

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ
«САРАТОВСКИЙ КОЛЛЕДЖ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И АВТОМОБИЛЬНОГО СЕРВИСА»

ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ

Курс лекций
для обучающихся специальности
15.02.09 Аддитивные технологии

Составитель преподаватель
ГАПОУ СО «СКПТ и АС»
Цыбина Т.В.

Саратов 2020

Содержание

Введение	3
Тема 1. Общие вопросы мехатроники	4
1.1 Мехатроника – определения, основные понятия. Архитектура системы в мехатронике	4
1.2 Структура и принципы построения мехатронных систем	8
Тема 2. Особенности конструкции и работы мехатронных модулей и систем	13
2.1 Механические узлы мехатронных модулей. Редукторы, передачи преобразования движения, подшипники, муфты, ШВП и др.	13
2.2 Электромеханические преобразователи мехатронных модулей. Классификация. Основные уравнения. Механические характеристики	22
2.3 Элементы пневматических систем мехатронных модулей	36
2.4 Управляемые приводы и их настройка. Структура управляемых приводов мехатронных систем	46
2.5 Виды датчиков, используемых в мехатронных системах Датчики положения. Датчики скорости и др. технологические датчики	49
2.6 Устройство управления мехатронных модулей и систем. Контроллеры	79
Тема 3. Теория автоматического управления мехатронными модулями и системами	93
3.1. Основные понятия и определения теории автоматического управления	93
3.2. Типовые динамические звенья САУ мехатронных модулей	99
3.3. Структурные схемы САУ мехатронных модулей	109
3.4. Устойчивость систем автоматического управления мехатронными модулями	113
Тема 4. Компьютерное моделирование в проектировании ММС	121
4.1. Программные средства, реализующие основные функции визуализации измеряемой и контролируемой информации, передачи данных и команд системе контроля и управления мехатронных модулей и систем.	121
4.2. Программирование контроллеров ММС по стандарту МЭК 61131-3	140
Список литературы	151

Введение

Данный курс лекций «Основы мехатроники» предназначен обучающимся по специальности 15.02.09 Аддитивные технологии.

Совершенствование знаний в области систем автоматизированного управления технологическим процессом, понимание концепции построения и основ проектирования и конструирования мехатронных модулей и систем требует знаний в области механики, электротехники, электрических машин, преобразовательной и электронной техники, компьютеров и микропроцессоров, программирования, теории систем автоматического управления, конструирования.

В связи с этим представилось целесообразным составить курс лекций «Основы мехатроники», где будут изложены современные принципы построения и применения мехатронных модулей и систем, что позволит читать и составлять принципиальные схемы электрических, гидравлических и пневматических приводов, несложного технологического оборудования, составлять управляющие программы для программируемых логических контроллеров, распознавать, классифицировать и использовать датчики, реле и выключатели в системах управления, правильно эксплуатировать мехатронное оборудование.

Курс лекций «Основы мехатроники» является учебной дисциплиной, которая входит в состав Общепрофессионального цикла основной профессиональной образовательной программы и написан в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины ОП.09 Основы мехатроники.

Тема 1. Общие вопросы мехатроники

1.1 Мехатроника – определения, основные понятия. Архитектура системы в мехатронике

Современный термин "Мехатроника", согласно японским источникам, был введен фирмой Yaskawa Electric в 1969 году. Это название получено комбинацией терминов "МЕХАника" и "Элек-ТРОНИКА". Такое объединение в едином словосочетании означает интеграцию знаний в соответствующих областях науки и техники, которая позволила создать условия для появления техники новых поколений и производства новейших видов оборудования.

Аналогичным образом шло развитие электромеханики как науки, использующей достижения электротехники и механики при создании приводных исполнительных систем широкого назначения. Интеграция электромеханики и микроэлектроники привела к появлению комплектных интегрированных мехатронных модулей движения рабочих органов и узлов машин, а также создаваемого на их основе оборудования. Именно в этом направлении наиболее активно развивалась мехатроника в СССР.

К началу 80-х годов термин "Мехатроника" в мировой технической литературе используется применительно к области проектирования машин с компьютерным управлением движением. И соответственно интегрируя достижения в области электромеханики, электроники и систем компьютерного управления движениями машин и пространственных механизмов.

До настоящего времени "Мехатроника" находится в стадии становления, и ее определение и базовая терминология еще полностью не сформированы. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть известные определения, выражающие суть предмета мехатроники.

В известных определениях подчеркивается триединая сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой

взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Видимо поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга (рис.1.1).



Рисунок 1.1 – Определение термина "Мехатронная система"

Таким образом, системная интеграция трех указанных видов элементов является необходимым условием построения мехатронной системы.

Современные тенденции развития промышленности обуславливают следующую трактовку:

Мехатроника – область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов. С другой стороны, мехатроника – область техники, обеспечивающая полный жизненный цикл мехатронного объекта.

Мехатронный объект синтезируется на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными состояниями (в т.ч. движениями).

На данный момент предлагается иерархия терминов мехатроники. В этой иерархии, термин «мехатронный объект» – это обобщающее понятие, которое включает в себя мехатронные систему, агрегат, модуль или узел.

К **первому уровню** относят мехатронный узел или мехатронный модуль. **Мехатронный модуль** – унифицированный мехатронный объект, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате. Примерами мехатронных модулей служат части станков - шпиндельная бабка, поворотный стол. В качестве модулей могут выступать двигатели, редукторы и т.п. Более сложные модули (автономные приводы) - мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель, мотор-барабан и поворотный стол. Узел принципиально отличается от модуля тем, что он не унифицирован.

Второй уровень – агрегат (машина), включающий в себя несколько модулей, предназначенных для реализации заданных движений в условиях взаимодействия с внешней средой. Примеры агрегатов - промышленные роботы, станки с ЧПУ и т.д.

Третий уровень – мехатронная система, состоящая из нескольких агрегатов или агрегата и ряда отдельных модулей, т.е. из объектов одинаковых или разных низших уровней. Система – совокупность компонентов, каким-либо образом связанных между собой: подчиненных определенному отношению, зависимости или закономерности; действующих как одно целое. Она полностью отвечает этому определению как совокупность механических, электронных и управляющих компонентов, образующих синергетическое единство, действующее как одно целое.

Примеры мехатронных систем - гибкие производственные системы или современные автомобили.

Термин «устройство» применяется как общее название для узла (модуля), агрегата (машины). Термин «прибор» относится к измерительным и регулирующим устройствам, предназначенным для получения и преобразования информации.

Мехатронные технологии – информационные технологии управления движением, т.е. реализация с помощью информационных технологий сложных законов исполнительных движений, которые по тем или иным причинам не могли быть реализованы с использованием традиционных технологий ранее. Например, интеллектуализация металлорежущих станков и достижения в области динамики резания позволяют с помощью данных технологий управлять различными видами колебаний, динамической характеристикой технологической системы, корректировать возникающие недостатки этой системы и т.д.

Важным является определение признаков мехатронности. Мехатронными объектами являются большинство современных электромеханических систем с управлением. Очень многие электронные объекты фактически являются мехатронными.

К объектам разной степени мехатронности или уровней интеграции можно отнести станки с ЧПУ, промышленные и специальные роботы, многие образцы авиакосмической, военной техники и автомобилестроения.

Мехатронными являются офисная техника (факсы, копиры), средства вычислительной техники (плоттеры, принтеры, дисководы), видеотехника (видеомагнитофоны), бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и др. машины-автоматы), нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски), тренажеры для подготовки пилотов и операторов, шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления).

Мехатронность объектов – динамическое явление, формируемое в процессе их эволюционного развития и совершенствования. Отсюда и различная степень интеграции компонентов и уровня их интеллектуализации.

К полностью мехатронным относят объекты, в которых реализована максимально возможная степень интеграции в сочетании с наивысшим уровнем интеллектуализации.

В настоящее время большей частью применяют мехатронизированные объекты, чем в значительной мере и определяется настоящий период развития мехатроники.

1.2 Структура и принципы построения мехатронных систем

Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования (concurrent engineering methods). При традиционном проектировании машин с компьютерным управлением последовательно проводится разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы, а затем выбор интерфейсных блоков.

Парадигма параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех компонент системы.

На рис.1.2 представлена обобщенная структура машин с компьютерным управлением (автоматических роботов), используемых в машиностроении. Данная схема позволяет показать принципы построения мехатронных систем.

Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.

При выполнении мехатронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для

операций механообработки, контактные силы и моменты сил при сборке, сила реакции струи жидкости при операции гидравлической резки.

Внешние среды делят на два основных класса: детерминированные и недетерминированные. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой точностью для проектирования мехатронных систем. Некоторые среды являются недетерминированными по своей природе (например, экстремальные среды: подводные, подземные и т.п.). Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. Например, для определения сил резания при механообработке проводятся экспериментальные исследования на специальных установках, параметры вибрационных воздействий измеряют на вибростендах с последующим формированием математических и/или компьютерных моделей возмущающих воздействий.

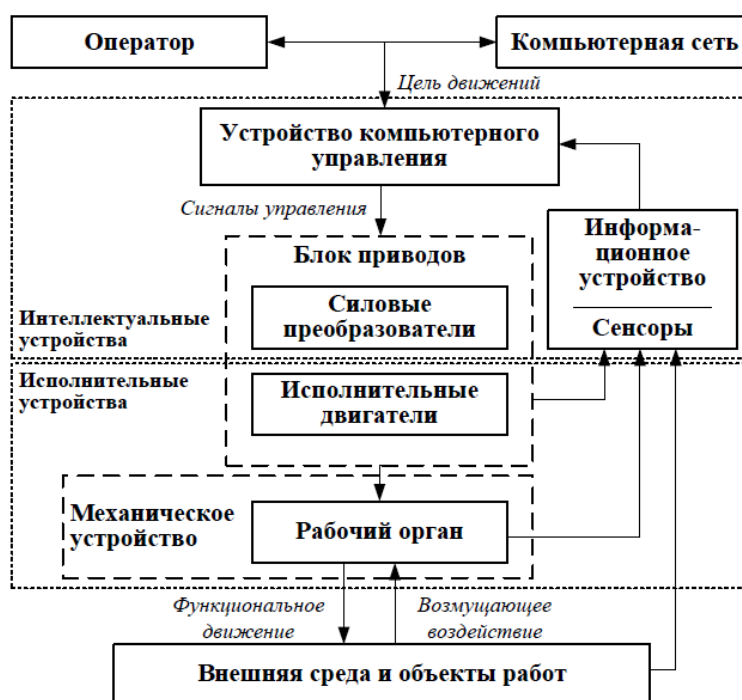


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема машины с компьютерным управлением движением

Однако для проведения таких исследований, как правило, требуются слишком сложные и дорогостоящие аппаратура и измерительные технологии. Так для предварительной оценки силовых воздействий на рабочий орган на операции роботизированного удаления облоя с отливок необходимо контролировать их форму и размеры. В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного управления, которые позволяют автоматически корректировать закон движения рабочих органов мехатронных систем непосредственно в ходе выполнения операции.

Первичным признаком мехатронных систем является наличие трех обязательных частей – механической (электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками:

- Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (тормоза, муфты).
- Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в требуемое движение рабочего органа.
- Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей.
- Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления.
- В состав компьютерного устройства обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;

- организация управления функциональными движениями мехатронной системы, которая предполагает координацию управления механическим движением мехатронной системы и сопутствующими внешними процессами.
- взаимодействие с оператором через интерфейс в режимах автономного программирования (off-line) и непосредственно в процессе движения мехатронной системы (on-line).
- организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня управления, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Особенность мехатронного подхода к проектированию заключается в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы. Соответственно на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как минимум один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, будет выполнять заданное функциональное движение с допустимой погрешностью. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули обязательно сопровождаются разработкой интегрированного программного обеспечения.

Программные средства обеспечивают непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени.

Применение мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением определяет их основные преимущества по сравнению с традиционными средствами автоматизации:

- относительно низкую стоимость благодаря высокой степени интеграции, унификации и стандартизации элементов и интерфейсов;
- высокую точность сложных движений вследствие применения методов интеллектуального управления;
- высокую надежность, долговечность и помехозащищенность;
- конструктивную компактность модулей (вплоть до миниатюризации в микромашинах);
- улучшенные массогабаритные и динамические характеристики машин вследствие упрощения кинематических цепей;
- возможность комплексирования функциональных модулей в сложные системы и комплексы под конкретные задачи заказчика.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение термина «мехатроника».
2. Что такое мехатронный объект?
3. Каким мехатронным уровням может соответствовать технический объект? Приведите примеры.
4. Что такое «устройство»?
5. Мехатронность технических объектов, что это такое?
5. Какие основные принципы положены в основу построения мехатронных систем?
6. Какие устройства могут являться составной частью машин с компьютерным управлением движением?
7. Какие функции выполняет устройство компьютерного управления в мехатронной системе или модуле?
8. Объясните суть мехатронного подхода к проектированию.
9. Какие основные преимущества мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением по сравнению с традиционными средствами автоматизации?

Тема 2. Особенности конструкции и работы мехатронных модулей и систем

2.1 Механические узлы мехатронных модулей

Передача движения от двигателя к выходному звену мехатронного модуля может быть обеспечена с помощью различных преобразователей движения (передач), структура и конструктивные особенности которых зависят от типа двигателя, вида перемещения выходного звена и их расположения (компоновки).

Преобразователи движения предназначены для преобразования одного вида движения в другое, согласования скоростей и вращающих моментов двигателя и выходного звена (рис.2.1).

