характеристик объекта управления и системы автоматического регулирования во всем интервале изменения регулируемых величин.

Автоматизация ***дискретного производства*** развита меньше вследствие большого разнообразия изделий и операций, повышенных требований к точности операций. Здесь занято множество рабочих ручного труда. Для дискретного производства может быть огромное число вариантов автоматизации, отличающихся последовательностью операций, затратами и эффективностью. Их сопоставление требует формального описания алгоритмов управления оборудованием и разработки моделей организации производства. В последнее время методы автоматизации дискретного производства все чаще применяют к автоматизации непрерывного производства.

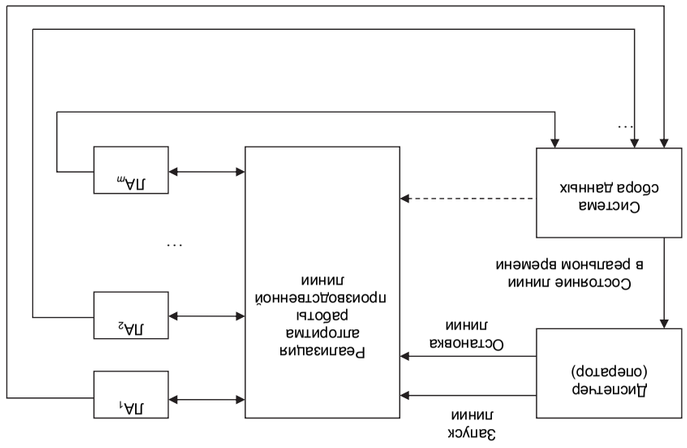


Рис. 3.5. Комплексная автоматизация производства

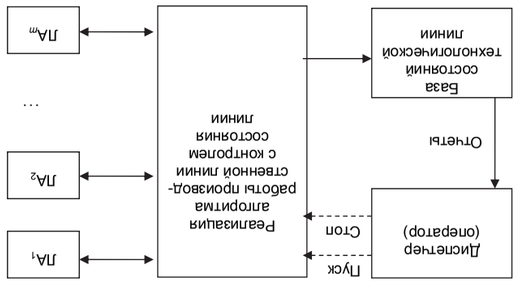


Рис. 3.6. Полная автоматизация

можно выделить промежуточные, таким образом, понятие соседних состояний к такому процессу неприменимо (можно говорить лишь о последовательных состояниях и о близости их друг другу во времени). *Примером дискретного процесса* является работа многооперационного станка, в котором можно выделить состояния будущего изделия поэтапно от заготовки через промежуточные операции фрезерования, сверления, развертки, штамповки, опрессовки и т.д. к получению готового изделия, узла, блока. *Примером непрерывных процессов* является перегонка нефти, где продукты перегонки находятся в непрерывных химических реакциях с другими реактивами;

- ***апериодические*** и ***циклические*** процессы. Возникновение апериодических процессов случайно во времени. В циклических процессах напротив одни и те же состояния повторяются во времени в одной и той же последовательности;
- ***конечные*** (с известным или неизвестным, но заведомо конечным временем протекания), например, вывод манипулятора на определенную координату, и ***бесконечные*** (в абстрактном смысле) – регулирование частоты вращения турбины гидрогенератора;
- ***управляемые*** (регулирование температуры кристаллизации при разливке стали) и ***неуправляемые*** (самопроизвольное остывание блюминга) в зависимости от наличия внешнего воздействия на ход процесса;
- ***линейные*** (однонаправленные, выполняющиеся по линейному алгоритму) и ***разветвленные*** (меняющие направление хода ТП в зависимости от каких либо факторов, например, текущая отбраковка полуфабрикатов) процессы.

В общем виде объектом автоматизации является производственный процесс, который можно представить как систему, преобразующую ресурсы энергии, материалов и информации (рис. 3.1).

Система преобразует материалы с целью получения наибольшей прибыли от их продажи. Это достигается путем увеличения глубины обработки материалов, экономии энергии, более полного использования информации.

Рис. 3.1. Представление производственного процесса

Примеры преобразования указанных ресурсов: создание микроэлектронных компонентов из незначительных объемов сырья, сокращение простоев оборудования, программное управление оборудованием.

Каждый из процессов преобразования может быть в той или иной степени автоматизирован. Под «степенью автоматизации» можно понимать степень *оснащенности* объекта устройствами автоматизации:

Шаговый искатель представляет собой набор контактов, которые по очереди замыкаются бегунком, управляемым импульсами электрической энергии. Точность позиционирования бегунка на определенной паре контактов обеспечивается подпружиненным храповым механизмом. В ответствии с подданным числом импульсов искатель позиционирует бегунок на определенной паре контактов, замыкая нужную цепь. Применяются искатели в устройствах типа электромеханических телефонных станций.

Устройство защитного отключения (УЗО; более точное название: *устройство защитного отключения, управляемое дифференциальным током*) *тока*, УЗО-Д), или ***выключатель дифференциального тока*** (ВДТ), или ***защитно-отключающее устройство*** (ЗОУ) – механический коммутационный аппарат или совокупность элементов, которые при достижении (превышении) *дифференциальным* током заданного значения при определённых условиях эксплуатации должны вызвать размыкание контактов. Может состоять из различных отдельных элементов, предназначенных для обнаружения, измерения (сравнения с заданной величиной) дифференциального тока и замыкания и размыкания электрической цепи (разъединителя). Основная задача УЗО – защита человека от поражения электрическим током и от возникновения пожара, вызванного утечкой тока через изношенную изоляцию проводов и некачественные соединения.

Широкое применение также получили комбинированные устройства, совмещающие в себе УЗО и устройство защиты от сверхтока, такие устройства называются УЗО-Д со встроенной защитой от сверхтоков, либо просто ***дифавтоматом***. Этот прибор измеряет разность (дифференциал тока), протекающих по паре проводов, к которым подключена нагрузка. Если по какой-то причине происходит изменение тока (чаще всего увеличение при замыкании на проводящую среду, реже – уменьшение при появлении дополнительного контура утечки в источник) в одном из проводов, то дифавтомат срабатывает в соответствии с настройкой. Часто дифавтоматы снабжаются специальной индикацией, позволяющей определить, по какой причине произошло срабатывание (от сверхтока или от дифференциального тока).

Аемомашинные выключатели, применяемые в электрических схемах автоматизации, предназначены для отключения тока при нормальных условиях работы, а также для автоматического аварийного отключения тока при коротком замыкании или перегрузке. При нормальной работе электрических схем автоматизации подобные автоматические выключатели находятся в режиме ожидания. В большинстве автоматических выключателей устройство, осуществляющее аварийное отключение, реагирует на один из трех случаев: ток превышает заданное значение, ток оказывается ниже заданного значения, контролируемое напряжение падает до нуля.

В зависимости от физических явлений, которые используются для построения электромагнитных преобразователей, они могут быть подразделены на следующие группы:

- преобразователи тока и напряжения;
- электромеханические преобразователи электрического тока в электромагнитную силу;
- магнитоупругие преобразователи, использующие изменение магнитной проницаемости ферромагнитных сердечников под воздействием механических напряжений;
- индукционные преобразователи, основанные на изменении электромагнитной индукции;
- индуктивные преобразователи, применяющиеся для измерения неэлектрических величин, которые влияют на изменение положения тех или иных элементов преобразователей, вызывая изменение индуктивности;
- магнитомодуляционные преобразователи, использующие нелинейные свойства магнитных цепей.

Электроизмерительные приборы двух первых групп могут строиться также по *электродинамическому* и *магнитоэлектрическому* принципу.

Электродинамические приборы основаны на взаимодействии тока, протекающего по одной из катушек (подвижной) с магнитным потоком, создаваемым током, проходящим по другой катушке (неподвижной).

Электродинамический измерительный механизм обладает сравнительно небольшим полезным вращающим моментом, и поэтому моменты от влияния внешних полей этот механизм закрывают специальным экраном. Устройство такого типа характеризуется большими габаритными размерами и потребляет значительную мощность. Оно используется главным образом в лабораторных приборах переменного тока.

Магнитоэлектрические приборы реализующий момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля катушки, по которой протекает ток.

Магнитоэлектрический измерительный механизм обладает более высоким полезным моментом. Он не реагирует на внешние магнитные поля. Измерительный механизм такого типа обладает точностью и имеет линейную зависимость между углом поворота и измеряемым током.

В настоящее время стремятся во всех электромеханических измерительных приборах использовать один тип механизма: магнитоэлектрический с преобразованием измеряемой величины в постоянный ток.

Для построения датчиков неэлектрических величин в машиностроении также используется физическое явление изменения магнитной проницаемости ферромагнитных тел под действием приложенной к ним механи-

1.12. Оптоэлектронные преобразователи

На основе оптоэлектронных преобразователей созданы датчики давления, силы, перемещения, скорости, акустических параметров, напряженности электрического и магнитного полей. В последнее время все чаще используют волоконно-оптические датчики, т.к. они стабильно работают в сильных электромагнитных полях, агрессивных и взрывоопасных средах.

Оптоэлектроника подразумевает оптические и электронные методы измерений. Измерения производятся в *области оптических частот*, которая составляет небольшую часть всей полосы частот электромагнитного измерения. Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, находящиеся в диапазоне длин от 0,001 до 1 000 мкм. Этот диапазон длин волн, в свою очередь, разделен на три поддиапазона: ультрафиолетовую область, область видимого света и область инфракрасного излучения.

Радиометрия – измерения в области оптических частот.

Фотометрия – радиометрия, использующая видимый свет.

Оптоэлектронные приборы делят на источники и приемники оптического излучения. К искусственным источникам излучения относятся: *лампы накаливания*, *газоразрядные лампы*, *лазеры*, *светодиоды*.

Лампы накаливания с вольфрамовой нитью имеют непрерывный спектр излучения, охватывающий видимую и инфракрасную области. Лампа накаливания характеризуется пространственным распределением света, близким к сферическому, и в большинстве случаев может рассматриваться как точечный источник. Недостатком ламп накаливания является их малый коэффициент полезного действия: только 2 % подводимой к ним электрической мощности преобразуется в видимое излучение.

Газоразрядные лампы подразделяются на лампы непрерывного свечения и импульсного разряда. Недостатком газоразрядных ламп являются их сравнительно большие габаритные размеры и сложность схем питания.

Лазеры бывают газовыми, твердотельными и полупроводниковыми. Наибольшее распространение получили газовые лазеры, характеризующиеся монохроматичностью и поляризованностью излучаемого ими когерентного света. *Когерентность* – свойство электромагнитного излучения, которое состоит в том, что между двумя или более множествами волн имеется постоянное соотношение фаз.

Светодиоды на сегодняшний день являются самыми распространенными излучателями света в видимом или инфракрасном диапазоне. Принцип действия светодиодов основан на генерировании светового излучения при рекомбинации электронов и дырок в полупроводниковом материале. Основные материалы, используемые для изготовления таких светодиодов, – арсенид и фосфид галлия.

Приемники излучения можно подразделить на две группы: интегральные и селективные.

Интегральные приемники базируются на преобразовании энергии излучения в температуру независимо от длины волны этого излучения.

Интегральный (тепловой) приемник представляет собой металлический диск, с которым контактирует термочувствительный элемент, измеряющий фактическую температуру этого диска. Рабочая поверхность указанного диска покрывается слоем черни, который поглощает почти все падающее на него излучение. Выходной электрический сигнал пропорционален мощности падающего на рабочую поверхность диска излучения и не зависит от спектрального состава этого излучения.

Существуют приемники излучения, выполненные в виде полоски из двух различных металлов, образующих термопару, либо в виде полоски, стержня из металла или полупроводника, который изменяет свое сопротивление в зависимости от температуры. В последнем случае датчик называется ***болометром***. Для уменьшения потерь тепла на *конвекцию* тепловой приемник может быть установлен в стеклянный баллон, из которого откачивается воздух. Это повышает точность преобразования, а чувствительность такого датчика возрастает в 10 и более раз. В баллоне предусматривается окно из кварца, прозрачного для ультрафиолетового и инфракрасного излучений.