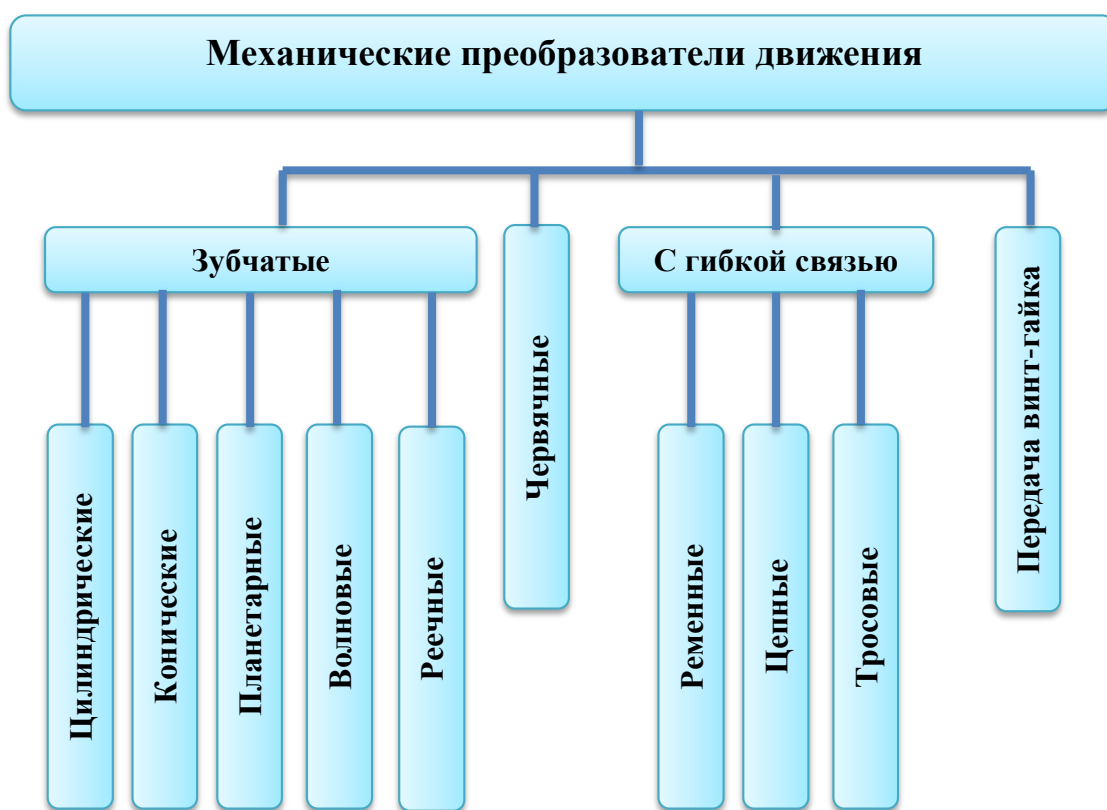


Рисунок 2.1 – Механические преобразователи движения

Для преобразования движения используют зубчатые, червячные передачи, передачи с гибкой связью и передачи винт-гайка. Электродвигатели мехатронных систем в основном высокооборотные, рабочие скорости выходных звеньев мехатронных модулей сравнительно невелики, то для согласования скоростей используют понижающие передачи (редукторы): зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные и волновые. Тип преобразователя движения выбирают, исходя из сложности его конструкции, коэффициента полезного действия, люфта в передаче, габаритных размеров и массы, свойств самоторможения, жесткости, удобства компоновки, технологичности, долговечности, стоимости и т. п. Выбор преобразователя движения оказывает существенное влияние на характеристики мехатронного модуля.

2.1.1 Зубчатые передачи

2.1.1.1 Цилиндрическая зубчатая передача

Цилиндрическая передача предназначена для преобразования (изменения угловых скоростей и моментов) вращательного движения между валами с параллельными осями (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Цилиндрическая зубчатая передача

2.1.1.2 Коническая зубчатая передача

Коническая передача предназначена для преобразования (изменения угловых скоростей и моментов) вращательного движения между валами с пересекающимися осями (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Коническая зубчатая передача

2.1.1.3 Планетарная передача

Планетарными называют передачи, содержащие зубчатые колеса, оси которых подвижны, как показано на рис. 2.4. Движение этих колес сходно с движением планет и поэтому их называют планетарными или сателлитами.



Рисунок 2.4 - Планетарная передача

Простейшая планетарная передача состоит из центрального солнечного зубчатого колеса с наружными зубьями, центрального корончатого зубчатого колеса с внутренними зубьями, сателлитов с внешними зубьями, которые входят в зацепление одновременно с солнечным и корончатым колесами, и водила, на котором расположены оси сателлитов.

Достоинства планетарных зубчатых передач:

- компактность и малая масса;
- реализация больших передаточных отношений;
- малая нагрузки на опоры;
- большого коэффициента полезного действия;

- высокая кинематическая точность;
- жесткость и надежность.

Недостатки планетарных зубчатых передач:

- конструктивная сложность;
- повышенные требования к точности изготовления и монтажа;
- снижение коэффициента полезного действия при увеличении передаточного отношения.

В зависимости от порядка наложения связей на звенья планетарные передачи могут использоваться как для суммирования нескольких вращательных движений, так и для их разделения между несколькими ведомыми валами.

2.1.1.4 Волновая зубчатая передача

Состоит из жёсткого неподвижного элемента (6) — зубчатого колеса с внутренними зубьями (4), неподвижного относительно корпуса передачи; гибкого элемента (3) — тонкостенного упругого зубчатого колеса с наружными зубьями, соединённого с выходным валом (5); генератора волн — кулачка, эксцентрика или другого механизма (2), растягивающего гибкий элемент до образования в двух (или более) точках пар зацепления с неподвижным элементом (рис.2.5).

Число зубьев гибкого колеса несколько меньше числа зубьев неподвижного элемента. Число волн деформации равно числу выступов на генераторе. В вершинах волн зубья гибкого колеса полностью входят в зацепление с зубьями жёсткого, а во впадинах волн — полностью выходят из зацепления. Линейная скорость волн деформации соответствует скорости вершин выступов на генераторе, то есть в гибком элементе существуют бегущие волны с известной линейной скоростью. Разница чисел зубьев жёсткого и гибкого колёс обычно равна (реже кратна) числу волн деформации.

Например, при числе зубьев гибкого колеса 200, неподвижного элемента — 202 и двухволновой передаче (два выступа на генераторе волн) при вращении генератора по часовой стрелке первый зуб гибкого колеса будет входить в первую впадину жёсткого, второй — во вторую и т.д. до двухсотого зуба и двухсотой впадины. На следующем обороте первый зуб гибкого колеса войдёт в двести первую впадину, второй — в двести вторую, а третий — в первую впадину жёсткого колеса. Таким образом, за один полный оборот генератора волн гибкое колесо сместится относительно жёсткого на 2 зуба.

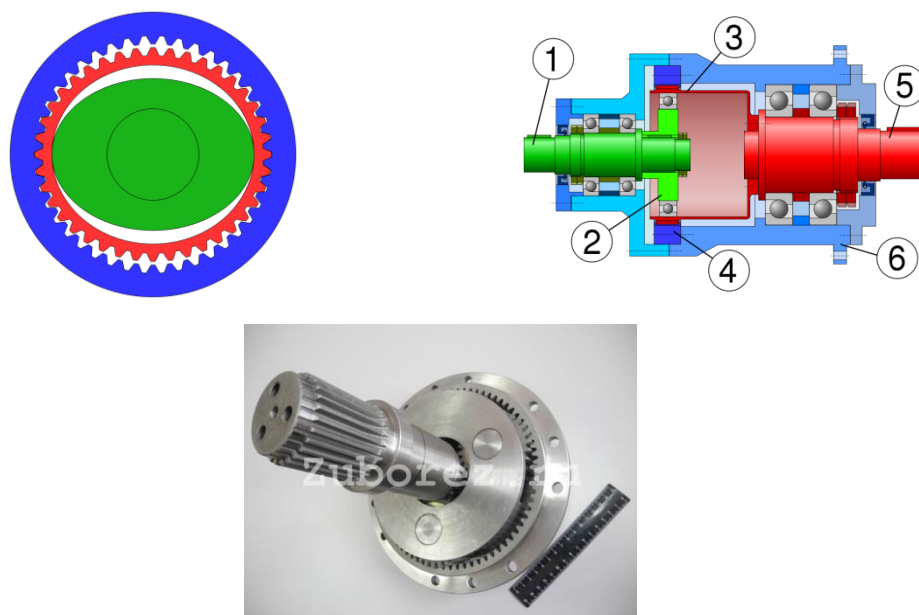


Рисунок 2.5 - Волновая зубчатая передача

Достоинства волновой зубчатой передачи:

- большое передаточное отношение, при малом количестве деталей ($i = 80-320$);
- улучшенные массо-габаритные характеристики по сравнению с обычными зубчатыми передачами;
- высокая кинематическая точность и плавность хода;
- высокая нагрузочная способность;
- передача момента через герметичные стенки.

Недостатки волновой зубчатой передачи:

- высокая напряжённость основных элементов гибкого колеса и генератора волн;
- пониженная крутильная жесткость.

2.1.1.5 Реечная передача

Реечная передача предназначена для преобразования вращательного движения шестерни в поступательное движение рейки и, наоборот, поступательного движения рейки во вращательное движение шестерни. Основными звеньями реечной передачи являются шестерня и зубчатая рейка (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 - Реечная передача

2.1.2 Червячная передача

Червячные передачи применяют для передачи вращательного движения между валами, у которых угол скрещивания осей составляет 90° .

Червячная передача — это зубчато-винтовая передача, движение в которой осуществляется по принципу винтовой пары. Ведущим является червяк, т. е. короткий винт с трапецеидальной или близкой к ней резьбой. Для облегчения тела червяка венец червячного колеса имеет зубья дугообразной формы, что увеличивает длину контактных линий в зоне зацепления (рис.2.7).



Рисунок 2.7 - Червячная передача

Червячные передачи применяют при небольших и средних мощностях, обычно не превышающих 100 кВт. Червячные передачи широко применяют в подъемно-транспортных машинах, троллейбусах и особенно там, где требуется высокая кинематическая точность (делительные устройства станков, механизмы наводки и т. д.). Червячные передачи во избежание их перегрева предпочтительно использовать в приводах периодического (а не непрерывного) действия.

Достоинства червячной передачи:

- плавность и бесшумность работы,
- компактность и сравнительно небольшая масса конструкции,
- получение больших передаточных чисел (в не силовых передачах),
- получение самотормозящей передачи, что позволяет выполнить механизм без тормозного устройства, препятствующего обратному вращению колеса,
- высокая кинематическая точность.

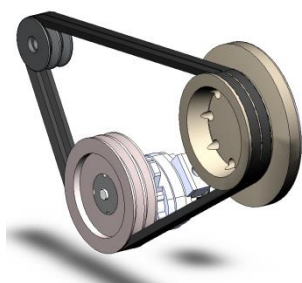
Недостатки червячной передачи:

- низкий КПД,
- значительное выделение теплоты в зоне зацепления червяка с колесом,
- повышенное изнашивание и склонность к заеданию.

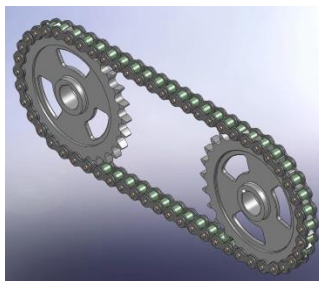
2.1.3 Передачи с гибкой связью

Передачи с гибкой связью предназначены для передачи вращательного движения и преобразования поступательного во вращательное движение и наоборот вращательного в поступательное движение.

К передачам с гибкой связью относят ременную, цепную, тросовую передачи (рис. 2.8).



Ременная передача



Цепная передача



Тросовая передача

Рисунок 2.8 - Передачи с гибкой связью

2.1.4 Передача винт-гайка

2.1.4.1 Передача винт-гайка скольжения

Передача винт-гайка скольжения служит для преобразования вращательного в поступательное движение, а иногда и для преобразования поступательного во вращательное движение (при использовании многозаходной винтовой пары).

Передача состоит из винта и гайки, как показано на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 - Передача винт-гайка скольжения

Достоинства передачи винт-гайка скольжения:

- простая конструкция и изготовление,
- компактностью при высокой нагрузочной способности,
- высокой надежностью,
- плавностью и бесшумностью,
- возможностью обеспечения
- перемещений с большой точностью и выигрышем в силе.

Недостатки передачи винт-гайка скольжения:

- обязательное наличие зазоров (люфтов),
- повышенный износ резьбы,
- низкий КПД.

2.1.4.2 Шарико-винтовая передача (ШВП)

Передача винт-гайка качения (шарико-винтовая передача) предназначена для преобразования вращательного в поступательное движение, и наоборот, поступательного во вращательное движение (при обеспечении отсутствия самоторможения).

В винтовых шариковых парах между рабочими винтовыми поверхностями винта и гайки (иногда вкладыша) помещены стальные шарики, как показано на рис. 2.10.

Для обеспечения непрерывной циркуляции шариков концы рабочей части винтовой поверхности соединены возвратным каналом. Возвратный канал может представлять собой отверстие, просверленное в теле гайки и соединяющее начало первого витка с концом последнего витка резьбы (см. рис. 2.10), изогнутую трубку, концы которой вставлены в отверстия гайки, просверленные по касательной к поверхности резьбы, специальный вкладыш, который направляет шарики из впадин одного витка через выступ резьбы винта во впадину соседнего витка.

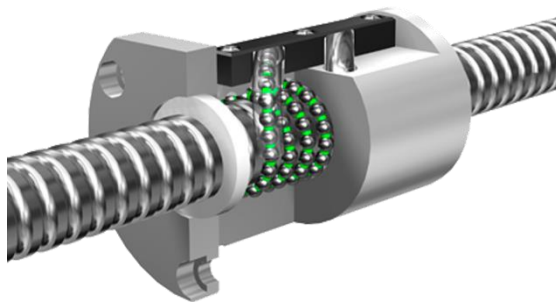


Рисунок 2.10 - Шарико-винтовая передача

Достоинства шарико-винтовой передачи:

- высокий КПД (0,9...0,95),
- малым коэффициент трения-качения,
- небольшой износ,
- высокая точность хода,
- долговечность,
- высокая чувствительность к микроперемещениям,
- возможность работы без смазки.

Недостатки шарико-винтовой передачи:

- сложная технология изготовления,
- высокая стоимость,
- пониженное демпфирование,
- необходимость защиты от пыли.

2.2 Электромеханические преобразователи мехатронных модулей

Электромеханические преобразователи — это класс устройств, созданных для преобразования электрической энергии в механическую, и наоборот. Основным видом электромеханического преобразователя является электродвигатель (электрогенератор).

В мехатронных модулях (ММ) применяют двигатели постоянного тока, синхронные и асинхронные двигатели переменного тока.

Наиболее простым в управлении является двигатель постоянного тока, так как при постоянном значении магнитного потока регулирование момента производят только изменением величины тока.

Синхронный двигатель (иногда его называют вентильным) состоит из синхронной электрической машины, датчика положения ротора и электронного устройства управления.

Управление синхронным двигателем сложнее, поскольку при фиксированном значении магнитного потока, кроме регулирования величины тока, необходимо также регулировать величину пространственного угла, добиваясь получения требуемого значения момента.

Наиболее сложным в управлении является асинхронный двигатель. Управление им требует регулирования тока статора при поддержании постоянства магнитного потока и пространственного угла для получения максимального значения развиваемого момента.

По большинству других характеристик, и прежде всего по массо-габаритным показателям, двигатели переменного тока превосходят двигатели постоянного тока.

При выборе двигателя постоянного тока необходимо учитывать его форму, так как она в значительной мере определяет геометрические параметры ММ.

По конструктивному исполнению различают два вида двигателей: классическую форму ($L/D \geq 2$) и дисковую ($L/D \leq 1$),

где L — длина двигателя,

D — диаметр его корпуса.

Форма двигателя зависит от конструкции якоря и вида встроенных датчиков. Известны три вида конструктивного исполнения якорей двигателей постоянного тока: классический, гладкий и малоинерционный. Вид якоря определяют по наличию на нем паза (классический) или отсутствию паза (гладкий) и выполнению якоря полым или дисковым (малоинерционный).

По способу подведения напряжения в обмотку якоря двигатели постоянного тока делят на коллекторные и бесконтактные (вентильные).

Двигатели с классическим якорем имеют относительно небольшой диаметр якоря при значительной его длине. Следовательно, классическая (удлиненная) форма двигателя обусловлена конструкцией якоря. Эти двигатели надежны, обладают большой прочностью и теплоемкостью. К ним относят, например, коллекторные двигатели с обмоткой возбуждения серий Д и СД, с возбуждением от постоянных магнитов серий ДП и ДПМ и т. п.

У двигателей серий Д и СД, например, Д-25Г, СД-150 цифры 25 и 150 в их обозначении указывают значение номинальной мощности, Вт. В обозначении двигателей серии ДПМ мощностью свыше 100 Вт, например, ДПМ-1,6, цифры обозначают величину номинального момента, Нм, а мощностью менее 100 Вт, например, ДПМ-25, — наружный диаметр корпуса, мм.

Двигатели с малоинерционным полым якорем имеют классическую (удлиненную) форму. В них постоянные магниты могут находиться как внутри ротора, так и снаружи. В последнем случае момент инерции вращающихся частей меньше, чем при расположении магнитов внутри ротора.

Эти двигатели обладают более высоким КПД и большим быстродействием по сравнению с двигателями с классическим якорем.

Двигатели с малоинерционным дисковым якорем имеют форму короткого цилиндра, длина которого меньше диаметра. Якорь у таких двигателей представляет собой закрепленный на валу тонкий немагнитный диск.

Возбуждение такого двигателя обычно создается постоянными магнитами (реже обмотками возбуждения), расположенными в торцевой плоскости, так что двигатель имеет не цилиндрический (радиальный) воздушный зазор, а плоский (аксиальный), вследствие чего уменьшается осевой габарит двигателя.

Дисковые двигатели обладают большим быстродействием, чем классические, так как их вращающаяся часть имеет малый момент инерции. При этом кратность пускового момента у них выше (до 10), чем у классических.

У двигателей с дисковым якорем существует проблема отвода тепла, так как тепловая постоянная якоря относительно мала. Поэтому ММ с двигателями с дисковым якорем рекомендуют устанавливать на металлическом основании или осуществлять принудительную их вентиляцию.

Условное обозначение коллекторного двигателя серии ДП с дисковым якорем с проволочной обмоткой, выведенной на коллектор, и возбуждением от постоянных магнитов, например ДП125—60—3—24, расшифровывают следующим образом: 125 — диаметр корпуса, мм; 60 — номинальная мощность, Вт; 3 — частота вращения вала, тыс. об/мин; 24 — напряжение питания, В. В двигателях с дисковым якорем с печатной обмоткой и возбуждением от постоянных магнитов серии ПЯ, например ПЯ-50, цифра 50 указывает номинальную мощность, Вт. Двигатели серии ПЯ снабжены встроенным тахогенератором.

Коллекторные двигатели постоянного тока обладают малым сроком службы, повышенной чувствительностью к воздействиям окружающей среды, искрением под щетками, образованием щеточной пыли. Эти недостатки связаны с наличием скользящего контакта в щеточно-коллекторном узле.

У **бесконтактных двигателей** механический коллектор заменен бесконтактным переключателем (коммутатором) на полупроводниковых приборах. Коммутатор управляется датчиком положения ротора. Габаритные размеры и масса двигателя несколько увеличиваются, но значительно повышаются его надежность и долговечность по сравнению с коллекторными двигателями.

Бесконтактный двигатель содержит синхронную машину и датчик углового положения ротора. Бесконтактный двигатель постоянного тока имеет инверсное (обращенное) исполнение, т. е. обмотка якоря расположена в пазах статора, а на роторе размещены постоянные магниты с одной или двумя парами полюсов.

В качестве датчиков положения ротора применяют сельсины, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы), датчики Холла. При дискретном способе управления используют цифровые датчики положения. Срок службы современных бесконтактных двигателей превышает 10 000 ч.



Рисунок 2.11 – Двигатели постоянного тока

В ММ широко применяют бесколлекторные двигатели переменного тока, обладающие следующими преимуществами:

- длительность службы (гарантийный срок службы более 40 000 ч);
- большие допустимые кратковременные перегрузки по току;
- возможность использования в агрессивных средах (отсутствует механический контактный коллектор, источник искрового и дугового разрядов);
- небольшие массогабаритные параметры; удобное с точки зрения охлаждения расположение обмотки (на неподвижном статоре).

Различают асинхронные и синхронные двигатели переменного тока.

Асинхронные двигатели применяют разных модификаций: однофазные, двухфазные и трехфазные, с короткозамкнутым и фазным роторами. В настоящее время в ММ находят наибольшее применение трехфазные короткозамкнутые электродвигатели.

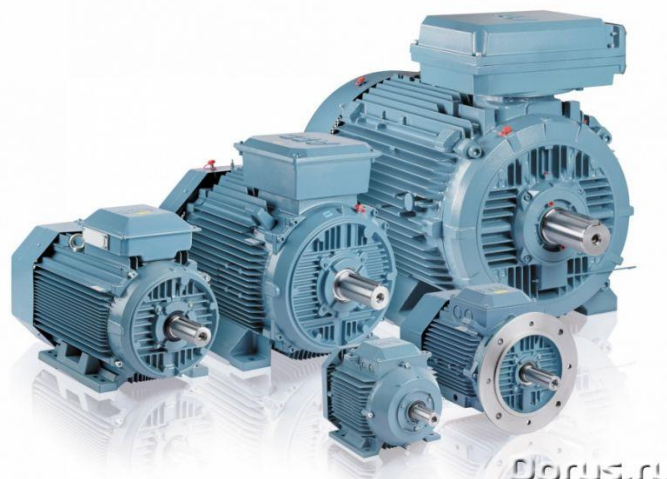


Рисунок 2.12 - Асинхронные двигатели переменного тока

Регулирование скорости асинхронного короткозамкнутого двигателя производят путем изменения задаваемой частоты и тока электродвигателя. Такое регулирование называют частотно-токовым.

Синхронные двигатели применяют в различных областях техники. Они характеризуются хорошей управляемостью, высоким КПД, бесконтактностью, широкими функциональными возможностями.

Применение синхронных двигателей в ММ обеспечивает высокую частоту вращения выходного звена, малое время (менее 0,1 с) разгона от нуля до максимальной частоты вращения, отсутствие пульсаций момента, малые массу и габариты, небольшой собственный момент инерции, высокую перегрузочную способность в циклическом режиме, широкий диапазон регулирования частоты вращения.

Электромагнитный момент синхронного двигателя зависит от магнитного потока возбуждения, тока и пространственного угла между векторами магнитного потока и тока.

У синхронных двигателей угол ϕ положения ротора относительно статора контролируется дискретным датчиком. Равномерность регулирования в пределах шага достигается путем регулирования тока.

Система управления — замкнутая. Такой режим работы называют режимом бесконтактного двигателя постоянного тока. При работе в нем синхронный двигатель имеет механические и регулировочные характеристики двигателя постоянного тока.

Однако наиболее хорошие регулировочные свойства синхронный двигатель приобретает не при дискретном, а при непрерывном контроле положения ротора и отслеживании равенства угла $\phi = 90^\circ$, тем самым формируя синусоидальное значение тока в каждой фазе. В этом случае двигатель имеет самые высокие энергетические характеристики.

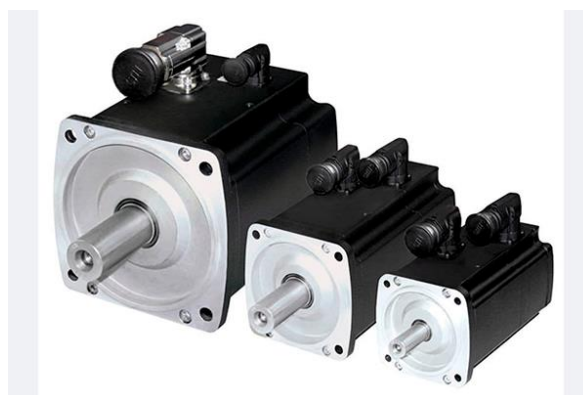


Рисунок 2.13 - Синхронные двигатели переменного тока

Примером синхронных вентильных двигателей являются двигатели серий: ДВУ (на магнитах из феррита-стронция); 2ДВУ (на редкоземельных магнитах); 3ДВУ (дисковые на редкоземельных магнитах).

Максимальный допустимый момент этих двигателей равен пятикратному номинальному моменту.

Все двигатели серии ДВУ имеют пристраиваемый комплексный датчик типа ПДФ-8 или ПДФ-9, включающий в себя бесколлекторный тахогенератор, бесконтактный датчик положения ротора и датчик положения

или встроенный датчик аналогичного назначения. Имеется модификация двигателей со встроенным электромагнитным тормозом.

Следует отметить новое направление в конструктивном исполнении двигателей: проектирование и создание двигателей для непосредственного встраивания в механизм, а не принятого универсального присоединения к механизму. В состав таких двигателей не входят вал, опорные щиты и подшипники, что существенно упрощает конструкцию преобразователя движения.

Вентильные бесконтактные двигатели серии ДБМ имеют плоскую встраиваемую конструкцию из статора 1 и ротора 2 и предназначены для работы в шаговом и регулируемом режимах.

Подобное исполнение обеспечивает пакетирование для увеличения требуемого момента, т. е. конструкция двигателя в этом случае представляет собой пакет синхронных машин с общим датчиком положения ротора.

Условное обозначение двигателя серии ДБМ, например, ДБМ- 63— 0,06—3—2, расшифровывают следующим образом: ДБМ — двигатель бесконтактный моментный; 63 — внешний диаметр корпуса, мм; 0,06 — номинальный момент, Нм; 3 — номинальная частота вращения, тыс. об/мин; 2 — число фаз.

Двигатели серии ДБМ спроектированы для работы с малыми скоростями и большими моментами и обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными бесконтактными двигателями: повышенным ресурсом работы; большим отношением вращающего момента к моменту инерции ротора, что обеспечивает высокое быстродействие; высокой точностью отработки угла поворота из-за отсутствия упругих связей и люфтов. Применение таких двигателей в ММ позволяет во многих случаях отказаться от преобразователя движения.

В большинстве случаев электродвигатели серии ДБМ используют в режиме бесконтактной машины постоянного тока.

Электродвигатели линейного перемещения

Технология непосредственного привода линейного двигателя обеспечивает значительно лучший подход к решению задач позиционирования. Данная технология предполагает прямое применение силы электромагнитного взаимодействия без использования ремня, шариковинтовой передачи или иного промежуточного звена. Линейный привод производит непосредственное линейное перемещение, а не преобразует вращательное движение в поступательное.

Устройство линейного двигателя

Самый простой способ описать устройство линейного двигателя – это представить двигатель вращения с постоянными магнитами, разрезанный вдоль и развернутый в плоскость. Традиционные линейные двигатели имеют именно такую конструкцию.

Новые линейные двигатели, так называемые tubular linear actuator, имеют форм-фактор соленоида.

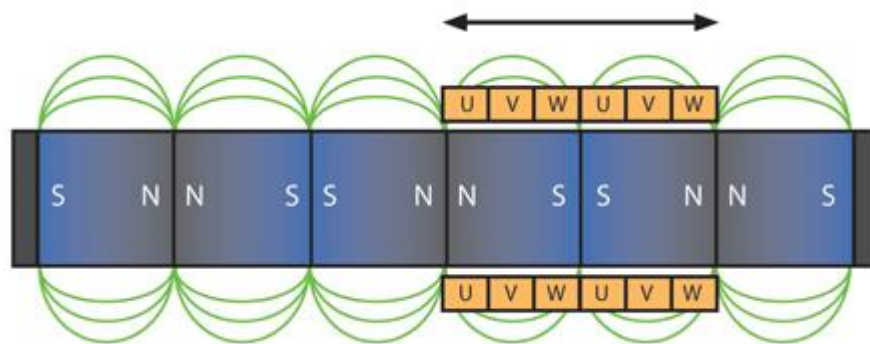


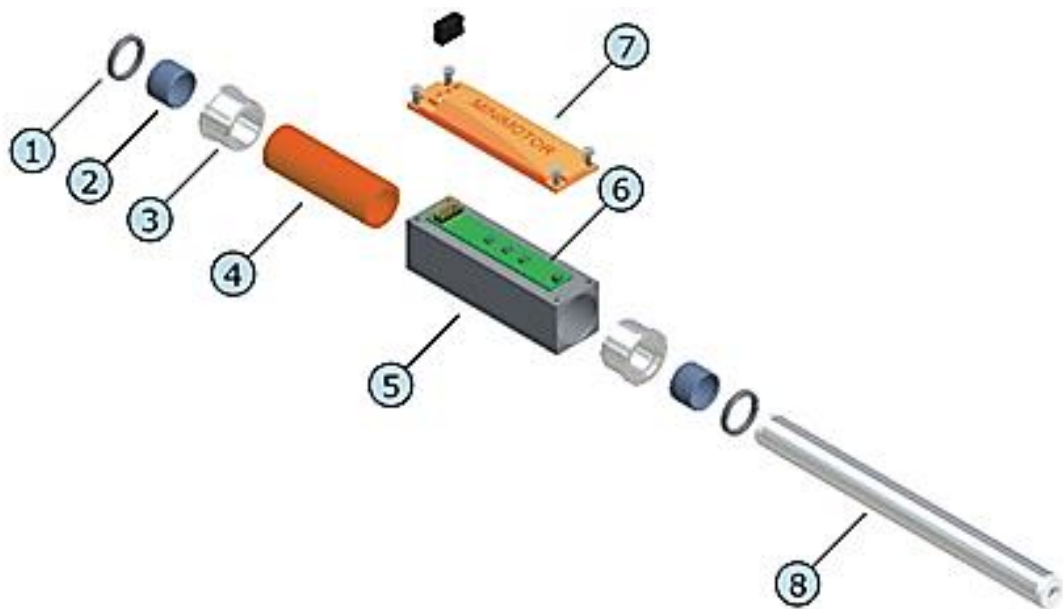
Рисунок 2.14 – Структура трубчатого линейного двигателя

Сам двигатель находится в пределах немагнитного корпуса из нержавеющей стали, так называемой каретки. Самонесущая обмотка находится внутри каретки вместе с подшипником скольжения изготовленного из специального полимерного материала. Внутри обмотки размещается подвижный элемент – шток. Шток представляет собой полый

немагнитный цилиндр из нержавеющей стали, в котором размещены небольшие сверхпрочные редкоземельные магниты в форме таблеток. Подвижный шток является ключевым компонентом двигателя, он воплощает в себе запатентованный дизайн, который позволяет создать точное синусоидальное магнитное поле по всей его длине. Данная особенность позволяет использовать интегрированные в корпус двигателя датчики обратной связи вместо традиционных внешних датчиков положения. Это важно, поскольку внешние датчики линейных перемещений зачастую могут стоить почти столько же, сколько и сам привод, кроме того, они сами являются высокоточными устройствами, которые требуют специальных условий окружающей среды, точной настройки и технического обслуживания. Интегрированные датчики Холла располагаются на электронной плате под защитной крышкой каретки.