К ***селективным приемникам*** относят фотоэлектрические преобразователи, реагирующие на ту или иную определенную длину волны излучения:

1) ***Фотоэлемент*** – прибор с внешним фотоэффектом. При попадании света от постороннего источника на катод последний начинает излучать электроны, которые затем попадают на анод с положительным потенциалом. Фотоэлементы работают только в цепях постоянного тока. Для питания фотоэлемента необходим источник тока постоянного напряжения. Фотоэлементы выпускаются двух типов – вакуумные и газонаполненные. В *вакуумных фотоэлементах* ток образуется только фотоэлектронами, а в *газонаполненных* – фотоэлектронный ток еще и усиливается за счет ионизации газа, производимой фототоком. Газонаполненные фотоэлементы обладают большей чувствительностью, чем вакуумные, но менее стабильны в работе и обладают некоторой инерционностью.

2) ***Фотоэлектронный умножитель*** – прибор, в котором фототок усиливается с помощью вторичной электронной эмиссии с промежуточных катодов, в которые ударяется поток электронов, усиленных электрическим полем, включенным между парами соседних катодов. Общий коэффициент усиления одного фотоумножителя может достигать сотен тысяч при практически безынерционном преобразовании. Поэтому фотоумножители используются для регистрации быстро протекающих процессов, когда требуется особо высокая чувствительность.

3) В ***фотодиодах*** оптическое излучение преобразуется в электрические сигналы за счет явления внутреннего фотоэффекта, при котором в области *p-n*-перехода полупроводника поглощаемый фотон образует пару новых носителей заряда – электрон и дырку. При отсутствии внешнего поля в области *p-n*-перехода существует внутреннее электрическое поле, препятствующее движению носителей. При облучении перехода фотонами света возникают электронно-дырочные пары. Поле *p-n*-перехода пространственно разделяет электроны и дырки и создает тем самым фотоэлектродвижущую силу (фото-ЭДС) между смежными областями кристалла. За счет этого образуется ток (фототок), вызванный движением электронов по внешней цепи.

4) ***Фототранзисторы*** относятся к полупроводниковым приемникам излучения. Фототранзистор представляет собой тот же фотодиод, снабженный усилителем фототока. Фотодиоды могут работать в двух режимах: фотогенераторном и фотодиодном. В *фотогенераторном* режиме отсутствует источник внешнего напряжения. В *фотодиодном* режиме имеет место подключение внешнего напряжения в запирающей полярности. При отсутствии облучения под действием этого напряжения в измерительной цепи течет *темновой ток*, который обычно невелик. При освещении фотодиода ток в измерительной цепи увеличивается в зависимости от интенсивности облучения.

5) ***Фоторезисторы*** представляют собой полупроводниковую пластинку с контактами, которая при освещении в результате внутреннего фотоэффекта уменьшает свое сопротивление. В качестве полупроводникового материала используют сернистый свинец, селенид кадмия, сернистый кадмий и др. Фоторезисторы имеют самые различные конструкции. Они могут быть выполнены герметичными, с жесткими или с мягкими выводами, кольцевой формы и др. Фоторезисторы могут применяться также и в преобразователях перемещений. В этом случае перемещение светового зонда возможно в направлении как перпендикулярном, так и параллельном электродам.

1.13. Электромагнитные преобразователи

Электромагнитные преобразователи используют зависимости характеристик магнитной цепи (магнитное сопротивление, магнитная проницаемость, магнитный поток и т.д.) от величины механического воздействия на элементы этой цепи. Преобразователи строятся на основе одного или нескольких контуров, по которым могут протекать электрические токи, находящиеся в магнитном поле, создаваемом самими этими токами или каким-либо внешним источником.

В электрических цепях управления используются однополюсные автоматические выключатели, а в трехфазных цепях переменного тока используются трехфазные автоматические выключатели.

Электромеханические счетчики предназначены в основном для контроля производства серийной продукции или других процессов, связанных с перемещением подсчитываемых объектов (не путать со счетчиками электрической энергии, в которых отсутствует импульсообразование). Как правило, в качестве датчика применяется механический прерыватель или индуктивный датчик или энкодер. Счетчики с предустановкой выдают сигнал (переключение контакта) при достижении предустановленного значения.

Для автоматического отключения защищаемой электрической цепи в случае перегрузок или короткого замыкания применяются также *плавкие предохранители*. Однако они являются электрическими аппаратами одноразового действия.

Защита электрических цепей от перегрузок недопустимой длительности обычно обеспечивается различного рода *тепловыми реле*.

Для целей автоматизации применяются однофазные и трехфазные трансформаторы. Они используются для питания номинальным напряжением цепей управления, местного освещения и сигнализации, а также цепей электродинамического торможения электроприводов. При этом напряжение на первичной обмотке таких трансформаторов составляет обычно 220; 380 или 660 В переменного тока, что соответствует фазным напряжениям заводской электросети.

Светосигнальная аппаратура предназначена для индикации состояния тех или иных производственных параметров, а также для аварийной и предупреждающей световой сигнализации. Светосигнальная аппаратура бывает различного установочного диаметра и формы. Она может обладать разным свечением – красным, синим, желтым, зеленым и белым. Подобная аппаратура может различаться также по характеру используемого источника света, которым могут быть лампы накаливания, газосветные лампы, светодиоды и др.

Разновидностями светосигнальной аппаратуры являются светофоры и световые табло. Обычно промышленный светофор имеет четыре светосигнальных секции различного цвета. *Световым табло* обычно называют светосигнальное поле, собранное из многих элементов.

Блоки зажимов и электрических соединителей предназначены как для соединения, так и для разветвления проводов в цепях управления и силовых цепях. При разработке электрических систем автоматизации производственных процессов в машиностроении следует предусматривать специальные меры электробезопасности. Так, каждый шкаф системы автоматизации должен снабжаться общим вводным выключателем обязательно ручного действия. Рукоятка этого вводного выключателя должна устанав-

ливаться в легкодоступном месте и обязательно снаружи шкафа проектируемой системы автоматизации.

Дверцы кожухов проектируемых систем автоматизации должны снабжаться необходимыми блокировками, делающими в случае необходимости невозможным подвод напряжения к создаваемым системам. Эти блокировки должны иметь возможность отключения.

Критерием, определяющим надежность заземления или зануления потребителей энергии, является величина электрического сопротивления между металлическими корпусами создаваемой системы и тем узлом, к которому подсоединяется внешняя цепь защитного заземления. Считается, что это сопротивление должно быть порядка 0,1 Ом.

Для индикации состояния отдельных узлов, агрегатов, состоящих из этих узлов, и всей автоматизированной производственной системы в целом принято использовать светосигнальную аппаратуру. Для подключения такой аппаратуры к объектам длинных линий запитывают эту аппаратуру от специальных трансформаторов.

В последнее время для последовательного проведения принципа модульности при построении систем автоматизации во все возрастающих масштабах применяются мехатронные узлы. ***Мехатронный узел*** представляет собой электромеханическое устройство, включающее в себя встроенный электродвигатель с электромагнитной или электромеханической редукцией, встроенные датчики механических и электрических величин, микроэлектронное устройство управления движением этого устройства, а также другие электронные, оптоэлектронные, электромеханические и механические компоненты, обеспечивающие функциональную, конструктивную и эксплуатационную законченность данного устройства.

Использование мехатронных узлов позволяет существенно упростить структуру создаваемой системы автоматизации; значительно снизить трудоемкость ее создания; повысить качество создаваемой системы автоматизации, в том числе ее безотказности и долговечности.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОБЪЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1. Виды технологических процессов

Процесс (от лат. processus – продвижение) – последовательная смена состояний объекта во времени.

Различают следующие *виды процессов*:

- ***дискретные*** и ***непрерывные*** процессы. У дискретных процессов состояния четко отграничены друг от друга, и для каждого состояния можно указать соседние (предыдущее и последующее, или только одно из них). У непрерывных процессов между двумя любыми состояниями всегда

• устойчивость к импульсным перенапряжениям и разрушающим помехам, появляющимся при разрядах молний и в результате коммутационных процессов в высоковольтной электротехнике;

• исключительная электрическая изоляция между управляющей цепью (катушкой) и контактной группой – последний стандарт 5 кВ недоступен большинству полупроводниковых ключей;

• малое падение напряжения на замкнутых контактах, и, как следствие, малое выделение тепла: при коммутации тока 10 А малогабаритное реле суммарно рассеивает на катушке и контактах менее 0,5 Вт, в то время как симисторное реле отдает в атмосферу более 15 Вт, что, во-первых, требует интенсивного охлаждения, а во-вторых, усугубляет парниковый эффект на планете;

• экстремально низкая цена электромагнитных реле по сравнению с полупроводниковыми ключами.

Недостатки реле: малая скорость работы; ограниченный (хотя и очень большой) электрический и механический ресурс; создание радиопомех при замыкании и размыкании контактов; проблемы при коммутации индуктивных нагрузок и высоковольтных нагрузок на постоянном токе.

Типовая практика применения мощных электромагнитных реле – это коммутация нагрузок на переменном токе 220 В или на постоянном токе 5 – 24 В при токах коммутации до 10 – 16 А. Обычными нагрузками для контактных групп мощных реле являются нагреватели, маломощные электродвигатели (например, вентиляторы и сервоприводы), лампы накаливания, электромагниты и прочие активные, индуктивные и емкостные потребители электрической мощности в диапазоне от 1 Вт до 2 – 3 кВт.

Электромагнитные контакторы и пускатели, применяемые в системах автоматизации, являются различными вариантами уже рассмотренных устройств, снабженными элементами дугогашения для надежной коммутации мощных электрических нагрузок.

Также различными вариантами уже рассмотренных устройств являются *электромагниты*, предназначенные для силового воздействия на ферромагнитные сплавы за счет сил электромагнитной индукции.

Кроме устройств коммутации, имеющих рассмотренное устройство, существуют и применяются специальные виды электромагнитных устройств:

• шаговый искатель;

• устройство защитного отключения;

• автоматический выключатель;

• реле времени – предназначены для выдержки интервала времени между моментом включения катушки реле и замыканием или размыканием его контактов, а также моментом выключения катушки реле и размыканием или замыканием его контактов;

• электромеханический счетчик.

• измерительный наконечник касается детали только очень короткое время, и его износ практически отсутствует, что дает возможность контролировать размеры компонентов, обладающих высокими окружными скоростями, например, создается возможность контроля профиля и размеров вращающегося абразивного круга;

• передаточное отношение от датчика к регистрирующему прибору или к исполнительному механизму может быть задано в достаточно широких пределах;

• в процессе подвода щупа к обрабатываемой детали исключается опасность повреждения измерительного наконечника;

• датчик выдает усредненный результат измерений.

Датчики такого типа широко применяются в машиностроении для автоматического контроля на круглo- и внутришлифовальных станках, при тонком точении и при хонинговании.

Бухгеликовые преобразователи основаны на изменении индуктивности и взаимоиндуктивности катушек при приближении к ним проводящего тела. На интенсивность и характер распределения вихревых токов, возбуждаемых на поверхности объекта, кроме контролируемого зазора, существенное влияние оказывают: толщина токопроводящего слоя, магнитная проницаемость и удельная электрическая проводимость материала подавляющего проводящего тела.

Подобные преобразователи используются для контроля линейных размеров и толщины тонких пластин и покрытий, для обнаружения внутренних дефектов и всякого рода трещин, отслоений, царапин и раковин. Вихретоковые преобразователи используются также для измерения вибраций, для определения частоты, амплитуды и форм вибрации при динамических испытаниях изделий машиностроения. Обычно измеряемые амплитуды лежат в пределах 1 – 2000 мкм при частотах 20 – 20 000 Гц. Этот же принцип используется для контроля вращающихся валов.

Стабильность работы вихретоковых преобразователей определяется стабильностью частоты сигнала задающего генератора и постоянством параметров катушек индуктивности и конденсаторов. Применяя вихретоковые преобразователи, следует учитывать, что они чувствительны к внешним электромагнитным полям.

Для вихретоковых преобразователей характерны: относительно низкая чувствительность и наличие погрешностей, обусловленных изменениями электрических свойств проводящего тела. Однако такие преобразователи все же нашли свое применение в схемах активного контроля, поскольку они могут успешно работать в загрязненных и агрессивных средах, при воздействии различных смазывающе-охлаждающих жидкостей и при высоких скоростях подачи инструмента и обрабатываемых изделий.