Трубчатый форм-фактор дает поразительные преимущества. Данное исполнение обеспечивает математически идеальную ориентацию магнитного поля между обмотками каретки двигателя и магнитным штоком. Все магнитные силовые линии пересекают проводники с током под прямым углом. Такая ориентация позволяет создать максимальное усилие и эффективность. Высокая эффективность в свою очередь означает минимальное количество выделяемого тепла, которое максимизирует количество рабочих циклов.

Линейным электродвигателем можно управлять с помощью любого трехфазного серводрайвера постоянного тока, который также имеет $\sin/\cos$ интерфейс обратной связи. Тем не менее лучших динамических показателей можно достичь только при использовании драйверов, специально оптимизированных для работы с линейными двигателями. В частности, такие виды контроллеров движения предлагает компания Copley Controls.



Составляющие линейного серводвигателя:
1. Кольцевая гайка. **2.** Подшипники скольжения. **3.** Суппорт. **4.** Обмотка. **5.** Корпус. **6.** Печатная плата. **7.** Крышка. **8.** Цилиндрический шток с магнитами.

Рисунок 2.15 – Линейный серводвигатель

Линейные серводвигатели Faulhaber



Рисунок 2.16 – Линейный серводвигатель Faulhaber

Для реализации особо точного программируемого линейного движения Faulhaber предлагает серию линейных серводвигателей.

Эти приводы при компактном размере (двигатель LM2070 – 20 мм сторона квадрата каретки и 70 мм длина) развивают усилия до 27 Н, могут использоваться как в режиме двигателя (двигается каретка при зафиксированном вале), так и в режиме актуатора (двигается вал, каретка зафиксирована). Благодаря интегрированным линейным датчикам Холла,

могут быть достигнуты точности позиционирования до 120 мкм и повторяемости до 40 мкм без применения каких-либо внешних датчиков.

Линейные серводвигатели не требуют смазки либо какого-либо дополнительного обслуживания при работе, бесшумны, развивают скорость до 3,2 м/с, а ускорения – до 198 м/с². Линейные двигатели Faulhaber предлагаются с различной длиной штока. Доступны исполнения как для работы с компактными контроллерами производителя, так и с синусно-косинусной обратной связью, позволяющие реализовать управление с помощью ПЛК-контроллера. Кроме того, компания Faulhaber, предлагает контроллеры движения специально для работы с линейными двигателями, позволяющие реализовать полноценную настройку и конфигурацию линейного привода. Они свободно программируемы и поддерживают как последовательный интерфейс RS-232, так и сетевой интерфейс CAN.

Линейные серводвигатель Dunkermotoren

Линейные серводвигатели Dunkermotoren серии ServoTube доступны в двух исполнениях:

1. Двигатели прямого привода, предназначенные для реализации работы в режиме актуатора (подвижный шток двигателя).
2. Компоненты линейных сервосистем, предназначенные для использования в качестве OEM-комплектующих и требующие установки дополнительных подшипников. С помощью таких компонентов возможно реализовать работу двигателя с нагрузкой, приложенной непосредственно к каретке при зафиксированном штоке.



Рисунок 2.17 – Линейные серводвигатель Dunkermotoren

В состав двигателя входит интегрированный датчик обратной связи по положению, обеспечивающий повторяемость до 12 микрон. В линейные серводвигатели Dunkermotoren интегрированы линейные подшипники, обеспечивающие долгий срок службы изделия и не требующие дополнительной смазки и другого обслуживания. Серия линейных серводвигателей ServoTube может похвастать диапазоном развиваемых скоростей до 9,4 м/с и ускорений до 586 м/с². Актуаторы характеризуются классом защиты IP67 и развивают постоянное рабочее усилие от 7 до 276 Н при долговременных нагрузках. Все двигатели соответствуют промышленным стандартам, что позволяет провести их быстрое внедрение в уже работающие системы. Предлагается большое количество аксессуаров для интеграции актуаторов на базе линейных серводвигателей на замену пневмоцилиндров. Для комплектации с двигателями также предлагаются различные управляющие контроллеры от производителя двигателей.

Специальная версия защищенных линейных серводвигателей

Специальная серия серводвигателей Dunkermotoren представляет собой мехатронные изделия, реализующие работу в режиме актуатора.

Двигатели этой серии отличаются корпусом, выполненным из нержавеющей стали и характеризуются классом защиты IP69K. Водяное охлаждение двигателей этой серии позволяет развить усилие до 460 Н. В двигатель интегрирован энкодер с разрешением 10 мкм, что обеспечивает повторяемость 25 мкм. режиме актуатора (подвижный шток). Питание двигателя осуществляется от трех фаз, величина питающего напряжения может достигать 600 В. Благодаря этому возможно использование как управляющей электроники, предлагаемой Dunkermotoren, так и контроллеров от сторонних производителей.

Модули линейного движения



Рисунок 2.18 – Модули линейного движения Dunkermotoren

Модули линейного движения компании Dunkermotoren — это готовые к использованию и интеграции в создаваемые системы мехатронные решения. В основе модуля лежит линейный серводвигатель Dunkermotoren, оснащенный направляющей, концевыми выключателями, цепным шлейфом и другими сопутствующими компонентами. Опционально возможно оснащение модуля линейным энкодером с разрешением до 1 мкм для решения задач позиционирования с высокой точностью. Модули широко применяются в упаковочных машинах и других автоматических линиях.

Расчет требуемой мощности двигателя мехатронного модуля

Для мехатронного модуля поступательного движения требуемую мощность электродвигателя, Вт, определяют по формуле:

$$P = \frac{F_{A\Sigma} \times v_{\text{вых}}}{\eta} \times K_{\text{дин}}, \quad (2.1)$$

где $F_{A\Sigma}$ — усилие сопротивления на выходном звене мехатронного модуля, Н (суммарная осевая сила из проверочного расчёта ШВП по контактным напряжениям);

$v_{\text{вых}}$ — линейная скорость выходного звена мехатронного модуля, м/с;

η — коэффициент полезного действия мехатронного модуля (из расчёта геометрических параметров винта ШВП);

$K_{\text{дин}}$ – коэффициент запаса, учитывающий влияние динамических нагрузок в период разгона и торможения; $K_{\text{дин}}=1,1\dots1,3$.

Для мехатронного модуля вращательного движения требуемую мощность электродвигателя, Вт, определяют:

$$P = T_{\text{Н}} \frac{\omega_{\text{вых}}}{\eta} \times K_{\text{дин}}, \quad (2.2)$$

или

$$P = T_{\text{Н}} \frac{n_{\text{вых}}}{9,55 \times \eta} \times K_{\text{дин}}, \quad (2.3)$$

где

$T_{\text{Н}}$ – момент сопротивления на выходном звене мехатронного модуля, Н.м;

$\omega_{\text{вых}}$ – угловая скорость выходного звена мехатронного модуля, с⁻¹;

$n_{\text{вых}}$ – частота вращения выходного звена мехатронного модуля, об/мин.

2.3 Элементы пневматических систем

2.3.1 Производство и распределение сжатого воздуха

Подсистема энергоснабжения должна обеспечивать пневматическую систему сжатым воздухом определенного качества в достаточном количестве.

С помощью компрессора воздух сжимается и дальше передается в систему трубопроводов воздуха. Чтобы качество сжатого воздуха соответствовало установленному стандарту, он проходит через аппаратуру подготовки воздуха.

Как правило, пневмоэлементы выбираются на максимальное давление 800...1000 кПа (8...10 бар), однако на практике из экономических соображений рекомендуется работать с давлением 500...600 кПа (5...6 атм). Для того, чтобы обеспечить заданный уровень давления, с учетом потерь давления внутри системы распределения воздуха, компрессор должен выдавать воздух с давлением 650...700 кПа (6,5...7,0 бар).

Для снижения колебаний давления в системе должен устанавливаться аккумулятор сжатого воздуха. Компрессор наполняет аккумулятор сжатого воздуха, который также выполняет функции источника рабочей среды под давлением.

Блок подготовки воздуха обычно состоит из:

- фильтра сжатого воздуха (с влагоотделителем)
- регулятора давления.

Для обеспечения работы исполнительной части системы управления может использоваться маслораспылитель.

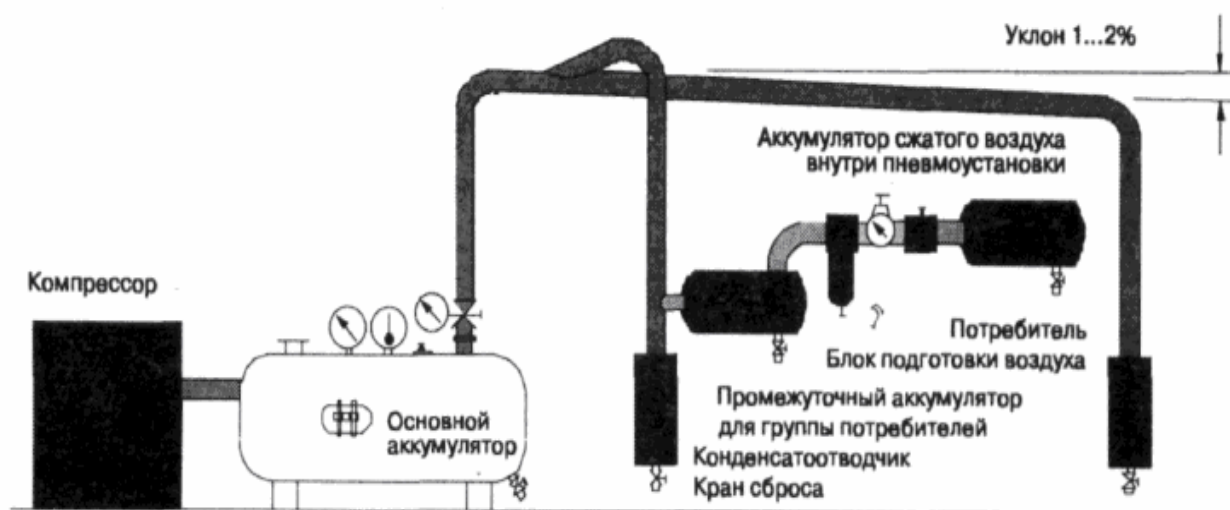


Рисунок 2.19 – Система подготовки воздуха

Выбор комбинации этих устройств, их размеров и конструкции определяется областью, применения и техническими требованиями к системе. Для того чтобы гарантировать нужное качество воздуха для каждой установки, блок подготовки воздуха устанавливается в каждую систему управления.

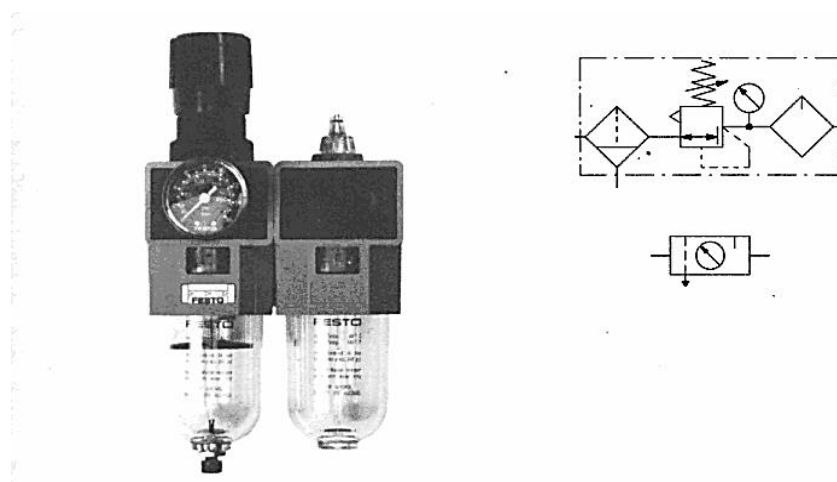


Рисунок 2.20 – Блок подготовки воздуха

Фильтр сжатого воздуха

Фильтр сжатого воздуха предназначен для удаления из сжатого воздуха твердых включений, а также конденсата. Воздух протекает через тангенциально размещенные в корпусе фильтра шлицевые отверстия. Здесь благодаря центробежным силам капли жидкости и крупные твердые частицы отделяются от потока воздуха и собираются в нижней части корпуса фильтра. Объем собранного конденсата не должен превышать максимально допустимого уровня, так как иначе конденсат будет снова вовлекаться в поток воздуха.

Регулятор давления

Регулятор давления предназначен для поддержания рабочего давления в системе (выходного давления) независимо от колебаний давления в линии питания (входного давления) и потребляемого расхода воздуха.

Маслораспылитель

Маслораспылитель предназначен для обогащения воздуха дозированным количеством масла, если это необходимо для функционирования пневматической установки.

2.3.2 Пневмоаппараты

Пневмоаппараты предназначены для управления давлением и расходом воздуха. В зависимости от назначения они подразделяются на следующие категории:

- распределители: информационные (входные) устройства, логико-вычислительные устройства и усилители мощности,
- обратные клапаны,
- регуляторы расхода,
- клапаны давления,
- запорные вентили.

Распределитель управляет процессом прохождения пневматического сигнала давления или расхода воздуха. Он запирает, открывает или изменяет направление движения сжатого воздуха.

Распределители различаются:

- по числу присоединенных линий: 2-линейные, 3-линейные, 4-линейные и т.д.;
- по числу позиций переключения: 2-позиционные, 3-позиционные и т.д.
- по способу приведения в движение: с мускульным управлением, с механическим управлением, с пневматическим управлением, с электрическим управлением;
- по способу возврата в исходное положение: с пружинным возвратом, с возвратом при помощи давления.

Например, входные устройства могут управляться с помощью роликового рычага для того, чтобы опрашивать положение штока поршня.

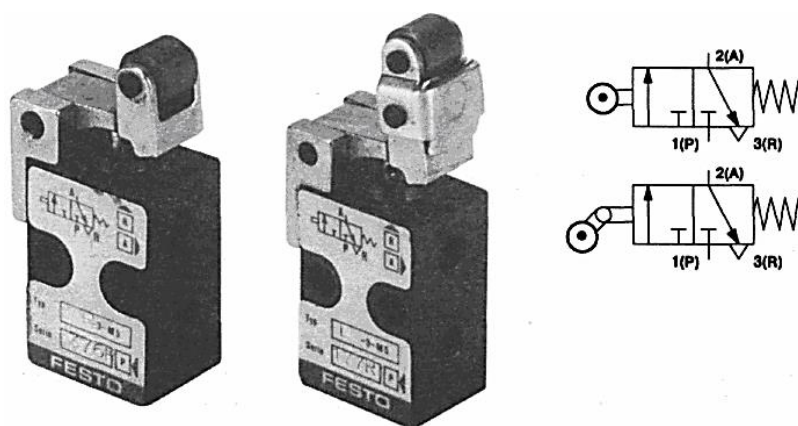


Рисунок 2.21 – 3/2-распределитель с роликовым рычагом, 3/2-распределитель с ломающимся роликовым рычагом

В качестве логико-вычислительного устройства распределитель используется, например, для выключения или включения выходного сигнала, которое осуществляется под действием входного сигнала.

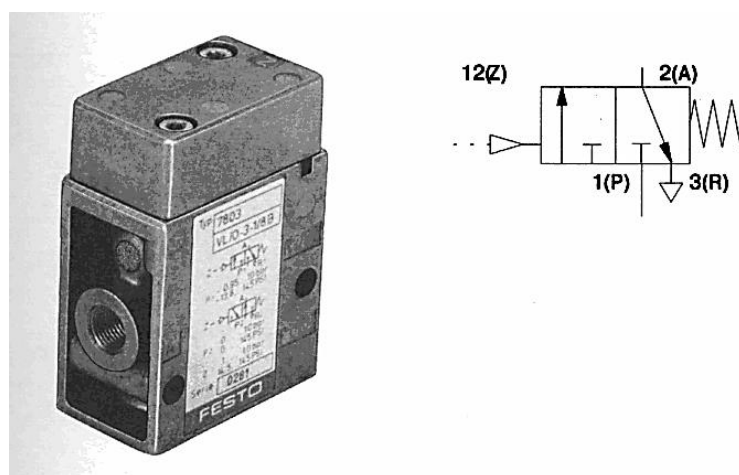


Рисунок 2.22 – Пневматический 3/2-распределитель с односторонним пневматическим управлением и пружинным возвратом

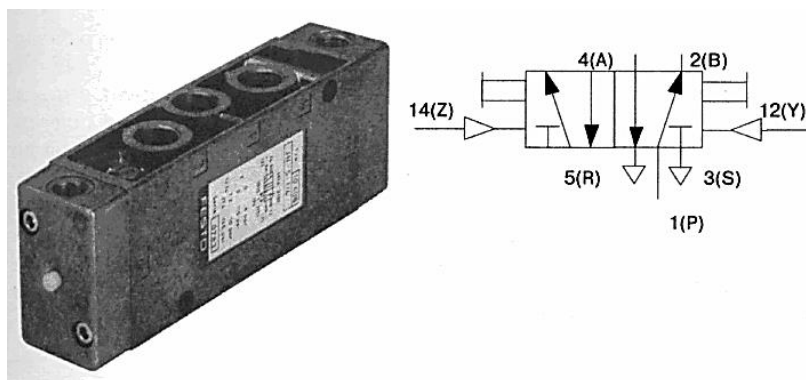


Рисунок 2.23 – Пневматический 5/2-распределитель с двусторонним пневматическим и вспомогательным ручным управлением

Обратный клапан

Обратный клапан обеспечивает прохождение воздуха только в одном направлении. Этот принцип находит применение, например, в клапанах быстрого выхлопа или логических элементах "ИЛИ". Обратный клапан как базовый элемент используется и в других типах клапанов.

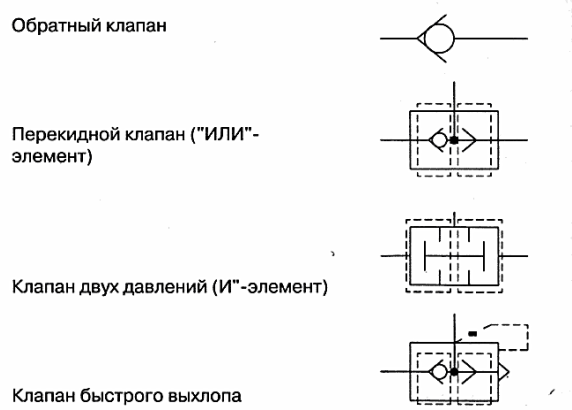


Рисунок 2.24 – Обратный клапан и другие клапаны, построенные на его базе

Регуляторы расхода

Регулятор расхода или дроссель запирает или дросселирует поток и тем самым управляет расходом сжатого воздуха. В идеальном случае можно регулировать дроссель бесступенчато: от полного открытия до

полного закрытия. Дроссель должен устанавливаться, по возможности, в непосредственной близости от исполнительного устройства и регулироваться по мере необходимости в ходе эксплуатации. Если параллельно с дросселем включить обратный клапан, тогда в одном из направлений будет ограничиваться расход воздуха, а в противоположном направлении расход будет максимальным.

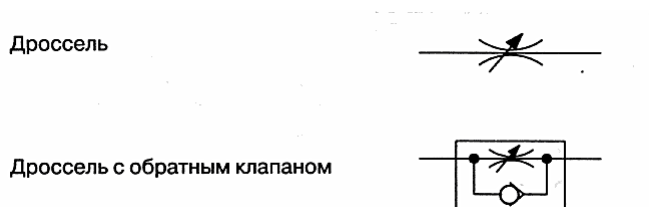


Рисунок 2.25 – Дроссели

Клапаны давления

Различают три типа клапанов давления:

- предохранительные клапаны,
- редукционные клапаны,
- клапаны последовательности давления (реле давления).

Предохранительные клапаны устанавливаются в напорной магистрали компрессора, обеспечивая безопасность его работы. При этом на заданном уровне безопасности ограничивается давление в аккумуляторе сжатого воздуха и поддерживается необходимое значение давления питания пневмосети.

Редукционный клапан поддерживает давление питания пневмосистемы на постоянном уровне независимо от колебания давления в сети, т.е. в напорной магистрали компрессора.

Клапан последовательности (реле давления) вырабатывает релейный сигнал на своем выходе, если давление на его входе достигает определенного уровня (уровня давления настройки).

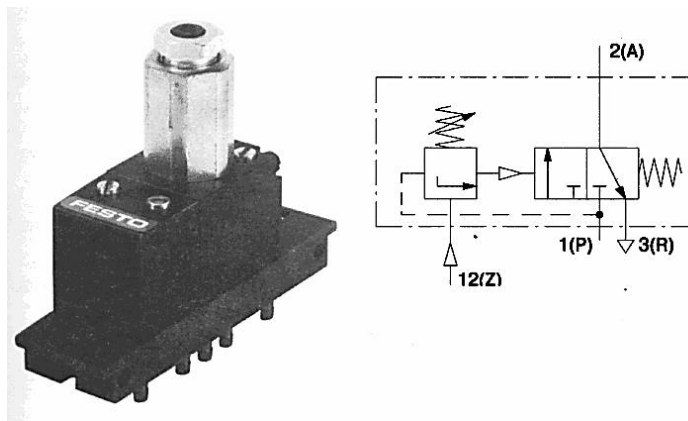


Рисунок 2.26 – Клапан последовательности (реле давления)

Если давление управления достигнет заданного уровня, то в реле давления, переключится 3/2-распределитель. Если давление управления станет ниже давления настройки, то 3/2-распределитель переключится в исходное состояние.

Пневматические модули

При сочетании различных элементов можно получить устройства с новыми функциями управления. В качестве примера можно привести клапан выдержки времени. Комбинация из дросселя с обратным клапаном, пневмоемкости и 3/2-распределителя позволяет реализовать функцию выдержки времени (реле времени).

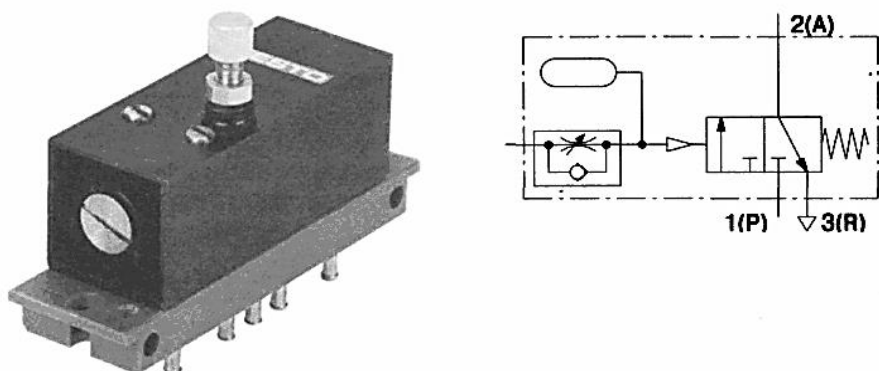


Рисунок 2.27 – Клапан выдержки времени

В зависимости от настройки дроссельного винта в емкость поступает больший или меньший расход воздуха. После достижения необходимого давления срабатывания 3/2-распределитель включается на проход воздуха. Он остается в этом положении до тех пор, пока действует сигнал управления.

К другим модулям, в состав которых входит несколько клапанов относятся, например:

- устройства управления с двумя входами,
- задатчики тактов,
- тактовые цепочки,
- устройства памяти.

2.3.3 Логико-вычислительные элементы (Процессоры)

Для логической обработки выходного сигнала информационных элементов используются различные релейные элементы, например:

- логический "И"- элемент,
- логический "ИЛИ"-элемент.

Логический элемент "ИЛИ" может реализовать "ИЛИ"-функцию двух входных сигналов. "ИЛИ"-элемент имеет два входа и один выход. Выходной сигнал появляется тогда и только тогда, когда имеется давление хотя бы на одном входе.

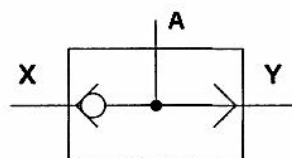
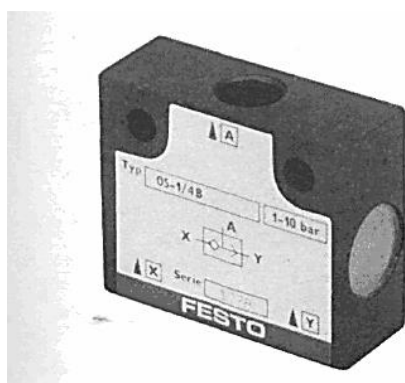


Рисунок 2.28 – Логический "ИЛИ"-элемент

2.3.4 Исполнительные устройства

Энергетическая часть системы содержит управляющий распределитель (усилитель мощности) и исполнительное устройство. В группу исполнительных устройств входят приводы, реализующие поступательное и вращательное движение выходного звена. Исполнительные устройства управляются от усилителя мощности, который подает необходимый для совершения работы воздух. Обычно управляющий распределитель (усилитель мощности) устанавливается на главной магистрали питания воздухом для того, чтобы потери энергии были минимальными.

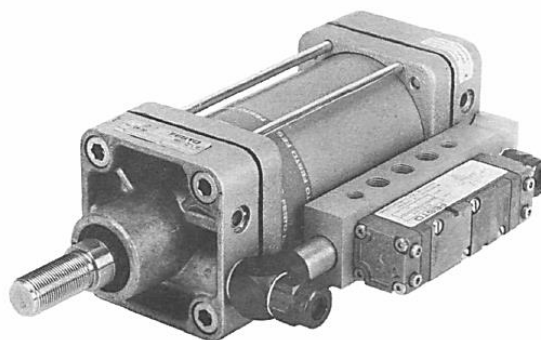


Рисунок 2.29 – Исполнительное устройство с управляющим распределителем

Исполнительные устройства можно разделить на группы:

- приводы поступательного движения (линейные приводы)
 - цилиндры одностороннего действия,
 - цилиндры двустороннего действия;
- приводы вращательного движения (ротационные приводы)
 - пневмомоторы,
 - поворотные приводы.



Рисунок 2.30 – Линейный и поворотный цилиндры

2.4 Управляемые приводы и их настройка. Структура управляемых приводов мехатронных систем

Привод, как известно, включает, прежде всего, двигатель и устройство управления им. Кроме того, в состав привода могут входить различные механизмы для передачи и преобразования движения (редукторы, преобразователи вращательного движения в поступательное и наоборот), тормоз и муфта.

К приводам, применяемым в МС, предъявляют весьма жесткие специфические требования. В связи с необходимостью встраивания приводов в рабочие органы МС — в манипуляторы и системы передвижения — габариты и масса приводов должны быть минимальными. Приводы в МС работают в основном в неуставившихся режимах и с переменной нагрузкой. При этом переходные процессы в них должны быть практически неколебательными. Важными параметрами приводов МС являются также надежность, стоимость, удобство эксплуатации. Требования, предъявляемые к их способу управления, быстродействию и точности, непосредственно определяются соответствующими требованиями к МС в целом. В частности, обычно требуется, чтобы скорость поступательного движения на выходе приводов МС в среднем составляла от долей до нескольких м/с при погрешности отработки перемещения, равной долям миллиметра.

В МС нашли применение практически все известные типы приводов: электрические, гидравлические и пневматические; с поступательным и

вращательным движением; регулируемые (по положению и скорости) и нерегулируемые; замкнутые (с обратной связью) и разомкнутые; непрерывного и дискретного действия (в том числе шаговые).

На рисунке приведена типовая схема привода манипулятора. Наряду с общей обратной связью по положению в схеме имеется обратная связь по скорости, которая играет роль корректирующей гибкой обратной связи и часто, кроме того, служит для управления скоростью. В тех случаях, когда механизм M является редуктором и понижает скорость, датчик скорости ставится не как показано на рисунке, а на выходе двигателя перед механизмом, чтобы увеличить снимаемый с датчика сигнал по скорости. Устройство управления может быть непрерывного действия, релейным, импульсивным или цифровым.