Реле. *Реле* – электрический аппарат, предназначенный для коммутации электрических цепей (скачкообразного изменения выходных величин) при заданных изменениях электрических или неэлектрических входных величин.

Релейные элементы (реле) находят широкое применение в схемах управления и автоматики, т.к. с их помощью можно комбинировать сигналы цепи мощных потребителей малыми по мощности управляющими сигналами; осуществить гальваническую развязку слоков электрических устройств; выполнять логические операции; создавать многофункциональные релейные устройства; регистрировать отклонения контролируемого параметра от заданного уровня; выполнять функции запоминающего элемента и т.д.

Реле классифицируют по различным признакам, в частности:

• по виду входных физических величин, на которые они реагируют;

• по функциям, которые они выполняют в системах управления;

• по конструкции и т.д.

По виду физических величин различают реле:

• электрические;

• механические;

• тепловые;

• оптические;

• магнитные;

• акустические и т.д.

При этом следует отметить, что реле может реагировать не только на значение конкретной величины, но и на разность значений (дифференциальные реле), на изменение знака величины (поляризованные реле) или на скорость изменения входной величины.

По начальному состоянию контактов выделяются реле:

• с нормально замкнутыми контактами;

• с нормально разомкнутыми контактами;

• с переключающимися контактами.

По типу управляющего сигнала выделяются реле:

• постоянного тока;

• переменного тока.

По типу исполнения:

• электромеханические реле;

• электромагнитные реле (обмотка электромагнита неподвижна относительно сердечника);

• магнитоэлектрические реле (обмотка электромагнита с контактами подвижна относительно сердечника);

• термореле (биметаллическое);

• герконовые реле.

ческой нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, кручение). На этом основано построение *магнитоупругих преобразователей*.

Обратным магнитной упругости является эффект ***магнитострикции***, заключающийся в возникновении механических деформаций и напряжений в ферромагнитном материале при изменении в нем напряженности магнитного поля.

Магнитоупругие свойства проявляются также и при скручивании ферромагнитных тел. При пропускании тока через стержень, на который воздействует крутящий момент, в нем возникает дополнительный продольный магнитный поток, который наводит в обмотке, намотанной на стержень, электродвижущую силу (ЭДС), пропорциональную этому крутящему моменту.

Магнитоупругие преобразователи используются для измерения сил, давлений, крутящих моментов. Они развивают достаточную мощность и могут быть включены в последующую цепь без промежуточного усиления сигнала. Такие преобразователи обладают высокой надежностью, т.к. не содержат подвижных частей. Они могут измерять как статические, так и динамические нагрузки.

Преобразователями магнитного поля являются также и ***датчики Виганда***. Датчик состоит из проволоки, изготовленной из ферромагнитного сплава типа викаллой (10 % ванадия, 52 % кобальта и железа), и обмотки. Проволока Виганда представляет собой ферромагнитное тело, состоящее из магнитомягкой сердцевины и магнитотвердой внешней оболочки. Диаметр проволоки 0,2 – 0,3 мм; длина 5 – 40 мм. Обмотка датчика обычно составляет 1000 – 2000 витков медного провода диаметром 0,05 – 0,10 мм. Если расположить такую катушку в магнитном поле, то при изменении направления магнитного поля в катушке возникает электрический импульс длительностью около 20 мс и с максимальным напряжением около 2,5 В. Такие датчики используются, например, для индикации положения зубчатых колес. Датчики Виганда работают в диапазоне температур от -196 до +175 °С. Они не требуют внешнего источника питания, создают выходной сигнал порядка нескольких вольт и электробезопасны.

На рис. 1.14 показано принципиальное устройство датчика Виганда. На рис. 1.14, *а* показано возбуждение импульсов в катушке датчика с помощью магнитно-бистабильной проволоки. Амплитуда и длительность импульсов не зависят от скорости изменения магнитного поля, что позволяет применять датчик Виганда при скоростях изменения магнитного поля, близких к нулю. На рис. 1.14, *б* показан способ применения такого датчика. Модульное исполнение датчика, состоящего из проволоки, обмотки и постоянного магнита, позволяет разрабатывать большое число вариантов датчиков перемещения.

По контролируемой величине:

- реле напряжения;
- реле тока;
- реле мощности;
- реле пневматического давления.

Устройство реле. Реле обычно состоит из трех основных функциональных элементов: *воспринимающего*, *промежуточного* и *исполнительного*. Воспринимающий (первичный) элемент воспринимает контролируемую величину и преобразует её в другую физическую величину. Промежуточный элемент сравнивает значение этой величины с заданным значением и при его превышении передает первичное воздействие на исполнительный элемент. Исполнительный элемент осуществляет передачу воздействия от реле в управляемые цепи. Все эти элементы могут быть явно выраженными или объединёнными.

Воспринимающий элемент в зависимости от назначения реле и рода физической величины, на которую он реагирует, может иметь различные исполнения как по принципу действия, так и по устройству. Например, в реле максимального тока или реле напряжения воспринимающий элемент выполнен в виде электромагнита, в реле давления – в виде мембраны или сильфона, в реле уровня – в виде поплавка и т.д.

По устройству исполнительного элемента реле подразделяются на *контактные* и *бесконтактные*. Контактные реле воздействуют на управляемую цепь с помощью электрических контактов, замкнутое или разомкнутое состояние которых позволяет обеспечить или полное замыкание, или полный механический разрыв выходной цепи. Бесконтактные реле воздействуют на управляемую цепь путем резкого (скачкообразного) изменения параметров выходных электрических цепей (сопротивления, индуктивности, емкости) или изменения уровня напряжения (тока).

Различают следующие ***основные характеристики реле***:

1) Величина срабатывания $X_{ср}$ реле – значение параметра входной величины, при которой реле включается. Величина срабатывания, на которую отрегулировано реле, называется *уставкой*.

2) Мощность срабатывания $P_{ср}$ реле – минимальная мощность, которую необходимо подвести к воспринимающему органу для перевода его из состояния покоя в рабочее состояние.

3) Управляемая мощность $P_{упр}$ – мощность, которой управляют коммутирующие органы реле в процессе переключения. По мощности управления различают реле цепей малой мощности (до 25 Вт), реле цепей средней мощности (до 100 Вт) и реле цепей повышенной мощности (свыше 100 Вт), которые относятся к силовым реле и называются *контакторами*.

4) Время срабатывания $t_{ср}$ реле – промежуток времени от подачи на вход реле сигнала $X_{ср}$ до начала воздействия на управляемую цепь. По

которая изменяется при перемещении ферромагнитного якоря. При этом изменяется и магнитный поток, проходящий через катушку, намотанную на сердечнике. Изменение воздушного зазора S_0 приводит к изменению индуктивности.

Различают индуктивные преобразователи:

- с *переменной величиной зазора*, используемые для измерения перемещений от долей микрона до нескольких миллиметров;
- индуктивные преобразователи с *переменной площадью зазора*, используемые для измерения перемещений, не превышающих 15 – 20 мм;
- индуктивные преобразователи с *подвижным цилиндрическим сердечником* – индуктивные преобразователи соленоидного типа, используемые для измерения больших перемещений, достигающих 2000 мм;
- преобразователи *трансформаторного* типа – устройства, в которых входное перемещение изменяет величину индуктивной трансформаторной взаимосвязи между двумя системами обмоток, из которых одна запитывается базовым переменным током, а с другой снимается выходной сигнал.

Индуктивные преобразователи характеризуются большим по мощности выходным сигналом и могут использоваться без усилителя.

Индуктивные преобразователи широко используются в устройствах активного контроля размеров обрабатываемой детали, особенно при чистовых методах обработки.

Датчики с индуктивными преобразователями устанавливаются для контроля прерывистых поверхностей, таких, как шлицевые валы и втулки, валы со шпоночными пазами. Для предохранения измерительных наконечников от повреждений при их прохождении над местом, где поверхность прерывается, автоматически с помощью микропереключателя включается электромагнит, который отводит наконечники. Электромагнит отключается, когда измерительные наконечники снова оказываются над гладкой поверхностью. Датчик в процессе работы подает сигналы в систему управления станка.

Индуктивные преобразователи также используются в механической обработке для построения *виброгенераторных датчиков*, которые часто применяются взамен контактных датчиков, т.к. с точки зрения механической обработки последние имеют ряд эксплуатационных недостатков:

- при попадании под измерительный наконечник стружки или абразивной пыли точность измерения резко снижается;
- на точность измеряемых размеров оказывает влияние шероховатость поверхности детали;
- преобразователи контактного типа характеризуются длинной и подверженной помехам линией передачи информации до места, где эта информация используется.

В отличие от контактных датчиков виброгенераторные датчики обладают рядом положительных эксплуатационных свойств:

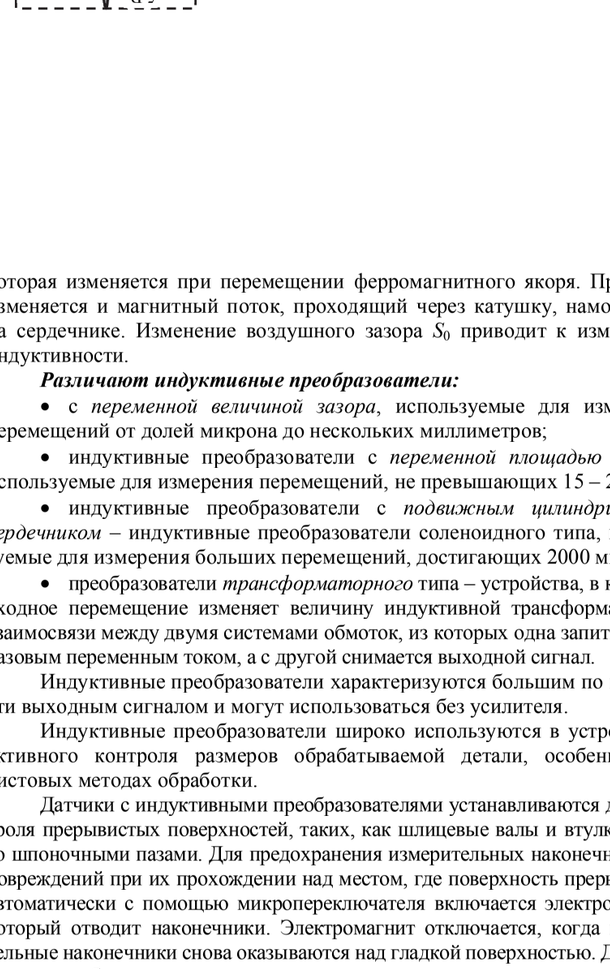
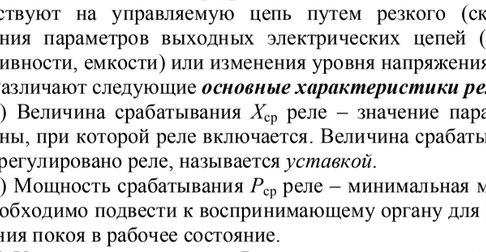


Рис. 1.14. Устройство и принцип действия датчика Виганда

Область их применения простирается от задач измерения и контроля до систем управления движущимся, в которых они служат носителями информации в идентификационных картах.

Принцип действия ***индукционных преобразователей*** состоит в изменении их индуктивности при перемещении того или иного элемента их конструкции. В простейшем случае индуктивный преобразователь состоит из П- или Ш-образного сердечника с катушкой, питаемой переменным током, и из ферромагнитного якоря. Частота напряжения питания должна быть существенно больше частоты изменения измеряемого параметра. В качестве якоря может быть использован также и сам измеряемый объект, если он выполнен из ферромагнитного материала. Между торцами сердечника и якорем устанавливается определенная величина начального зазора S_0,



1 – катушка;
2 – ферромагнитный стержень;
3 – подвесной якорь;
4 – неподвижные контакты;
5 – основание;
6 – пружина

Рис. 2.12. Электромагнитное реле

Основные части электромагнитного реле: электромагнит, якорь и переключатель. Электромагнит представляет собой электрический провод, намотанный на катушку с сердечником из магнитного материала. Якорь – пластина из магнитного материала, через толкатель управляющая контактами. В исходном положении якорь удерживается пружиной. При подаче напряжения электромагнит притягивает якорь, преодолевая её усилие, и замыкает или размыкает контакты в зависимости от конструкции реле. После отключения напряжения пружина возвращает якорь в исходное положение. В некоторых моделях могут быть встроены электронные элементы – это резистор, подключенный к обмотке катушки для более чёткого срабатывания реле, или конденсатор, параллельный контактам для снижения искрения и помех.