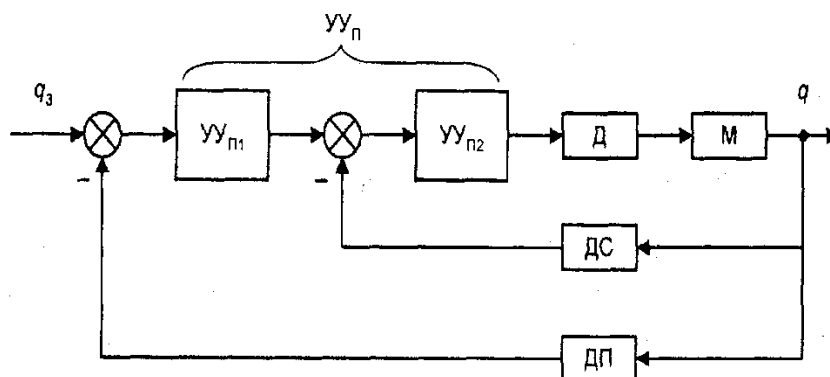


Рисунок 2.31 – Типовая схема позиционного привода манипуляторов:

Д — двигатель; М — механизм передачи и преобразования перемещения;
ДП, ДС — датчики положения и скорости;
УУП1, УУП2 — составные части устройства управления УУП

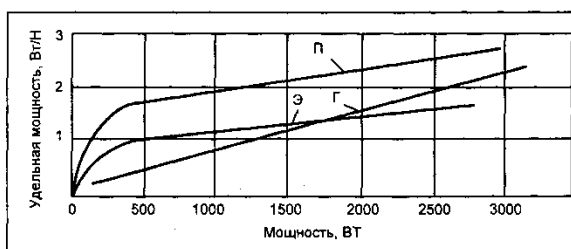
Применение пневматических приводов в МС объясняется их дешевизной, простотой и соответственно надежностью. Правда, эти приводы плохо управляемы и поэтому используются в основном как нерегулируемые с цикловым управлением. Пневматические приводы применяют только в роботах небольшой грузоподъемности — до 10 кг, реже 20 кг.

Гидравлические приводы наиболее сложны и дороги по сравнению с пневматическими и электрическими. Однако при мощности 500—1000 Вт и выше они обладают наилучшими массогабаритными характеристиками и

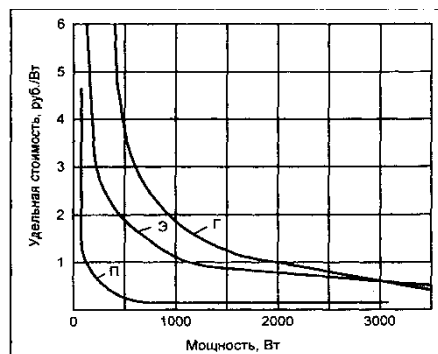
поэтому являются основным типом привода для тяжелых и сверхтяжелых МС. Гидравлические приводы хорошо управляются, поэтому они нашли также применение в МС средней грузоподъемности, для которых требуются высококачественные динамические характеристики.

Электрический привод, несмотря на его хорошую управляемость, простоту подвода энергии, большой к.п.д. и удобство эксплуатации имеет худшие массогабаритные характеристики, чем пневматический и гидравлический приводы. Прогрессивное увеличение в последние годы доли электромеханических МС в общем парке мехатронных устройств в мире вызвано быстрым прогрессом в создании новых типов электрических двигателей, изначально предназначенных для роботов и позволяющих создавать более компактные комплектные приводы всех требуемых типов. На сегодня основная область применения электрических приводов в мехатронике — это устройства средней грузоподъемности (десятки килограмм), легкие МС с высококачественным управлением и мобильные роботы.

Для иллюстрации сказанного на рисунках ниже приведены обобщенные сравнительные характеристики различных типов приводов по удельной мощности и стоимости. При расчете удельной мощности пневмоприводов учитывалась масса аппаратуры подготовки воздуха, гидроприводов — масса гидростанции, которые входят в конструкцию МС.



Удельная мощность (отнесенная к весу) электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов в зависимости от их абсолютной мощности



Удельная стоимость электрических (Э), гидравлических (Г) и пневматических (П) приводов в зависимости от их мощности

2.5 Виды датчиков, используемых в мехатронных системах

2.5.1 Датчики перемещений

2.5.1.1 Потенциометрический датчик представляет собой переменный резистор, к которому приложено питающее напряжение, его входной величиной является линейное или угловое перемещение токосъемного контакта, а выходной величиной – напряжение, снимаемое с этого контакта, изменяющееся по величине при изменении его положения.

Потенциометрические датчики предназначены для преобразования линейных или угловых перемещений в электрический сигнал, а также для воспроизведения простейших функциональных зависимостей в автоматических и автоматических устройствах непрерывного типа.

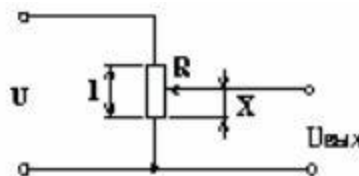


Рисунок 2.32 – Потенциометрический датчик

По способу выполнения сопротивления **потенциометрические датчики** делятся на:

- ламельные с постоянными сопротивлениями;
- проволочные с непрерывной намоткой;
- с резистивным слоем.

Ламельные потенциометрические датчики использовались для проведения относительно грубых измерений в силу определенных конструктивных недостатков.

В таких датчиках постоянные резисторы, подобранные по номиналу специальным образом, припаиваются к ламелям.

Ламель представляет собой конструкцию с чередующимися проводящими и непроводящими элементами, по которой скользит токосъемный контакт. При движении токосъемника от одного проводящего элемента к другому суммарное сопротивление подключенных к нему резисторов меняется на величину соответствующую номиналу одного сопротивления. Изменение сопротивлений может происходить в широких пределах. Погрешность измерений определяется размерами контактных площадок.

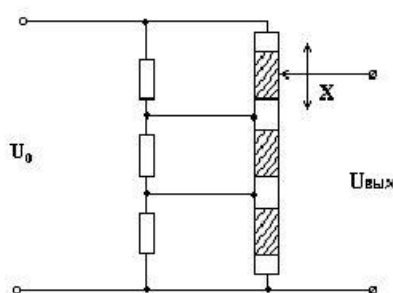


Рисунок 2.33 – Ламельный потенциометрический датчик

Проволочные потенциометрические датчики предназначены для более точных измерений. Как правило, их конструкции представляют собой каркас из гетинакса, текстолита или керамики, на который в один слой, виток к витку намотана тонкая проволока, по зачищенной поверхности которой скользит токосъемник.

Диаметр проволоки определяет класс точности потенциометрического датчика (высокий-0,03-0,1 мм, низкий 0,1-0,4 мм). Материалы провода: манганин, фехраль, сплавы на основе благородных металлов. Токосъемник выполнен из более мягкого материала, чтобы исключить перетирание провода.

Преимущества потенциометрических датчиков:

- простота конструкции;
- малые габариты и вес;

- высокая степень линейности статических характеристик;
- стабильность характеристик;
- возможность работы на переменном и постоянном токе.

Недостатки потенциометрических датчиков:

- **наличие скользящего контакта, который может стать причиной отказов из-за окисления контактной дорожки, перетирания витков или отгибание ползунка;**
- погрешность в работе за счет нагрузки;
- сравнительно небольшой коэффициент преобразования;
- высокий порог чувствительности;
- наличие шумов;

подверженность электроэрозии под действием импульсных разрядов.

2.5.1.2 Индуктивные датчики

Индуктивный датчик — это преобразователь параметрического типа, принцип действия которого основан на изменении индуктивности L либо взаимоиндуктивности обмотки с сердечником, вследствие конфигурации магнитного сопротивления RM магнитной цепи датчика, в которую заходит сердечник.



Рисунок 2.34 – Индуктивный датчик

Обширное применение индуктивные датчики находят в промышленности для измерения перемещений и покрывают спектр от 1 мкм до 20 мм. Также можно использовать индуктивный датчик для измерения давлений, сил, уровней расхода газа и воды и т. д. В данном случае измеряемый параметр при помощи разных чувствительных частей преобразуется в изменение перемещения и потом данная величина подводится к индуктивному измерительному преобразователю.

В случае измерения давлений, чувствительные элементы могут производиться в виде упругих мембран, сильфонов, и т. д. Употребляются они и в качестве датчиков приближения, которые служат для обнаружения разных железных и немагнитических объектов бесконтактным методом по принципу “да” либо “нет”.

Типы индуктивных преобразователей и их конструктивные особенности

По схеме построения индуктивные датчики можно поделить на одинарные и дифференциальные. Одинарный индуктивный датчик содержит одну измерительную ветвь, дифференциальный – две.

Разглядим, к примеру, одинарный индуктивный датчик. В базу его работы положено свойство дросселя с воздушным зазором изменять свою индуктивность при изменении величины зазора.

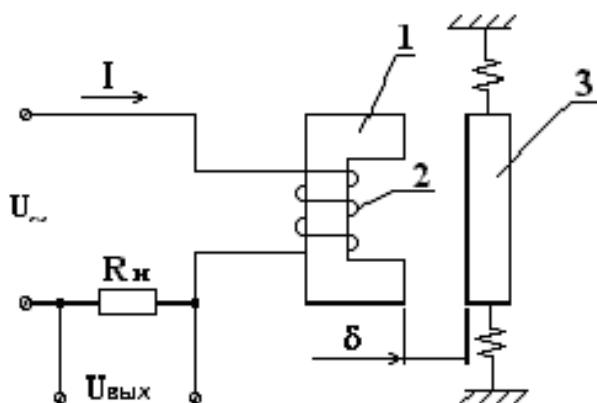


Рисунок 2.35 – Дроссель с воздушным зазором

Индуктивный датчик состоит из ярма 1, обмотки 2, якоря 3- удерживается пружинами. На обмотку 2 через сопротивление нагрузки R_H подается напряжение питания переменного тока.

Каждому значению δ соответствует определенное значение I , создающего падение напряжения на сопротивлении R_H : $U_{\text{вых}} = IR_H$ — представляет собой выходной сигнал датчика.

Дифференциальные (реверсивные) индуктивные датчики (ДИД)

Дифференциальные индуктивные датчики представляет собой совокупу 2-ух нереверсивных датчиков и производятся в виде системы, состоящей из 2-ух магнитопроводов с общим якорем и 2-мя катушками. Для дифференциальных индуктивных датчиков нужны два отдельных источника питания, зачем обычно употребляется разделительный трансформатор 5.

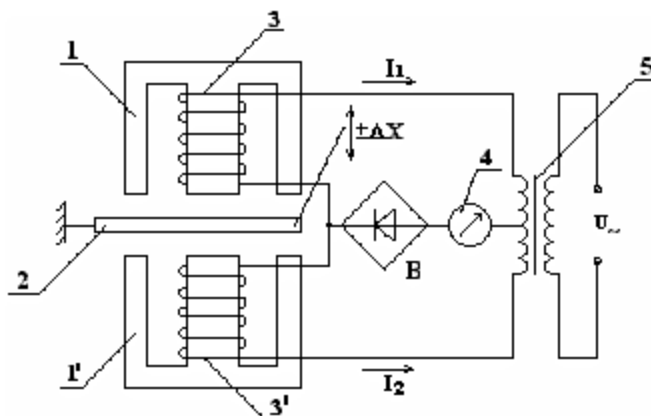


Рисунок 2.36 – Дифференциальный индуктивный датчик

По форме магнитопровода могут быть дифференциально-индуктивные датчики с магнитопроводом Ш-образной формы, набранные из мостов электротехнической стали (при частотах выше 1000Гц используются железоникелевые сплавы — пермоллой), и цилиндрические со сплошным магнитопроводом круглого сечения. Выбор формы датчика находится в зависимости от конструктивного сочетания его с контролируемым устройством. Применение Ш-образного магнитопровода обосновано удобством сборки катушки и уменьшением габаритов датчика.

Для питания дифференциально-индуктивного датчика употребляют трансформатор 5 с выводом средней точки на вторичной обмотке. Между ним и общим концом обеих катушек врубается прибор 4. Зазор 0,2-0,5 мм.

При среднем положении якоря, когда зазоры схожи, индуктивные сопротивления катушек 3 и 3' схожи как следует величины токов в катушках равны $I_1=I_2$ и результирующий ток в приборе равен 0.

При маленьком отклонении якоря в ту либо иную сторону под действием контролируемой величины X изменяются величины зазоров и индуктивностей, прибор регистрирует разностный ток I_1-I_2 , он является функцией смещения якоря от среднего положения. Разность токов обычно регулируется при помощи магнитоэлектрического прибора 4 (микроамперметра) с выпрямительной схемой В на входе.

Достоинства индуктивных датчиков:

- простота и крепкость конструкции, отсутствие скользящих контактов;
- возможность подключения к источникам промышленной частоты;
- относительно большая выходная мощность (до 10-ов Ватт);
- значимая чувствительность.

Недостатки индуктивных датчиков:

- точность работы находится в зависимости от стабильности питающего напряжения по частоте;
- вероятна работа лишь на переменном токе.

2.5.1.3 Индукционные датчики

Индукционные датчики предназначены для преобразования скорости линейных и угловых перемещений в ЭДС. Они относятся к датчикам генераторного типа. Принцип действия индукционных датчиков основан на законе электромагнитной индукции. Выходным сигналом индукционных датчиков является ЭДС, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки катушки. Это изменение происходит за счет перемещения катушки в постоянном магнитном поле

или за счет вращения ферромагнитного индуктора относительно неподвижной катушки.



Рисунок 2.37 – Индукционный датчик

Основным отличием индукционных датчиков от индуктивных является то, что в них используется постоянное магнитное поле, а не переменное (питание индуктивных датчиков осуществляется от сети переменного тока). Постоянное магнитное поле в индукционных датчиках создается двумя способами: постоянными магнитами или катушкой, обтекаемой постоянным током.

На рисунке 2.38,а показана схема датчика с обмоткой W_2 , размещенной в воздушном зазоре, в котором постоянный магнитный поток Φ создается катушкой W_1 , включенной на постоянное напряжение. При перемещении катушки в магнитном поле в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения: где k - коэффициент пропорциональности, зависящий от числа витков W_2 и конструктивных параметров датчика.

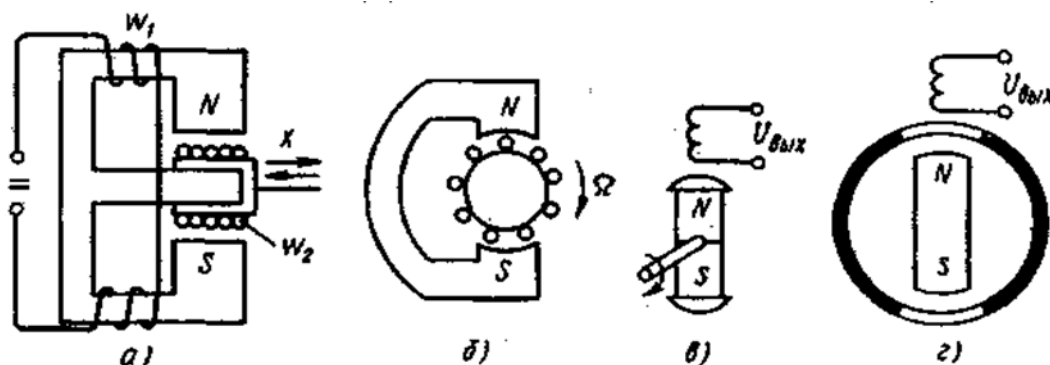


Рисунок 2.38 – Схемы индукционных датчиков

На рисунке 2.38,б показан датчик, в котором постоянный магнитный поток создается с помощью постоянного магнита с полюсными наконечниками. ЭДС, индуцируемая во вращающейся катушке, пропорциональна скорости вращения Ω .

В обоих этих датчиках катушки подвижны, поэтому для отвода от них выходного сигнала (ЭДС) необходимы гибкие токоподводы или контактные кольца со щетками.

Индукционный датчик может быть выполнен и другой конструкции: с неподвижной катушкой и вращающимся постоянным магнитом (рис. 2.38,в). Надежность при этом повышается за счет отсутствия скользящего контакта. Возможен и другой способ повышения надежности датчика по схеме рис. 2.38,б: и катушка, и постоянный магнит неподвижны, а в зазоре между ними вращается ферромагнитное кольцо с вырезами (рис. 2.38,г) или иной элемент, имеющий существенно разную магнитную проводимость по взаимно перпендикулярным осям. При вращении изменяется поток, пронизывающий плоскость катушки.

Достоинства индукционных датчиков:

- высокая чувствительность и мощность выходного сигнала
- используется постоянное магнитное поле

Недостатки индукционных датчиков:

- зависимость выходного сигнала от сопротивления нагрузки.

2.5.1.4 Емкостные датчики

Емкостным датчиком называют преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкостного сопротивления.

Принцип действия емкостных измерительных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора под воздействием входной преобразуемой величины. На емкость конденсатора можно влиять изменением площади перекрытия пластин S , расстояния между ними δ ,

диэлектрической проницаемости ϵ вещества, находящегося в зазоре между обкладками конденсатора. Выбор того или иного изменяемого параметра зависит от характера измеряемой величины.



Рисунок 2.39 – Емкостные датчики

Емкостные преобразователи используют для измерения угловых и линейных перемещений, линейных размеров, уровня, усилий, влажности, концентрации и др. Конструктивно они могут быть выполнены с плоскопараллельными, цилиндрическими, штыревыми электродами, с диэлектриком между пластинами и без него.

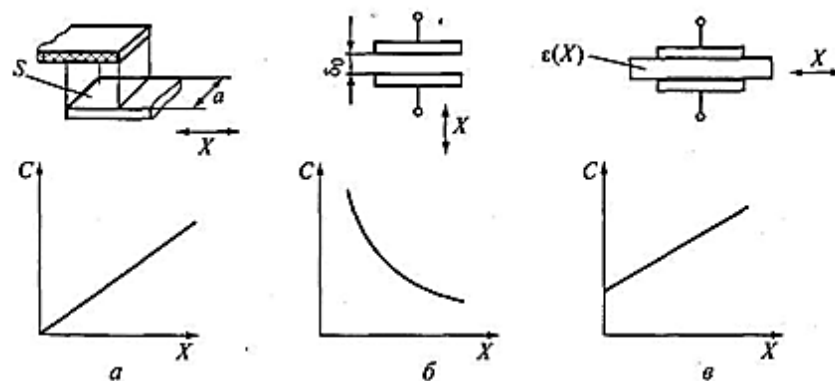


Рисунок 2.40 – Схемы и характеристики емкостных датчиков с различными изменяемыми параметрами:

а – площади перекрытия пластин; б – расстояния между пластинами;
в – диэлектрической проницаемости вещества в зазоре

Емкостные преобразователи перемещения с переменной площадью перекрытия используют и для измерения угловых величин.

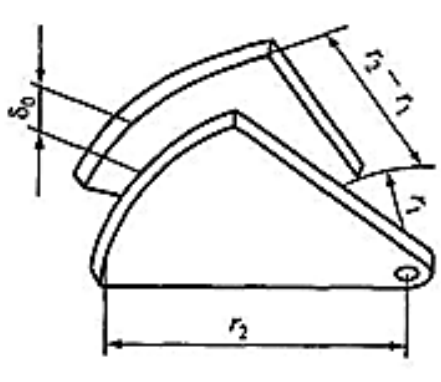


Рисунок 2.41 – Емкостной датчик для измерения угловых величин

В связи с нелинейностью статической характеристики такие датчики применяют для измерения относительно малых перемещений, обычно не более $0,1\delta_0$.

Преобразователи с изменяемой диэлектрической проницаемостью среды между электродами широко используют для измерения уровня жидких и сыпучих веществ, анализа состава и концентрации веществ в химической, нефтеперерабатывающей и других областях промышленности, для счета изделий, охранной сигнализации и т.п. Они имеют линейную статическую характеристику.

Емкостные датчики также находят применение в различных отраслях промышленности для измерения абсолютного и избыточного давления, толщины диэлектрических материалов, влажности воздуха, деформации, угловых и линейных ускорений и др.

Для повышения чувствительности и линейности характеристик используют дифференциальные преобразователи, у которых изменение состояния контролируемой величины приводит к изменению емкости одновременно двух чувствительных элементов, включаемых в разные плечи мостовой измерительной схемы. В этом случае получают реверсивную (двухтактную) статическую характеристику. При изменении направления

перемещения подвижного элемента выходной сигнал преобразователя изменяет свою фазу на 180° по отношению к фазе напряжения питания датчика, являющегося опорным напряжением.

Погрешности емкостных преобразователей в основном определяются влиянием температуры и влажности на геометрические размеры и диэлектрическую проницаемость среды. Уменьшить погрешности можно, используя конструкционные материалы с малым температурным коэффициентом линейного расширения, или с помощью герметизации датчиков.

Достоинства емкостных датчиков:

- простота конструкции
- малые размеры и масса
- высокая
- отсутствие подвижных токосъемных контактов
- высокое быстродействие

Недостатки емкостных датчиков

- состоят в относительно низком уровне выходной мощности сигналов
- высокие требования к экранировке деталей

2.5.1.5 Фотоэлектрические датчики

Фотоэлектрические датчики (фотодатчики) используются в автоматике для преобразования в электрический сигнал различных неэлектрических величин: механических перемещений, скорости размеров движущихся деталей, температуры, освещенности, прозрачности жидкой или газовой среды и т. д.

По принципу кодирования информации фотодатчики можно разделить на две группы: с амплитудной модуляцией светового потока и с временной или частотной модуляцией. У датчиков с амплитудной

модуляцией значение фототока пропорционально световому потоку, зависящему от управляемой (контролируемой) неэлектрической величины. У датчиков с временной или частотной модуляцией фототок изменяется дискретно за счет полного или частичного прерывания светового потока от воздействия неэлектрической величины. Информация об управляемом (контролируемом) параметре кодируется в этих датчиках в виде числа, частоты или длительности импульсов фототока.



Рисунок 2.42 – Фотоэлектрические датчики

Фотодатчик в общем случае состоит из фотоэлектрического чувствительного элемента (фотоэлемента) источника света и оптической системы. В некоторых случаях фотодатчики используют световое излучение объекта управления (контроля) и не содержат источника света (датчики астрономического компаса, температуры, освещенности и др.). Некоторые датчики с целью упрощения конструкции могут не содержать оптической системы.

В большинстве фотодатчиков преобразование входной неэлектрической величины в электрический сигнал осуществляется в два этапа: сначала происходит ее преобразование в изменение одного из

параметров светового потока (силы света, освещенности, спектрального состава и т. п.), а затем это изменение преобразуется фотоэлементом в электрическую величину (фототок, падение напряжения, фото-ЭДС и т. д.).



Рисунок 2.43 – Фотодиоды

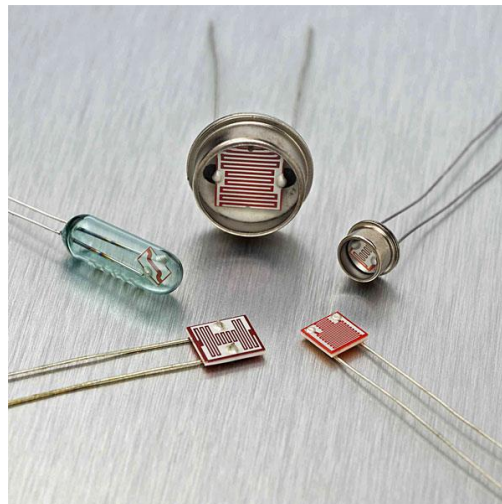


Рисунок 2.44 – Фоторезисторы

Фотодиоды широко применяются в фотодатчиках различного типа. Они имеют линейную световую характеристику, высокую чувствительность, малую инерционность (частота прерывания светового потока может быть до нескольких килогерц), малые габариты. В зависимости от схемы включения различают вентильный и фотодиодный режимы работы фотодиодов.

В *вентильном режиме* фотодиод является генератором фототока и не нуждается в источнике питания. Фототриод в вентильном режиме можно рассматривать как комбинированный электронный прибор — фотодиод (n - p -переход цепи база — эмиттер) и собственно триод, усиливающий фототок, который возникает в цепи база — эмиттер под действием светового потока. База фототриода в этом режиме замыкается накоротко с эмиттером. В вентильном режиме фотодиоды и фототриоды используются в фотодатчиках с пропорциональной световой характеристикой (измерение размеров, перемещений, температуры и т. д.).

В *фотодиодном режиме* к фотодиоду нужно приложить в обратном запирающем направлении внешнее напряжение. У фототриодов в

фототриодном режиме в цепь базы подается напряжение смещения от внешнего источника. Фотодиодный (фототриодный) режим включения фотодиодов (фототриодов) используется в основном в фотодатчиках с дискретной световой характеристикой (фотосчитывающие устройства с перфолент, перфокарт, фотоэлектрические преобразователи «угол—код», читающие автоматы и т. д.). В фотодиодном (фототриодном) режиме фотодиоды и фототриоды имеют большую чувствительность, чем в вентильном (выходным сигналом в этом режиме является напряжение).

Фоторезисторы находят широкое применение, причем в основном в фотодатчиках с дискретной световой характеристикой.

Достоинством фоторезисторов является высокая чувствительность, стабильность параметров, большая надежность и долговечность, возможность работы, как на постоянном, так и на переменном токе, малые габариты. К их недостаткам следует отнести большую инерционность, сильное влияние окружающей температуры, нелинейность световой характеристики, большой разброс параметров у фоторезисторов одной партии.

В качестве источников световой энергии в некоторых фотодатчиках используется сам ОУ (при измерении температуры, освещенности и т.п.). Большинство же фотодатчиков нуждается в искусственном источнике светового потока. Наибольшее распространение в качестве такого источника в фотодатчиках получили недорогие и простые в эксплуатации лампы накаливания. С целью повышения их надежности и долговечности рабочее напряжение снижают на 20—30 % по сравнению с номинальным.

Для работы в инфракрасной области спектра применяют специальные излучатели в виде штифтов из жаропрочных полупроводниковых материалов. Менее распространены в фотодатчиках газоразрядные лампы. Они имеют высокую светоотдачу и потребляют при этом в 2—3 раза меньше энергии, чем лампы накаливания. Однако номенклатура этих ламп ограничена, габариты их больше, чем ламп накаливания.

Оптические системы фотодатчиков служат для перераспределения в пространстве потока лучистой энергии с целью повышения эффективности воздействия объектов управления (контроля) на параметры лучистого потока. Функции оптических систем фотодатчиков весьма разнообразны и требуют применения самых различных линз, зеркал, призм, диафрагм, дифракционных решеток, светофильтров и т. д.

С целью повышения помехоустойчивости в некоторых фотодатчиках размещается предварительный усилитель выходного сигнала фотоэлемента. Для этой цели в настоящее время в основном используют микроэлектронные операционные усилители.

Достоинства фотодатчиков

- универсальность
- отсутствие обратного воздействия на объект управления (контроля) — бесконтактность

Недостатки фотодатчиков

- чувствительность к вибрациям, ударам
- плохая работа в запыленной, загазованной и влажной среде
- помехи от осветительных приборов общего освещения

2.5.1.6 Электроконтактные датчики



Рисунок 2.45 – Электроконтактные датчики

Контактные датчики — это датчики параметрического типа, в которых изменяется электрическое сопротивление при изменении той или иной механической величины. Они предназначены для преобразования механического перемещения в электрический сигнал. При достижении измеряемой величиной определенного значения замыкаются или размыкаются электрические контакты, включенные в те или иные цепи, которые сигнализируют, что перемещение больше или меньше определенного значения.

Контактные датчики широко применяются в системах автоматического контроля и сортировки размеров, а также в системах автоматической сигнализации различных физических величин. Статическая характеристика контактного датчика имеет релейный характер, так как его выходная величина — сопротивление электрической цепи — изменяется скачком.

На рис. 2.46,а изображен простейший контактный датчик с одной парой контактов — однопредельный. Замыкание контактов 1 и 2 происходит в результате изменения размера изделия И. Если размер изделия И увеличивается, то измерительный щуп 3 перемещается вверх, в результате чего контакты 1 и 2 приходят в соприкосновение. При этом активное сопротивление между контактами 1 и 2 изменяется от бесконечности до ничтожно малого значения, определяемого контактным сопротивлением. Выводы датчика подключаются к сигнальному устройству. Пружина 4 соединяет измерительный щуп 3 с одним из выводов. На рис. 2.46,б изображен двухпредельный контактный датчик — с двумя парами контактов, способный реагировать на перемещение щупа в обе стороны от начального (нулевого) положения. Подобные датчики широко используются для автоматического контроля размеров деталей и подсчета количества выпускаемой продукции.

Многопредельный контактный датчик с несколькими парами контактов показан на рис. 2.46,в. Его контакты 1, 2' и 3' замыкаются последовательно

друг за другом в зависимости от размеров деталей. Стрелка измерительного прибора, включенного на выходе датчика, показывает три размера.