Реле переменного тока срабатывают при подаче на их обмотки тока определенной частоты, т.е. основным источником энергии является сеть переменного тока. Конструкция реле переменного тока напоминает конструкцию реле постоянного тока, только сердечник и якорь изготавливаются из листов электротехнической стали, чтобы уменьшить потери на гистерезис и вихревые токи.

Достоинства электромагнитных реле:

- способность коммутации нагрузок мощностью до 4 кВт при объеме реле менее 10 см^3;

встроены органы подсветки, запитываемые от соответствующего трансформатора или не нуждающиеся в нем. Органы управления некоторыми кнопочными выключателями и переключателями в случае необходимости могут выполняться с ключом.

Путевые выключатели (переключатели) подобно кнопкам также многократно выполняют в электрических цепях коммутационные функции, но не под непосредственным воздействием оператора, а под воздействием подвижного рабочего органа, например силовой головки агрегатного станка.

По характеру работы контактного механизма контактные путевые выключатели подразделяются на три группы:

1) *прямого действия*, когда время переключения контактов зависит от положения и скорости перемещения привода данного подвижного органа;

2) *полумгновенного действия*, когда время переключения контактов практически не зависит от скорости перемещения привода данного подвижного органа, а контактное нажатие зависит от положения привода данного подвижного органа;

3) *мгновенного действия*, когда время переключения контактов и контактное нажатие не зависят от положения привода подвижного органа.

Путевые выключатели отличаются большим разнообразием устройств, обеспечивающих их нажатие под воздействием подвижного органа. Это могут быть различные толкатели и рычаги с роликом или без него и т.п. В схемах автоматизации применяются также путевые выключатели на базе блоков *микровыключателей.*

Бесконтактные путевые выключатели также осуществляют коммутацию тех или иных электрических цепей под воздействием подвижных рабочих органов, но, в отличие от контактных путевых выключателей, у них отсутствует механическая связь между этим подвижным элементом и коммутируемыми цепями. Чувствительный элемент таких путевых выключателей бывает, обычно, индуктивного или емкостного типа. Частота коммутации у современных бесконтактных путевых выключателей достигает 1000 Гц.

Пакетно-кулачковые переключатели представляют собой сборную, стянутую шпильками конструкцию, состоящую из узла фиксации и однотипных пластмассовых корпусов с контактными системами. Подвижные контакты приводятся в действие кулачками, насаженными на общий металлический валик квадратного сечения. Аппарат имеет панель для крепления и рукоятку. Поворотом рукоятки приводятся в действие вал и кулачки коммутирующих устройств, которые обеспечивают замыкание и размыкание контактов по заданной диаграмме. Коммутирующее устройство состоит из корпуса, кулачка, контактной пружины, толкателя, контактного мостика, неподвижных контактов, вкладыша, дугогасительных камер.

Использование обычного двоичного кода может привести к большим погрешностям, т.к. две соседние кодовые комбинации могут отличаться друг от друга не в одном, а в нескольких разрядах («дребезг контактов»). Чтобы избежать этого, применяется код Грея, который предпочтительнее обычного двоичного тем, что обладает свойством непрерывности бинарной комбинации: изменение кодируемого числа на единицу соответствует изменению кодовой комбинации только в одном разряде (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Соответствие двоичного кода и Грей-кода

	Двоичный код $2^3\ 2^2\ 2^1\ 2^0$	Код Грея		Двоичный код $2^3\ 2^2\ 2^1\ 2^0$	Код Грея
0	0 0 0 0	0 0 0 0	8	**1 0 0 0**	**1 1 0 0**
1	0 0 0 **1**	0 0 0 **1**	9	1 0 0 **1**	1 1 0 **1**
2	0 0 **1 0**	0 0 **1** 1	10	1 0 **1 0**	1 1 **1** 1
3	0 0 1 **1**	0 0 1 **0**	11	1 0 1 **1**	1 1 1 **0**
4	0 **1 0 0**	0 **1** 1 0	12	1 **1 0 0**	1 **0** 1 0
5	0 1 0 **1**	0 1 1 **1**	13	1 1 0 **1**	1 0 1 **1**
6	0 1 **1 0**	0 1 **0** 1	14	1 1 **1 0**	1 0 **0** 1
7	0 1 1 **1**	0 1 0 **0**	15	1 1 1 **1**	1 0 0 **0**

Код Грея строится на базе двоичного по следующему правилу: ***считаный разряд остается без изменения; каждый последующий разряд инвертируется, если предыдущий разряд исходного двоичного кода равен единице.*** Этот алгоритм построения может быть формально представлен как результат сложения по модулю два исходной комбинации двоичного кода с такой же комбинацией, но сдвинутой на один разряд вправо. При этом крайний правый разряд сдвинутой комбинации отбрасывается. Таким образом, Грей-код является так называемым *одношаговым кодом*, т.к. при переходе от одного числа к другому всегда меняется лишь какой-то один бит. Погрешность при считывании информации с механического кодового диска при переходе от одного числа к другому приведет лишь к тому, что переход от одного положения к другим будет несколько смещен по времени, однако выдача совершенно неверного значения углового положения при переходе от одного положения к другому полностью исключается. В табл. 1.1 приведены соответствующие коды десятичных чисел в двоичной кодировке и в кодировке Грея. Из приведенной табл. 1.1 видно, что при переходе от одного числа к другому (соседнему) лишь один бит информации меняет свое состояние, если число представлено кодом Грея, в то время как в двоичном коде могут поменять свое состояние несколько бит одновременно. Код Грея – выход, следовательно, он никогда не имеет ошибку чтения и применяется во многих абсолютных энкодерах.

Преимуществом Грей-кода является также его способность зеркального отображения информации. Так, инвертируя старший бит, можно

В шлюзах затвор (рис. 2.10), выполненный в виде полотна *1*, перемещается перпендикулярно направлению потока Q в трубопроводе *2*.

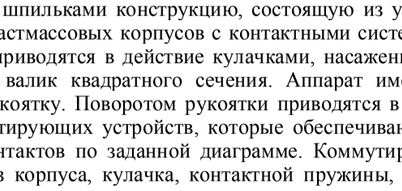
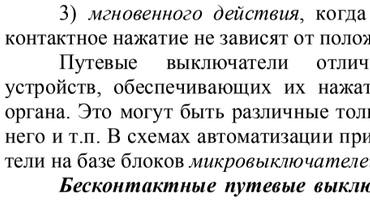


Рис. 2.10. Схема прямоугольного шибера

Шиберы изготавливают из различных материалов в зависимости от условий применения. Для работы на нефтяных газах с температурой до 300 °С шиберы изготавливают из листовой стали, а при температуре выше 300 °С – из чугуна. Для регулирования арессивных газов применяют шиберы из легированных сталей или со специальным покрытием.

Дроссельные воздушные заслонки (рис. 2.11, *а*) применяют в трубопроводах круглого сечения как на трубопроводах круглого, так и прямоугольного сечения для регулирования воздушных и газовых (паровых) потоков при небольших статических давлениях. Изменение проходного сечения заслонкой осуществляется путем вращения ее вокруг оси, расположенной перпендикулярно направлению потока.



а) б)

Рис. 2.11. Заслонки:
а – дроссельная воздушная;
б – типа «жалюзи»

Заслонки типа «жалюзи» (рис. 2.11, *б*) при одинаковых размерах с обычными одинаковостями имеют существенно меньший реактивный вращающийся момент, однако обладают более сложной конструкцией.

2.9. Конструктивные элементы электроприводов электропанелей систем автоматизации технологического оборудования

Электроприводы, применяемые для целей автоматизации, представляют собой сложные функциональную, конструктивно и эксплуатационно законченные устройства, допускающие их работу в длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах, а также в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками и электрическим торможением.

1.14. Датчики для систем числового программного управления

При любых вариантах построения технологических процессов механической обработки предполагается наличие систем числового программного управления (ЧПУ), для которых существенным является получение данных об истинном положении рабочих органов станка. В станках с ЧПУ управление координатными перемещениями с достижением при этом необходимой точности обеспечивается благодаря соответствующим устройствам обратной связи по положению, объединяемых общим названием «системы дистанционного отсчета».

Датчики, используемые в системах с ЧПУ, можно классифицировать следующим образом.

1) ***По характеру зависимости выходного сигнала от входного*** датчики могут быть:

- пропорциональные;
- нелинейные;
- релейные;
- импульсные.

2) ***По виду преобразования сигналов*** датчики делят:

- на электроконтактные (механическое перемещение преобразуется в электрический сигнал);
- индукционные (изменение угла поворота вызывает изменение фазы электрического сигнала);
- фотоэлектрические (световой сигнал преобразуется в импульсы или комбинации импульсов).

3) ***По назначению измерительные устройства*** совместно с датчиками в станочных системах с ЧПУ могут подразделяться на устройства:

- пути;
- положения;
- скорости;
- углового положения;
- угла рассогласования.

Измерительные индукционные устройства следящего привода станков с ЧПУ дают информацию о действительном положении рабочего органа и скорости его перемещения. Они состоят собственно из датчика, его устройства связи с рабочим органом и схемы обработки выдаваемых датчиком сигналов. В качестве индукционных датчиков измерительных устройств могут быть использованы: вращающиеся трансформаторы (резольверы), сельсины, тахогенераторы, индуктосины, редусины и др.

Как правило, электроприводы, помимо базового электродвигателя, включают в себя следующие компоненты:

- общий корпус;
- общий выключатель;
- блок питания с необходимыми принадлежностями;
- блоки регулирования (в требуемом количестве);
- силовой трансформатор;
- коммутационную аппаратуру;
- сглаживающие устройства и фильтры;
- автоматические внутренние выключатели;
- усилители;
- устройства обеспечения безопасности;
- предохранители.

В настоящее время благодаря развитию электронной техники, позволяющей эффективно управлять нелинейными характеристиками различных электродвигателей, и появлению новых магнитных материалов, в частности на основе кобальта, а также на основе железа, бора и некоторых редкоземельных элементов, создается техническая возможность перехода от электропривода, работающего по схеме мотор-редуктор к электроприводу прямого (непосредственного) действия.

Подобные электроприводы прямого действия должны удовлетворять следующим требованиям:

- обладать устойчивой низкой частотой вращения и при этой частоте обеспечивать высокие значения вращающего момента;
- обладать встроенным в приводной электродвигатель датчиком углового положения, причем указанный датчик должен обладать высокой разрешающей способностью;
- торможение используемых в таких приводах электродвигателей должно осуществляться с высоким значением тормозного момента.

Для построения электроприводов прямого действия необходимы специальные подшипники качения, обладающие высокой точностью и большой жесткостью. Такие электроприводы также требуют применения специальных регуляторов, т.к. при отсутствии механического редуктора, способного осуществлять демпфирование и сглаживание, базовый электродвигатель оказывается более чувствительным к колебаниям нагрузки. Такой электропривод оказывается более чувствительным и к колебаниям инерционных масс, поскольку в приводе прямого действия приведенный момент инерции ротора электродвигателя оказывается одного порядка с моментом инерции приводимого механизма.

Примером специального бесконтактного электропривода прямого действия для узлов промышленных роботов может служить разработанный

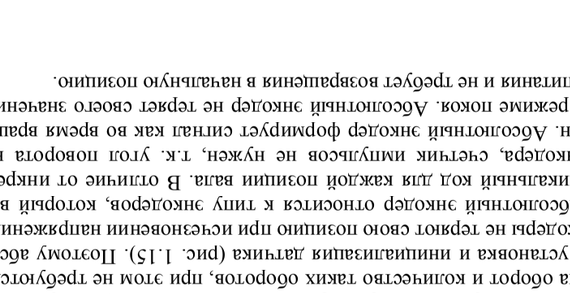
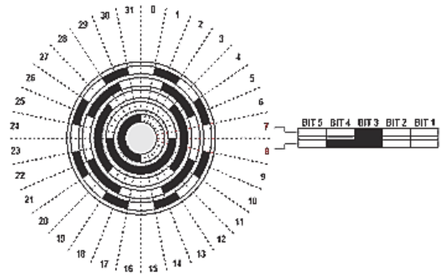


Рис. 1.15. Устройство абсолютного многооборотного энкодера

Сигнал абсолютного энкодера не подвержен помехам и для него не требуется точная установка вала. Кроме того, даже если кодированный сигнал не может быть прочитан энкодером, если, например, вал вращается слишком быстро, правильный угол вращения будет зарегистрирован, когда скорость вращения уменьшится. Абсолютный энкодер устойчив к вибрациям.

Диск абсолютного энкодера отличается от диска пошагового энкодера тем, что имеет несколько концентрических дорожек (рис. 1.16). Каждой дорожкой формируется уникальный двоичный код для конкретной позиции вала.

Рис. 1.16. Кодовый диск абсолютного пятиразрядного энкодера



Многооборотный энкодер (MultiTurn) (см. рис. 1.15, 1.16) отличается от рассмотренного однодискового инкрементального энкодера наличием кодирующих дисков второй ступени, т.е. своего рода редуктора из нескольких кодовых оптических дисков. Например, при линейных приводах или при задачах измерения с помощью зубчатой измерительной штанги применение однооборотных датчиков является неприемлемым.

Резольвер – устройство, служащее для преобразования угла поворота одной катушки по отношению к другой в сдвиг фазы переменного синусоидального напряжения.

Индуктосин – бесконтактная электрическая машина без магнитопровода с печатными первичной и вторичной обмотками, возбуждаемая однофазным напряжением.

Различают *линейные* (с прямолинейным расположением проводников, предназначенных для измерения линейных перемещений) и *круговые* индуктосины (с круговым расположением проводников, предназначенных для измерения угловых перемещений).

В настоящее время наиболее широко применяются в промышленности датчики положения – ***энкодеры***. Этот тип преобразователей угловых перемещений осуществляет преобразование угла поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. Энкодеры подразделяются на ***инкрементальные*** и ***абсолютные***.

Инкрементальные энкодеры предназначены для определения угла поворота вращающихся объектов. Они генерируют последовательный импульсный цифровой код, содержащий информацию относительно угла поворота объекта. Если вал останавливается, то останавливается и передача импульсов. Основным рабочим параметром датчика является количество импульсов за один оборот. Мгновенную величину угла поворота объекта определяют посредством подсчета импульсов от старта. Для вычисления угловой скорости объекта процессор в тахометре выполняет дифференцирование количества импульсов во времени, таким образом, показывая сразу величину скорости, т.е. число оборотов в минуту. Выходной сигнал имеет два канала, в которых идентичные последовательности импульсов сдвинуты на 90° относительно друг друга (параболические импульсы), что позволяет определить направление вращения. Имеется также цифровой выход нулевой метки, который позволяет всегда рассчитать абсолютное положение вала.

Абсолютные энкодеры, как оптические, так и магнитные, имеют своей основной рабочей характеристикой число шагов, т.е. уникальных кодов на оборот и количество таких оборотов, при этом не требуется первичная установка и инициализация датчика (рис. 1.15). Поэтому абсолютные энкодеры не теряют свою позицию при исчезновении напряжения.

Абсолютный энкодер относится к типу энкодеров, который выполняет уникальный код для каждой позиции вала. В отличие от инкрементного энкодера, счетчик импульсов не нужен, т.к. угол поворота всегда известен. Абсолютный энкодер формирует сигнал как во время вращения, так и в режиме покоя. Абсолютный энкодер не теряет своего значения при потере питания и не требует возвращения в начальную позицию.

сравнительно недавно сверхвысокомоментный бесконтурный электропривод. Этот электродвигатель имеет тонкий кольцевой ротор, расположенный между внешним и внутренним статорами, имеющими одинаково расположенные зубцы. Последовательное возбуждение магнитного потока, проходящего через зубцы статора, и создает вращающий момент этого электродвигателя.

Помимо электроприводов, реализуемых на базе электродвигателей традиционных или новых типов, для целей автоматизации производственных процессов применяется и другая электроаппаратура (табл. 2.1): *командная, исполнительная, защиты* и *управления*.

Таблица 2.1

Разновидности электрических аппаратов

Вид аппаратуры	Разновидности электрических аппаратов
Командная аппаратура	Кнопочные выключатели (переключатели)
	Путевые выключатели (переключатели)
	Переключатели пакетно-кулачковые с использованием синхронного или статистического приводов
	Тумблеры и переключатели с ручным управлением
	Контактные и бесконтактные логические элементы
	Электромагнитные реле
	Реле времени
Исполнительная аппаратура	Электромагнитные контакторы и пускатели
	Электромагниты и соленоиды
Аппаратура защиты	Автоматические выключатели
	Предохранители
	Токовые реле
Аппаратура управления	Трансформаторы для питания цепей управления
	Сигнальная аппаратура, светофоры
	Электрические соединители (коннекторы)

Кнопочный выключатель (переключатель) – это коммутационный аппарат, предназначенный для многократного включения и отключения электрических цепей в результате воздействия оператора.

Кнопочные выключатели и переключатели подразделяются на *нажимные*, *поворотные* и *педальные*. Они могут быть с самовозвратом и без самовозврата; с защелкой или блокировкой; выступающие и утопленные; одно-, двух- и многополюсные.

Органы управления кнопочными выключателями и переключателями могут быть цилиндрическими, прямоугольными (клавишными), грибовидными, а также выполненными в виде рукоятки. В них могут быть

нием комплектуются фитингами и уплотняющими шайбами, фланцевые – могут комплектоваться монтажным набором с уплотнением.

Двухходовые клапаны (рис. 2.9, *а*) используются в качестве проходных, изменяющих расход рабочей среды (жидкости, пара, газов). Клапан монтируется в линии таким образом, чтобы направление потока совпадало с направлением стрелки на корпусе клапана.

Примером типичного использования таких клапанов являются контуры с локальным циркуляционным насосом, схемы без циркуляционного насоса с переменным количеством жидкости во вторичной сети.

Трехходовые клапаны (рис. 2.9, *б*) используются в качестве смесительных или разделительных, а также в качестве проходных (двухходовых) клапанов.

Трехходовые клапаны широко применяются в системах отопления, водоснабжения, тепло- и холодоснабжения.

Соленоидные клапаны (рис. 2.9, *в*) представляют собой вентили в сборе с электромагнитным приводом – соленоидом.

Соленоидные клапаны могут устанавливаться на жидкостных трубопроводах, а также магистралях горячего пара.

Клапаны могут комплектоваться различными типами электромагнитных катушек как переменного, так и постоянного тока.

а) б) в)

Рис. 2.9. Клапаны:
а – двухходовый; б – трехходовый; в – соленоидный

Обратные клапаны служат для предотвращения обратного потока рабочих сред. Их, в частности, используют в жидкостных и всасывающих трубопроводах автономных кондиционеров и чиллеров.

Шиберы, заслонки. *Шиберы* представляют собой металлический карман, внутри которого поступательно перемещается заслонка. Шиберы используются для регулирования потока воздуха, проходящего через воздуховоды. Их устанавливают на трубопроводах, коробах и каналах любой формы сечения. Кроме того, шибер может использоваться в качестве заглушки во время запуска вентилятора для предотвращения перегрузки его электродвигателя.

простым образом менять направление счета и таким образом подбирать к фактическому (физическому) направлению вращения оси. Изменение направления счета может легко изменяться, управляя так называемым входом «Complement». Выдаваемое значение может быть возрастающим или спадающим при одном и том же физическом направлении вращения оси. Поскольку информация, выраженная в Грей-коде, имеет чисто кодированный характер не несущий реальной числовой информации, его следует преобразовать в стандартный бинарный код. Осуществляется это при помощи преобразователя кода (декодера Грей-Бинар), который легко реализуется с помощью цепи из логических элементов «исключающее или» (XOR) как программным, так и аппаратным способом, как показано на рис. 1.17.

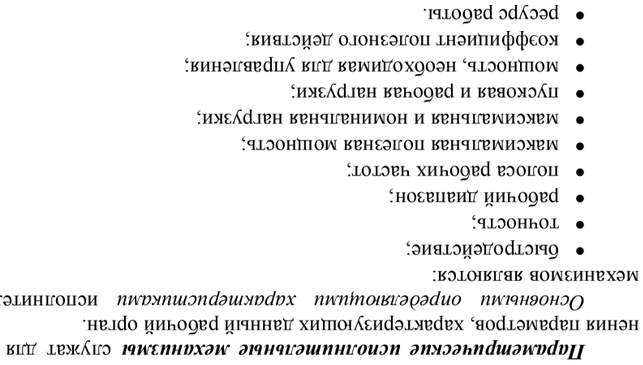


Рис. 1.17. Схема для преобразования кода Грея в двоичный код

Энкодеры могут быть как магнитно-индукционными, которые были рассмотрены выше, так и оптическими, и резисторными. Они могут работать через шинные интерфейсы или промышленную сеть.

Наиболее распространенные типы выходных сигналов: код Грея, параллельный код, интерфейсы Profibus-DP, CANopen, DeviceNet, SSI, LWL, через которые также осуществляется программирование датчиков [4].

1.15. Типовые способы измерения производственных параметров

Там, где используются высокие мощности, например, в коммутирующем оборудовании, электродвигателях, трансформаторах, что характерно для технологического оборудования механической обработки, необходимо осуществлять ***гальваническую развязку*** измерительных цепей датчиков от силовых цепей. Простейшим разделяющим элементом, обеспечивающим

2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ИМ УСТРОЙСТВА

2.1. Общие требования к исполнительным механизмам в системах автоматизации

Исполнительный механизм – устройство, предназначенное для перемещения регулирующего органа в системах автоматического регулирования или дистанционного управления, а также в качестве исполнительного привода элементов следящих систем и т.п. Исполнительные механизмы обычно состоят из двигателя, передачи и элементов управления, а также элементов обратной связи, сигнализации, блокировки, выключения.

По виду воздействия на составные системы автоматизации исполнительные механизмы принято подразделять на *силовые* и *параметрические*.

Силовые исполнительные механизмы создают на своем выходе силу или момент, которые однозначно определяют соответствующее положение рабочего органа.

Параметрические исполнительные механизмы служат для изменения параметров, характеризующих данный рабочий орган.

Основными определяющими характеристиками исполнительных механизмов являются:

- быстродействие;
- точность;
- рабочий диапазон;
- полоса рабочих частот;
- максимальная полезная мощность;
- максимальная и номинальная нагрузки;
- пусковая и рабочая нагрузки;
- мощность, необходимая для управления;
- коэффициент полезного действия;
- ресурс работы.

В каждом конкретном случае автоматизации при выборе варианта исполнительного механизма разработчик устанавливает свои приоритеты для тех или иных перечисленных факторов.

Классификация исполнительных устройств приведена на рис. 2.1.

Выходным параметром исполнительных устройств в технологическом оборудовании, как правило, является перемещение того или иного рабочего исполнительного органа.

Пневматический серводвигатель с поворотной лопастью. Рабочая жидкость под давлением P_y поступает в подводящий трубопровод *2*, ведущий в рабочую полость *3* поверх лопасти *5*, контактирующей с корпусом *6*. Сливающаяся жидкость под давлением $P_{от}$ через отводящий трубопровод *1* вытекает из полости *7*, находящейся ниже лопасти. Под действием разности давлений P_p и $P_{от}$ лопасть поворачивает выходной вал *4* этого пневматического серводвигателя. Поворот лопасти происходит между упорами (см. рис. 2.7, *а*).

Пневматический серводвигатель роторный типа. В корпусе *8*, являющемся статором, устанавливается ротор *9* так, что его ось вращения смещена относительно оси статора (см. рис. 2.7, *б*). Ньим словами, ротор установливается эксцентрично относительно корпуса. В пазах ротора мещаются пластины *10*. Рабочая жидкость под давлением P_y поступает к этому пневматическому серводвигателю и с остаточным давлением P_{01} выходит из него. За счет разности этих давлений пластины поворачиваются, увлекая за собой ротор. При вращении ротора пластины под действием возникающей центробежной силы прижимаются к внутренним стенкам корпуса. Для лучшей герметизации рабочих полостей такого пневматического сервопривода в пазы ротора иногда помещают пружины, поджимающие пластины, или подают под некоторым давлением рабочую жидкость.

Пневматический серводвигатель мембранно-поршневого типа. Выходной вал *12* пневматического серводвигателя устанавливается по оси *11* корпуса *15* этого серводвигателя (см. рис. 2.7, *в*). Под углом к этому валу устанавливается и жестко закрепляется наклонная шайба *13*. В силовом контакте с ней находятся пружерны (поршень, имеющий длину, значительно превышающую диаметр), скользящие в соответствующих цилиндрических направляющих корпуса. Наконечники пружерков, находящиеся в силовом контакте с наклонной шайбой, имеют сферическую форму и обычно изготовляются из твердых износостойких сплавов. Рабочие полости *16* за пружерами через пневмораспределители соединяются с источником давления и со сливным баком. В вспомогательно-поршневом пневматическом серводвигателе, как правило, используются не два пружера, которые на рис. 2.7, *в* попали в осевое сечение, а пять. Усилия, создаваемые рабочей жидкостью и направленные вдоль осей пружеров, раскладываются на наклонной шайбе по правилу параллелограмма сил, что в результате приводит к появлению на валу некоторого вращающего момента.

Для регулирования скорости пневматических серводвигателей используются два метода: *объемное регулирование* и *дросселирование*.

При ***объемном регулировании*** расход рабочей жидкости, определяющий скорость пневматического серводвигателя, изменяется путем изменения рабочего объема регулируемой пневмомашины.

такую гальваническую развязку, можно считать электромагнитное реле. Наиболее современным решением задачи гальванической развязки является реализация этой развязки на паре светодиод – фототранзистор. Такого рода сочетание называется ***трансоптором***, или ***оптроном***.

Чтобы датчики можно было практически использовать для подключения к системам автоматизации производственных процессов, в машиностроении используются три измерительные схемы: *мостовая*, *дифференциальная* и *компенсационная*.

Мостовая измерительная схема. Мостовая измерительная схема существует в двух разновидностях: балансной и небалансной. На рис. 1.18 изображена балансная измерительная схема. В противоположных участках цепей измерительной схемы, называемых плечами моста, размещаются эталонные сопротивления R_1, R_2 и R_3, а также измеряемое сопротивление R_x. Для равновесия моста необходимо, чтобы произведения величин сопротивлений, установленных в противоположных плечах измерительного моста, были равны между собой.

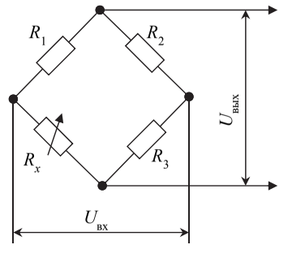


Рис. 1.18. Балансная мостовая измерительная схема

При соблюдении условий равновесия измерительного моста напряжение на его выходной диагонали будет отсутствовать, т.е. $U_{вых} = 0$. При изменении измеряемого сопротивления R_x условия равновесия измерительного моста будут нарушаться, и на этой диагонали появится соответствующий электрический сигнал.

Повышения точности отсчета можно добиться, изменяя сопротивления R_1, и R_3 находящиеся в соседних плечах измерительного моста, таким образом, чтобы, несмотря на изменения измеряемого сопротивления R_x свести к нулю изменения выходного напряжения. Факт равенства нулю выходного напряжения фиксируется с помощью установленного в выходной диагонали измерительного моста прибора или устройства, называемого нуль-индикатором. Использование нуль-индикатора позволяет с большей точностью «ловить» момент равенства нулю выходного напряжения.

Дифференциальная измерительная схема. Дифференциальная схема обычно используется для измерения емкостного сопротивления. Такая схема также существует в двух вариантах. По первому варианту дифференциальной схемы, изображенному на рис. 1.19, *а*, как эталонное сопротив-

ление *4*, так и измеряемое емкостное сопротивление *1* включаются в электрические контуры, симметрично запитываемые переменным напряжением от трансформатора *2*. При равенстве эталонного *4* и измеряемого *1* емкостного сопротивлений противоположно направленные токи в этих контурах (I_2 и I_1), будут равными по величине, так что результирующий ток через измерительный прибор *3* оказывается равным нулю, поскольку этот ток представляет собой разность токов I_2 и I_1. При изменении величины измеряемого емкостного сопротивления показания измерительного прибора *3* будут отличаться от нуля и однозначно изображать эти изменения емкостного сопротивления. Такая схема называется дифференциальной именно потому, что она основана на вычитании токов I_2 и I_1.

Другой вариант измерения изменяющегося емкостного сопротивления с помощью дифференциальной схемы приведен на рис. 1.19, *б*. Здесь также происходит вычитание токов I_2 и I_1, но изменение измеряемого емкостного сопротивления *1* компенсируется изменением напряжения, снимаемого с вторичной обмотки трансформатора *2*, так что ток через измерительный прибор *3* остается равным нулю. Величина ΔE, на которую нужно изменить исходное напряжение E, однозначно определяет величину изменения измеряемого емкостного сопротивления.

Приравнивание к нулю тока через измерительный прибор позволяет использовать его как нуль-индикатор, что повышает точность измерений. Для этой цели и применяется такой вариант дифференциальной схемы.

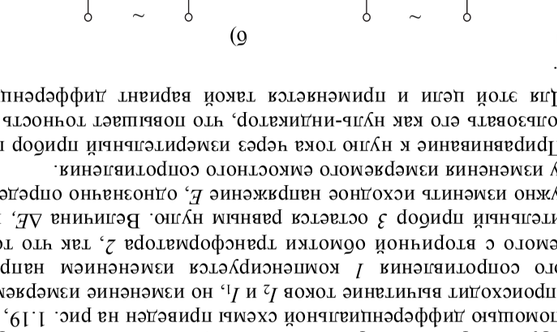


Рис. 1.19. Дифференциальные схемы измерений сопротивления:
а – с измерением разницы токов через измеряемое и эталонное сопротивления; б – с изменением ЭДС во вторичной обмотке;
1 – измеряемое сопротивление; 2 – трансформатор;
3 – измерительный прибор (для схемы а) или нуль-индикатор (для схемы б); 4 – эталонное сопротивление

В компенсационной схеме все резисторы остаются неизменными, а меняется напряжение $U_{вх}$.

При ***дроссельном регулировании*** изменяется гидравлическое сопротивление путем изменения проходного сечения (дросселирования) регулирующих устройств.

Дроссельное регулирование обладает более высоким быстродействием по сравнению с объемным, но из-за присущих этому способу регулирования значительных потерь он применяется в основном в гидравлических серводвигателях малой мощности (до 3 – 5 кВт).

2.7. Муфты как исполнительные устройства

Муфты являются связующими звеньями между приводом и рабочим механизмом. Принцип их действия основан на электромагнитных свойствах связываемых элементов. В зависимости от вида связи муфты разделяют на фрикционные *сухого трения*, *вязкого трения* и *скольжения*. Регулирующее воздействие муфт осуществляется за счет изменения их сцепления.

При выборе электромагнитной муфты необходимо учитывать следующие требования:

- принцип действия муфты должен соответствовать требуемому режиму (позиционного действия или при регулировании частоты вращения) и области применения;
- муфта должна быть рассчитана на требуемую мощность и должна обладать перегрузочной способностью;
- муфта должна обеспечить требуемые коэффициент передачи, быстродействие и надежность;
- муфта должна быть удобной в эксплуатации и простой в обслуживании.

В ***муфтах вязкого трения*** происходит намагничивание магнитного порошка, образующего сцепляющий слой между ведомым и ведущим элементами муфты. Характерной особенностью таких муфт является то, что с увеличением магнитного потока возрастает передаваемый крутящий момент. Это позволяет использовать муфты вязкого трения в системах автоматического регулирования частоты.

Такие муфты не боятся перегрузок, являются быстродействующими исполнительными элементами (постоянная времени Т = 0,005 – 0,008 с), коэффициент передачи достигает К = 3500.

Принцип работы асинхронной электромагнитной муфты сцепления (ЭМС) аналогичен работе асинхронного двигателя. Привод, включающий ЭМС, обладает гибкой связью между электродвигателем и рабочим механизмом (РМ). При снижении возбуждения ЭМС торможение осуществляется свободным выбегом до новой пониженной частоты вращения ведомой части. Такие муфты позволяют регулировать частоту вращения РМ в диапазоне 1:8.

2.8. Регулирующие органы

Наиболее распространенные типы рабочих органов (РО): регулирующие клапаны и заслонки, которые применяются для регулирования потоков газа, пара и жидкости при статическом давлении свыше 1000 мм вод. ст.

При ***двухпозиционном регулировании*** (открыто-закрыто) затвор регулирующего органа быстро перемещается в одно из крайних положений.

В этом случае регулирование параметра рабочей среды осуществляется за счет соотношения между промежутками времени, когда регулирующий орган закрыт или открыт.

При ***непрерывном регулировании*** пропускная способность регулирующего органа определяется степенью его открытия.

Регулирующие органы характеризуются многими параметрами, основными из которых являются: максимально допустимое давление на входе в РО, минимальный расход среды, перепад давления на РО, расход через полностью открытый клапан. Подбор РО осуществляется по перечисленным параметрам.

Клапаны. Регулирующие клапаны применяют для регулирования расходов жидкостей, пара и газов при любых параметрах среды. Они могут эксплуатироваться при подаче потока на затвор (плунжер) или под затвор, при этом часто наблюдается существенное различие гидравлических характеристик. Их различают по виду и числу опорных поверхностей, по конструкции плунжеров и корпусов.

Регулирующие клапаны делятся на *односедельные* и *двухседельные*. Важным преимуществом односедельных РО является то, что они могут обеспечить герметичность закрытия прохода.

По конструкции затворы разделяются на *тарельчатые*, *пробковые* и *поршневые* (рис. 2.8). Кроме того, в односедельных РО используются клапаны с канавчатыми и ступенчатыми затворами. Их применяют при регулировании небольших расходов, а со ступенчатым – при регулировании расхода влажного газа.

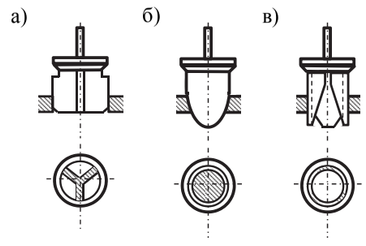


Рис. 2.8. Затворы односедельных РО:
а – тарельчатый; б – пробковый;
в – поршневой

Также различают *двухходовые* и *трехходовые* клапаны. По типу подключения они разделяются на фланцевые и резьбовые. Клапаны с резьбовым подключе-

смесь, а также специальные синтетические жидкости. В рабочую жидкость добавляют также различные антикоррозионные, антиокислительные, антифрикционные присадки и присадки, уменьшающие износ двигателя.

Гидравлические серводвигатели могут обеспечивать как *поступательное*, так и *вращательное* движение рабочего органа. В первом случае используются различные типоразмеры и конструкции рабочих цилиндров и поршней как *двухстороннего действия* (рабочая жидкость подается в полости, расположенные по обе стороны поршня), так и *одностороннего действия* (рабочая жидкость подается в полость, расположенную с одной стороны поршня, а возврат этого поршня в исходное положение после снятия давления рабочей жидкости осуществляется специальной пружиной).

Гидравлические двигатели различны по принципу действия. Схемы некоторых из них приведены на рис. 2.7.

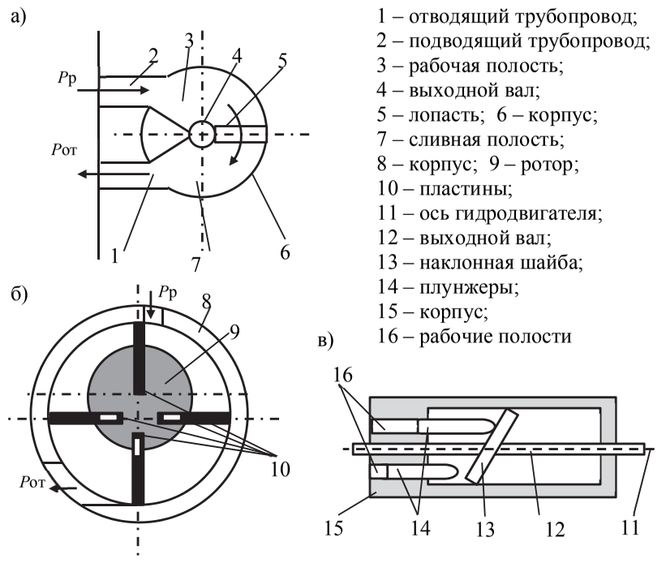


Рис. 2.7. Схемы гидравлических серводвигателей:
а – лопастный; б – ротационный; в – аксиально-поршневой

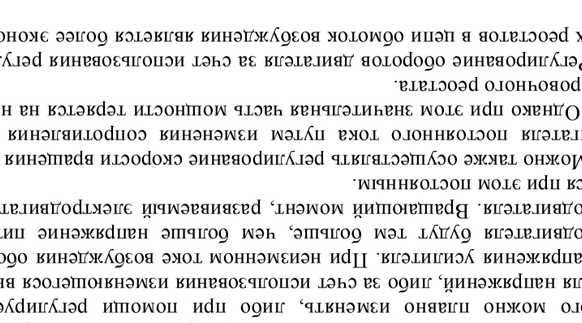


Рис. 2.1. Классификация исполнительных устройств
схем автоматизации

По характеру перемещения, создаваемого исполнительным устройством, все эти устройства могут быть подразделены на приводы поступательного, вращательного или поворотного движения.

В зависимости от физической природы используемой при этом энергии каждое из названных ранее исполнительных устройств может быть электрическим, гидравлическим или пневматическим. Электрические исполнительные устройства, в свою очередь, подразделяются на исполнительные устройства, использующие электрические серводвигатели, и исполнительные устройства, использующие электромагниты.

Для описания свойств любого серводвигателя, независимо от его физической природы, используются следующие *характеристики*:

1) ***Рабочая характеристика*** серводвигателя в случае вращательного движения представляет собой зависимость оборотов двигателя и полезного момента M на валу двигателя от полезной мощности P этого двигателя ($n_{ном}$ и $P_{ном}$ – соответственно номинальные обороты и мощность). Рабочая характеристика серводвигателя в случае поступательного движения представляет собой зависимость скорости движения и тягового усилия от полезной мощности P этого двигателя (рис. 2.2, *а*).

2) ***Механическая характеристика*** серводвигателя в случае вращательного движения определяет зависимость оборотов двигателя n от развиваемого им момента M при различных значениях параметра, определяющего его обороты, например, для электродвигателя от напряжения питания. В семействе механических характеристик двигателя эта величина является параметром. Механическая характеристика серводвигателя в случае поступательного движения определяет зависимость скорости двигателя

к которому прижимаются *щетки* (обычно графитовые или медно-графитовые).

В результате взаимодействия магнитного потока статора с током ротора возникает момент, заставляющий ротор вращаться с соответствующей угловой скоростью.

Ток в статорной обмотке называется также ***током возбуждения***. Часто магнитный поток статора создается не электромагнитами, а постоянными магнитами. Тогда величина вращающего момента определяется только напряжением обмотки ротора. Для улучшения динамических качеств электродвигателей постоянного тока разрабатывают специальные коллекторные регулируемых электродвигателей с малоинерционным ротором традиционной коллекторной и печатным ротором, когда для создания роторных обмоток используется технология травления фольгированной плоской изоляционной подложки.

Обмотка возбуждения может запитываться от отдельного источника напряжения, в такой случае говорят, что имеет место независимое возбуждение. Она может также запитываться от того же источника, что и роторная обмотка, причем может включаться с нею последовательно, параллельно или последовательно-параллельно.

Обмотки двигателя постоянного тока можно регулировать одним из следующих способов:

- изменением напряжения питания;
- изменением активного сопротивления в цепи якоря;
- изменением магнитного потока статора, пропорционального току статора;
- изменением действующего (за период) значения силы тока якоря в случае питания обмотки якоря импульсами переменной ширины (широтно-модулированными импульсами).

Регулирование изменением напряжения питания осуществляется либо за счет питания от специального генератора, выходное напряжение которого можно плавно изменять, либо при помощи регулируемого делителя напряжений, либо за счет использования изменяющегося выходного напряжения усилителя. При неизменном токе возбуждения обмотки электродвигателя будут тем больше, чем больше напряжение питания электродвигателя. Вращающий момент, развиваемый электродвигателем, остается при этом постоянным.

Можно также осуществлять регулирование скорости вращения электродвигателя постоянного тока путем изменения сопротивления цепи якоря. Однако при этом значительная часть мощности теряется на нагрев регулировочного реостата.

Регулирование оборотов двигателя за счет использования регулировочных реостатов в цепи обмоток возбуждения является более экономичным

По сравнению с электродвигателями постоянного тока электродвигатели переменного тока обладают следующими преимуществами:

- большой безотказностью и долговечностью;
- более широким диапазоном регулирования частоты вращения и вращающего момента;
- меньшими потерями на трение, что обусловливается отсутствием коллектора со щетками;
- отсутствием электромагнитных помех, создаваемых искрением;
- меньшей инерционностью.
- В то же время электродвигатели переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока имеют большую массу и габариты при тех же значениях мощности и момента, более низкий КПД, меньшие пусковые моменты и быстродействие.

2.4. Синхронные шаговые электродвигатели

Синхронные шаговые электродвигатели широко применяются в цифровых системах автоматики.

Работа шагового электродвигателя заключается в том, что при подаче на него одного электрического импульса его зубчатый ротор поворачивается на дозированную величину, как правило, на один зубец.

Конструктивно подвижный ротор и неподвижный статор шагового электродвигателя обычно состоят из трех (по числу фаз управляющего напряжения) секций, набранных из трансформаторного железа. Секции ротора жестко закреплены на валу шагового электродвигателя, а секции статора – на неподвижной части этого вала шагового электродвигателя. И ротор, и статор шагового электродвигателя изготовлены с одинаковыми прямоугольными выступами, называемыми *зубцами*. Шаг зубцов на роторе и на статоре одинаков, но зубцы всех трех секций статора относительно оси вращения расположены одинаково, а зубцы второй секции ротора смещены относительно первой секции ротора на 1/3 шага, и зубцы третьей секции ротора смещены относительно той же первой секции ротора на 2/3 шага. На каждой из секций обмоток статора размещают управляющие обмотки с числом полюсов N.

При подаче импульса напряжения на обмотку одной из секций статора ротор шагового электродвигателя повернется на такой угол $\Delta\varphi$, чтобы минимизировать магнитное сопротивление воздушного зазора между выступами статора и соответствующей секции ротора (рис. 2.6). В соответствии с этим зубцы данной секции ротора, если не принимать специальных мер, устанавливаются прямо против зубцов соответствующей секции статора, т.е. угол $\Delta\varphi$ градусов, на который поворачивается ротор, определяется соотношением $\Delta\varphi = 360/(3N)$.

Подача импульса на обмотку следующей секции статора вызывает поворот ротора шагового электродвигателя еще на угол Δφ и т.д. Последовательность подачи импульсов прямоугольного напряжения на обмотки секций статора определяется соответствующей электронной коммутирующей схемой. Возможны и специальные схемы коммутации, при которых устойчивыми будут не только положения «зубец (ротора) против зубца (статора)», но и положения «зубец против зубца с заданным смещением». Скорость вращения ротора шагового электродвигателя однозначно определяется частотой подачи на обмотки его статора прямоугольных импульсов напряжения. Поэтому такие шаговые электродвигатели являются синхронными. Применение их оказывается целесообразным, когда требуется стартстопное вращение с точным позиционированием и (или) с заданной скоростью вращения вала. Общий угол поворота ротора однозначно определяется суммарным числом импульсов, поданных на вход данного шагового электродвигателя.

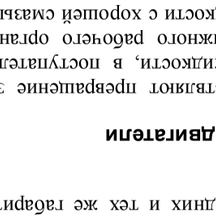


Рис. 2.6. Схема поворота ротора синхронного шагового двигателя

Шаговые электродвигатели характеризуются таким специфическим параметром, как *приемистость*, которая иногда называется также *разрешающей способностью.*

Приемистостью шагового электродвигателя называется та предельная частота поступающих на его вход сигналов, начиная с которой данный шаговый электродвигатель перестает их надежно (без пропусков) отрабатывать.

У современных двигателей такого типа предельная разрешающая способность обычно составляет 2 кГц, доходя в некоторых случаях до 8 – 10 кГц. Соответствующий угол поворота ротора при подаче на вход шагового электродвигателя единичного импульса обычно составляет (1,5 ± 0,5).

По сравнению с электродвигателями постоянного и переменного токов синхронный шаговый электродвигатель характеризуется более высокой безотказностью, более высокой устойчивостью к внешним помехам, а также меньшими габаритными размерами. Однако такие электродвигатели имеют меньший, чем электродвигатели постоянного и переменного токов, КПД и мощность, не превышающую обычно сотен ватт, а, следовательно, и развивают меньший вращающий момент.

2.5. Электромагниты

Различают две разновидности электромагнитов:

1) с сердечником из ферромагнитного материала (*электромагниты*), например, из пакета трансформаторного железа, к которому при подаче напряжения на обмотку катушки электромагнита притягивается подвижная деталь, называемая якорем электромагнита;

2) без сердечника из ферромагнитного материала (*соленоиды*); эти электромагниты выполнены в виде катушки с обмоткой, в которую (катушку) при подаче на нее напряжения втягивается подвижный сердечник.

На принципиальных схемах электромагниты и соленоиды обозначаются одинаково.

Электромагниты используют для создания усилия. Они применяются главным образом в электромагнитных контактных реле, для управления пневматическими и гидравлическими клапанами и золотниками, в схватах роботов, т.е. везде, где требуется перемещения рабочих органов на небольшие и фиксированные расстояния.

По характеру перемещения рабочего органа различают электромагниты с линейным и поворотным движением, а также тянущие и толкающие электромагниты.

Толкающие электромагниты используются, в основном, в гидравлических и пневматических устройствах, а *тянущие* – для непосредственного управления движением машин и механизмов.

Электромагниты могут снабжаться дополнительными контактами. Эти контакты используются для целей сигнализации и фиксации факта срабатывания данного электромагнита, а также для подключения дополнительных сопротивлений в цепь обмотки электромагнита после его срабатывания (уменьшение тока, протекающего через обмотку электромагнита, уменьшает ее нагрев и, следовательно, повышает безотказность и долговечность электромагнита).

Электромагниты постоянного тока бывают нейтральными и поляризованными. ***Электромагниты переменного тока*** развивают меньшее тяговое усилие и характеризуются меньшей чувствительностью, чем электромагниты постоянного тока при одних и тех же габаритных размерах, и поэтому применяются реже.

2.6. Гидравлические сервоприводы

Гидравлические сервоприводы осуществляют преобразование энергии, находящейся под давлением рабочей жидкости, в поступательное либо вращательное движение некоего подвижного рабочего органа. В качестве рабочей среды в них используют жидкости с хорошей смазывающей способностью, такие, как минеральные масла, синтетолицерированная

от развиваемого им полезного тягового усилия при различных значениях параметра, определяющего его скорость. Например, для гидропривода данного значения скорости двигателя в зависимости от развиваемого им полезного тягового усилия при различных значениях расхода питающей рабочей жидкости (рис. 2.2, *б*).

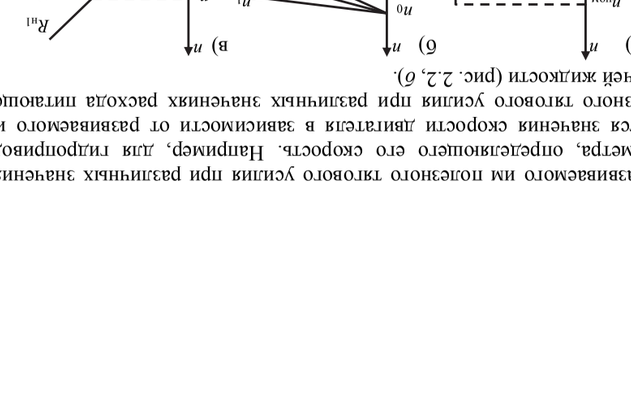


Рис. 2.2. Характеристики двигателей вращательного движения:
а – рабочая характеристика; б – механическая характеристика;
в – регулировочная характеристика

3) ***Регулировочная характеристика*** серводвигателя в случае вращательного движения определяет зависимость оборотов, развиваемых двигателем. Регулировочные характеристики двигателя также представляют собой семейство кривых, в котором параметром является постоянная величина нагрузки. Регулирующей величиной, например для электродвигателей, может являться напряжение U, подаваемое на якорь двигателя постоянного тока либо его обмотки возбуждения, а нагрузка характеризуется подключенным к электродвигателю сопротивлением R_H. Регулировочная характеристика серводвигателя в случае поступательного движения определяет зависимость скорости этого двигателя. Регулировочные характеристики которой задают скорость двигателя. Регулировочные характеристики двигателя также представляют собой семейство кривых, в котором параметром является нагрузка (рис. 2.2, *в*).

2.2. Управляемые исполнительные электродвигатели постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока (рис. 2.3) состоят из статора с обмоткой возбуждения, к которой подводится постоянное напряжение, и якоря, называемого иначе ротором, со своей обмоткой, к которой через щетки и коллектор также подводится постоянное напряжение.

К достоинствам двигателей постоянного тока относятся: большой вращающий момент, широкий диапазон регулирования скорости вращения, простой реверс, высокий КПД.

При установившемся режиме работы двигателя постоянного тока почти вся подводимая к нему электрическая энергия, за исключением потерь на трение, превращается в механическую работу. Однако при пуске двигателя, когда скорость вращения его якоря близка к нулю, комплексное сопротивление цепи якоря мало, и через якорь течет большой пусковой ток. Он может вызвать перегрев обмотки якоря, а также ведет к возникновению, пусть и кратковременного, большого механического момента на валу, который можно рассматривать как удар. Чрезмерно большой пусковой ток может также вызвать повышенное искрение между коллектором и щетками.

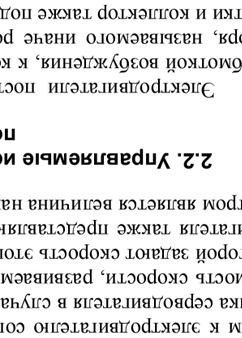


Рис. 2.3. Упрощенная модель двигателя постоянного тока

Поэтому для пуска таких двигателей применяются специальные схемы, автоматически обеспечивающие постепенный рост тока в обмотке якоря по мере роста скорости его вращения. Суть работы таких схем заключается в том, что последовательно с цепью обмотки якоря при малой скорости его вращения, когда его комплексное сопротивление еще мало, подключаются ограничивающие омические сопротивления, которые по мере разгона якоря и повышения его комплексного сопротивления, а значит и падения напряжения на нем автоматически шунтируются.

Для уменьшения инерционности регулируемых электродвигателей постоянного тока, используемых в схемах автоматизации, применяют якорь уменьшенного диаметра при увеличении его длины, что ведет к уменьшению механического момента инерции такого якоря. В последнее время в таких электродвигателях применяют также печатные роторы, т.е. плоские роторы, полученные из фольгированного материала методом травления.

Конструктивно статор электродвигателя постоянного тока представляет собой корпус цилиндрической формы с закрепленными на ней *полюсами.* Эти полюсы для улучшения формы создаваемого магнитного поля заканчиваются *полюсными наконечниками.* Полюсы статора охватывает *статорная обмотка.* В электродвигатель постоянного тока также входит сердечник ротора, напрессованный на ось электродвигателя. *Обмотка ротора* состоит из отдельных секций, концы которых подсоединены к изолированным друг от друга медным пластинам *коллектора.* Напряжение постоянного тока подается на секции роторной обмотки через коллектор,

2.3. Электродвигатели переменного тока

Принцип действия электродвигателей переменного тока заключается в использовании взаимодействия вращающегося магнитного поля, создаваемого переменным током в обмотках неподвижной части электродвигателя, т.е. его статора, с токами, индуцируемыми этим током в обмотках подвижной части электродвигателя, т.е. в его роторе.

Различают *синхронные* и *асинхронные* двигатели переменного тока.

Синхронные электродвигатели – двигатели, у которых частота вращения ротора совпадает с частотой вращения магнитного поля, создаваемого переменным током.

Синхронные двигатели малой мощности, лежащей в пределах от долей ватта до нескольких сотен ватт, используются в схемах автоматизации в тех случаях, когда необходимо поддерживать постоянство частоты вращения. Сюда относятся различные механические задатчики, лентопротяжные механизмы, самописцы и др.

Асинхронные электродвигатели – двигатели, у которых частота вращения ротора отстает от частоты вращения магнитного поля, создаваемого переменным током.

В схемах автоматизации в машиностроении в качестве исполнительных электрических серводвигателей переменного тока наиболее широкое применение нашли именно асинхронные электродвигатели.

Как и у электродвигателей постоянного тока, у электродвигателей переменного тока вследствие малости величины комплексного сопротивления ротора при малых скоростях его вращения пусковой ток оказывается достаточно большим. Поэтому и здесь применяются ограничивающие пусковые схемы, подобные схемам, применяемым при пуске электродвигателей постоянного тока с поправкой на число фаз питающего переменного напряжения.

В зависимости от числа фаз питающего переменного напряжения различают *однофазные*, *двухфазные* и *трехфазные* электродвигатели переменного тока.

Однофазные электродвигатели переменного тока характеризуются небольшой мощностью и используются главным образом в нерегулируемых приводах, например в вентиляторах.

Двухфазные электродвигатели переменного тока характеризуются сравнительной простотой регулирования как скорости вращения, так и развиваемого вращающегося момента. Это обусловило их широкое применение для целей автоматизации.

Трехфазные электродвигатели переменного тока характеризуются высокой развиваемой мощностью, достигающей нескольких киловатт. Они находят применение в нерегулируемых приводах станков, компрессоров, насосов и т.п.

ным. Интересно, что при неизменном напряжении питания данного электродвигателя постоянного тока обороты электродвигателя будут тем больше, чем меньше ток в обмотке его возбуждения. Это объясняется тем, что для генерации ЭДС, компенсирующей напряжение питания, при меньшей величине магнитного потока, создаваемого током обмотки возбуждения, требуется за единицу времени «ометать» обмоткой ротора большую площадь. Это и означает вращаться с большей угловой скоростью. Развиваемая электродвигателем при этом мощность остается постоянной, но развиваемый им вращающий момент уменьшается обратно пропорционально оборотам электродвигателя.

Импульсный способ регулирования оборотов. При импульсном способе регулирования оборотов (рис. 2.4) к двигателю подводятся импульсы неизменного по амплитуде напряжения управления $U_{\text{у.ном}}$, в результате чего его работа состоит из чередующихся периодов разгона и торможения.

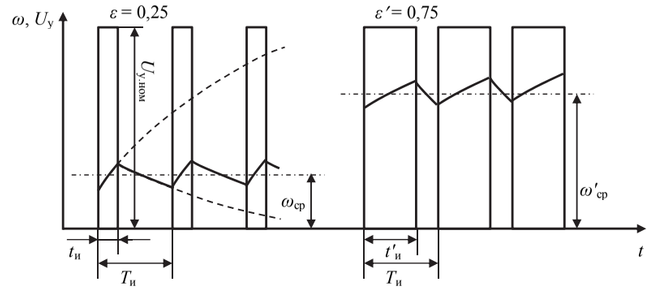


Рис. 2.4. Импульсный способ регулирования оборотов

Если эти периоды малы по сравнению с полным временем разгона и остановки ротора, то угловая скорость ротора не успевает к концу каждого периода достигать установившихся значений, и определится некоторая средняя угловая скорость $\omega_{\text{ср}}$. Значение $\omega_{\text{ср}}$ при неизменных моменте нагрузки и напряжении возбуждения однозначно определяется относительной продолжительностью импульсов ε

$$\varepsilon = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{и}}},$$

где $t_{\text{и}}$ – длительность импульса, с; $T_{\text{и}}$ – период, с.

С увеличением относительной продолжительности импульсов (см. рис. 2.4, $\varepsilon' > \varepsilon$) угловая скорость ротора растет ($\omega'_{ср} > \omega_{ср}$). В период паузы ротор тормозится.

С ростом частоты управляющих импульсов амплитуда колебаний скорости уменьшается; среднее значение угловой скорости остается при этом неизменным.

Наиболее широкое применение из всех видов импульсного регулирования для управления двигателями постоянного тока нашло широтно-импульсное регулирование напряжения. На рис. 2.5 приведена классификация основных типов широтно-импульсных преобразователей (ШИП).

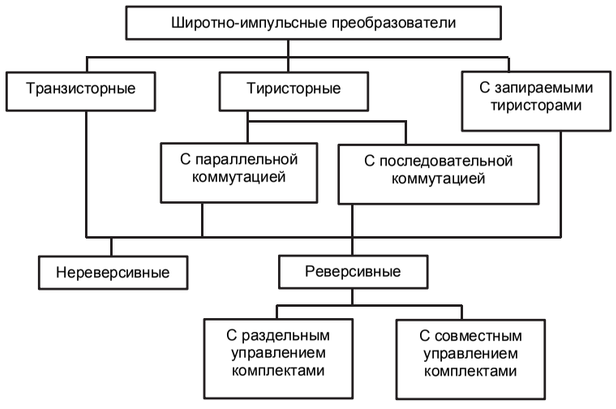


Рис. 2.5. Классификация ШИП

ШИП состоят из силовой части, выполняемой на транзисторах, тиристорах или запираемых тиристорах, и схемы управления; питаются они от сети постоянного тока.

Транзисторные ШИП в первом приближении можно считать идеальными звеньями с бесконечно малой инерционностью и бесконечно малым внутренним сопротивлением и для анализа систем «ШИП-двигатель» пользоваться выражениями механической характеристики и передаточной функции, полученной непосредственно для двигателя.

Принцип работы ***ШИП на запираемых тиристорах*** не имеет существенных отличий от работы транзисторного ШИП.

Принцип работы ***ШИП с обычными тиристорами*** в отличие от транзисторных имеет две основные особенности. Во-первых, в состав тиристорного ШИП входит схема искусственной коммутации, которая должна

при питании тиристора от сети постоянного тока в требуемый момент времени изменить полярность на аноде и катоде и запереть тиристор. Связано это с тем, что тиристор после отпирания теряет управляемость и запереть его подачей сигнала на управляющий электрод невозможно. Во-вторых, запирание тиристора требует определенного времени, что не позволяет реализовать относительную продолжительность импульсов ε, достаточно близкую к нулю.

Следящие электроприводы. Область применения следящих электрических приводов в технологическом оборудовании механической обработки расширилась после появления высокомоментных электродвигателей постоянного тока с мощными постоянными магнитами, изготовляемыми из новых магнитных сплавов, обычно получаемых методами порошковой металлургии, а также электродвигателей постоянного тока с малоинерционным ротором.

Регулируемые электродвигатели постоянного тока в следящем приводе охватываются отрицательной обратной связью по скорости вращения, реализуемой, как правило, с помощью *тахогенератора.*

Отрицательная обратная связь по скорости вращения приводит к тому, что при изменении момента сопротивления (нагрузки) M_c обороты электродвигателя постоянного тока должны будут изменяться лишь незначительно. В самом деле, если обороты электродвигателя начнут снижаться, то это приведет к снижению напряжения на выходе тахогенератора и к уменьшению величины напряжения, вычитаемой из напряжения, поступающего на вход усилителя, питающего электродвигатель. Это означает, что напряжение на выходе этого усилителя автоматически вырастет, и регулируемый электродвигатель будет запитываться большим напряжением, что и должно скомпенсировать возрастание M_c. Процесс повышения напряжения, питающего электродвигатель, будет продолжаться до тех пор, пока не перестанут снижаться обороты этого электродвигателя.

В следящих приводах подач осуществляется также отрицательная обратная связь не по скорости, а по угловому положению выходного вала привода, например, с помощью датчика типа резольвера, работающего в трансформаторном режиме. Выходной сдвиг фазы резольвера с помощью тиристорного преобразователя воздействует на широтно-импульсное модулированное напряжение, поступающее на вход регулируемого электродвигателя постоянного тока, что приводит к регулированию его оборотов. Это способствует точному позиционированию данного привода подач.

Следящие электроприводы постоянного тока обеспечивают точно дозированное перемещение рабочего исполнительного органа с заданной скоростью, с достаточно большим усилием, и в малой зависимости от испытываемых нагрузок, которые могут изменяться непредсказуемым случайным образом. Это особенно важно для тяжелых станков и для станков с ЧПУ.