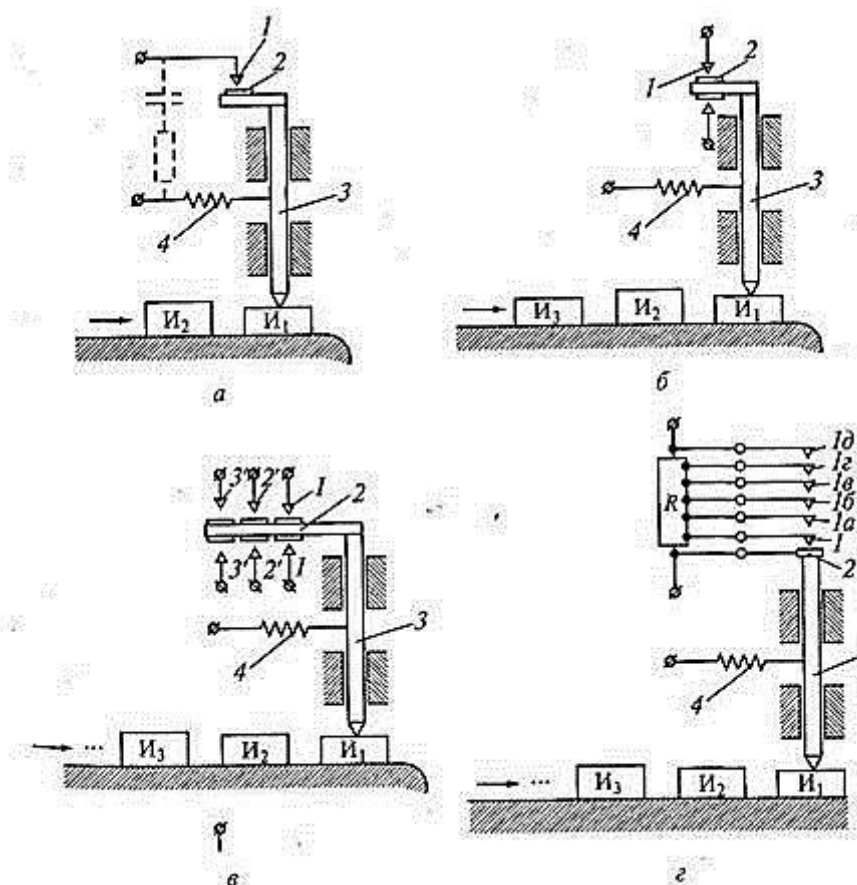


Рисунок 2.46 – Принцип работы электроконтактных датчиков

Иногда контактные датчики могут работать либо на замыкание (размыкание) всей цепи, либо на замыкание части одного из сопротивлений R резистора цепи (рис. 2.46,г).

2.5.1.7 Путьевые и конечные переключатели

Для автоматического управления движениями исполнительных двигателей гидравлических и пневматических приводов широкое применение находят путьевые и конечные выключатели (переключатели). Они обеспечивают получение информации о положении исполнительных узлов любой машины путем выдачи командного сигнала при достижении рабочим узлом машины необходимого положения.



Рисунок 2.47 – Путевые и конечные переключатели

В зависимости от вида энергии, используемой системой управления, путевые выключатели выдают сигнал о местоположении рабочего органа в виде электрического, либо пневматического, либо другого рода энергии.

Путевые переключатели (выключатели) дают информацию о достижении отдельных участков пути, а конечные выключатели - о достижении конечного положения рабочего органа.

На рис. 2.48 показаны путевые переключатели, выдающие команду в виде электрического сигнала. Это, по сути, контактные переключатели, обеспечивающие замыкание одних и размыкание других электроконтактов.

В зависимости от скорости переключения контактов путевые выключатели могут быть простыми и моментными. На рис. 2.48,а представлен простой конечный выключатель. На плите 12, изготовленной из диэлектрика, размещены неподвижные контакты 1, 5, 9, 13 и шток 7 (тоже изготовленный из диэлектрика) с перемычкой 3, на которой размещены подвижные контакты 2, 4, 10, 11. Шток 7 нагружен пружинами 14, 8 и 6, которые обеспечивают замыкание контактов 4–5 и 9–10. В корпусе этого устройства

(на рис. 2.48, *а* не показан) имеется штифт, который расположен соосно со штоком 7. Движущийся узел наезжает на штифт, который смещает шток влево. Вследствие этого контакты 4–5 и 9–10 размыкаются, а контакты 1–2 и 11–13 замыкаются. Конечный выключатель тем самым выдает сигнал, который можно использовать для останова или реверса двигателя. Как только узел отходит от конечного выключателя, пружины возвращают шток вправо и восстанавливают первоначальное состояние контактов.

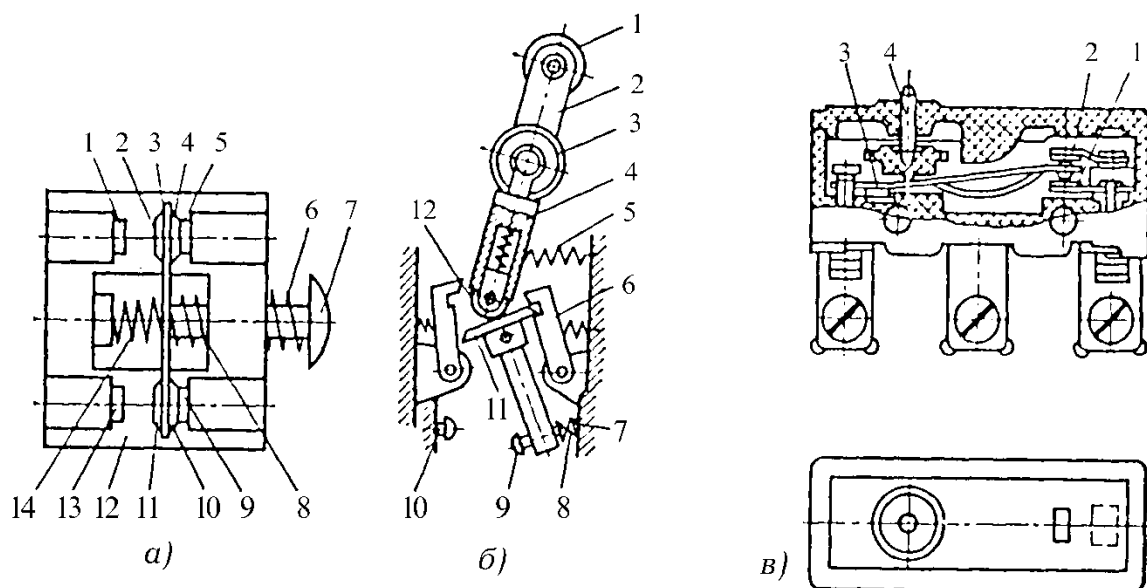


Рисунок 2.48 – Путевые и конечные выключатели:

а - простой электрический конечный выключатель, *б* - моментный электрический
путевой выключатель, *в* – микропереключатель

Для простых конечных выключателей контактного типа скорость перемещения штока должна быть более 0,4 м/мин, чтобы избежать длительного искрения контактов (возникновение электрической дуги при размыкании контактов) и их быстрого разрушения.

Для скоростей движения меньше указанной величины применяют моментный путевой переключатель (рис. 2.48, *б*). Он работает следующим образом. Движущийся орган машины наезжает на ролик 1 и поворачивает рычаг 2 влево. Вместе с ним поворачивается и поводок 4, который роликом 12 отводит защелку 6 и тоже поворачивает планку 11. При этом контакты 7–8 размыкаются, а контакты 9–10 замыкаются с большой скоростью, что

уменьшает вероятность возникновения длительных электрических дуг. Благодаря плоским пружинам 3 в форме кольца, связывающим рычаг 2 и поводок 4, поворот ролика 1 может быть выше необходимого переключения угла поворота. Возвращается выключатель в исходное положение пружиной 5 при прекращении воздействия движущегося узла на ролик 1.

С целью получения высокой точности срабатывания в качестве путевого выключателя могут использоваться микропереключатели (рис. 2.48,в). Если нажать на штифт 4, то правый конец пружинного контакта 3 отходит от верхнего неподвижного контакта 2 и замыкается с нижним неподвижным контактом 1. Пружинный контакт 3 имеет такую форму, которая обеспечивает срабатывание микропереключателя лишь при достижении силы на штифте 4 более определенной величины. При этом происходит мгновенное переключение контакта 3 из верхнего положения в нижнее, что исключает искрение контактов при их размыкании.

2.5.2 Датчики скорости

Угловая скорость и частота вращения измеряются с помощью приборов, называемых тахометрами. За единицу угловой скорости принят радиан в секунду (рад/с). Единицей частоты вращения является секунда в минус первой степени (с-1).

По принципу действия первичного преобразователя тахометры разделяют на механические, магнитные, электрические и стробоскопические. Механические тахометры имеют в своем составе только механические преобразователи. К ним относятся центробежные, фрикционные, часовые, гидравлические, пневматические. Отличительной особенностью магнитных тахометров является то, что наряду с другими преобразователями они имеют магнитный индукционный преобразователь. Для электрических тахометров характерно наличие в измерительной цепи электромеханических преобразователей. К этой группе относятся -электромашинные и электроимпульсные тахометры. Действие стробоскопических тахометров

основано на создании с помощью специальных преобразователей стробоскопического эффекта.

По способу применения все тахометры классифицируются на стационарные и переносные. Стационарные, как правило, служат для постоянного измерения скорости какого-либо объекта и соединяются с основным валом этого объекта посредством специального передаточного устройства. Переносные (ручные) тахометры присоединяются к контролируемому валу только на время измерения скорости вращения.

По методу измерения различают тахометры, работающие контактным и бесконтактным методами. К первой группе относятся все вышеперечисленные приборы.

2.5.2.1 Центробежные тахометры

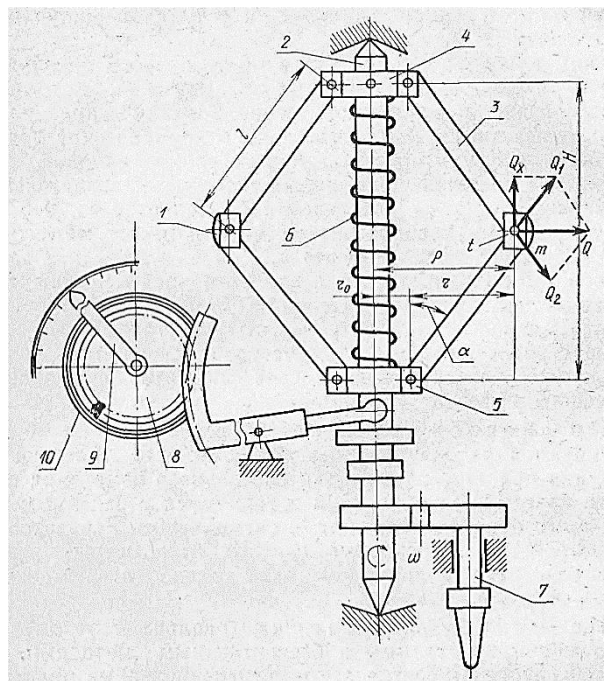


Рисунок 2.49 – Центробежные тахометры

Принципиальная схема центробежного тахометра с грузиками представлена на рисунке 2.49. В тахометре имеются грузики 1, симметрично

расположенные относительно оси тахометра 2. Тяги 3 шарнирно связаны с двумя муфтами.

Одна из них (4) жестко связана с осью тахометра, а вторая (5) имеет возможность перемещаться по оси 2 в вертикальном направлении. Между муфтами установлена пружина 6, стремящаяся их разжать и приблизить грузики к оси тахометра. При такой конструкции грузики вместе с пружиной представляют собой первичный преобразователь тахометра.

Вал тахометра приводится во вращение от входного валика 7 через зубчатую передачу. При вращении грузиков развивается центробежная сила Q , действующая в плоскости, перпендикулярной оси тахометра, и направленная радиально. Эта сила может быть разложена на составляющие Q_1 и Q_2 – направленные вдоль тяг. Составляющая $Q_{ос}$ силы Q , направленная вдоль оси вращения, перемещает подвижную муфту, пока не будет уравновешена упругой противодействующей силой пружины.

Таким образом, перемещение подвижной муфты является выходным сигналом преобразователя.

Далее линейное перемещение подвижной муфты при помощи трибосекторного механизма 8 преобразуется в угловое перемещение стрелки 9. Волосок 10 служит для устранения мертвого хода в передаточном механизме.

Характеристики центробежных тахометров нелинейны. Поэтому в центробежных тахометрах применяют чувствительные элементы с подавленным начальным участком шкалы, что достигается за счет предварительного натяга противодействующей пружины, соответствующего выбора диапазона измерений и позволяет выбрать рабочий участок характеристики в ее средней части, наиболее близкой к линейному. На практике это обеспечивается созданием многодиапазонных приборов путем применения на входе тахометров коробок скоростей. Например, ручной центробежный тахометр ИО-10 имеет встроенную пятискоростную коробку передач с двумя группами диапазона измерений: 25—100; 75—300; 250—

1000; 750—3000; 2500— 10000 об/мин. Аналогичного класса тахометр ИО-30 имеет встроенную трехскоростную коробку передач,

Центробежные тахометры не имеют методических погрешностей. Им свойственны только инструментальные.

Появление инструментальных погрешностей обусловлено упругим гистерезисом и последствием противодействующей пружины, влиянием температуры на ее модуль упругости, погрешностей из-за трения в кинематических парах, а также неточностей изготовления и сборки.

Достоинство центробежных тахометров - простота конструкции при сравнительно высокой точности измерения, а также независимость показаний от направления вращения. Недостатки связаны с нелинейностью характеристики и с ограниченной дистанционностью измерения, которая определяется предельно допустимой длиной гибкого валика (2,5 м).

У различных конструкций центробежных тахометров предельная основная приведенная погрешность находится в пределах от ± 1 до ± 2 %.

2.5.2.2 Электрические тахометры



Рисунок 2.50 – Электрические тахометры

Электрические тахометры наряду с другими содержат в измерительной цепи электромеханические преобразователи. К числу электрических относятся электромашинные электроимпульсные и фотоэлектрические тахометры.

В электрических тахометрах измеряемая угловая скорость, преобразуется в постоянный, переменный или импульсный ток. В зависимости от рода тока и преобразователя, можно выделить электромашинные тахометры постоянного и переменного тока, электроимпульсные емкостные тахометры и счетно-импульсные тахометры.

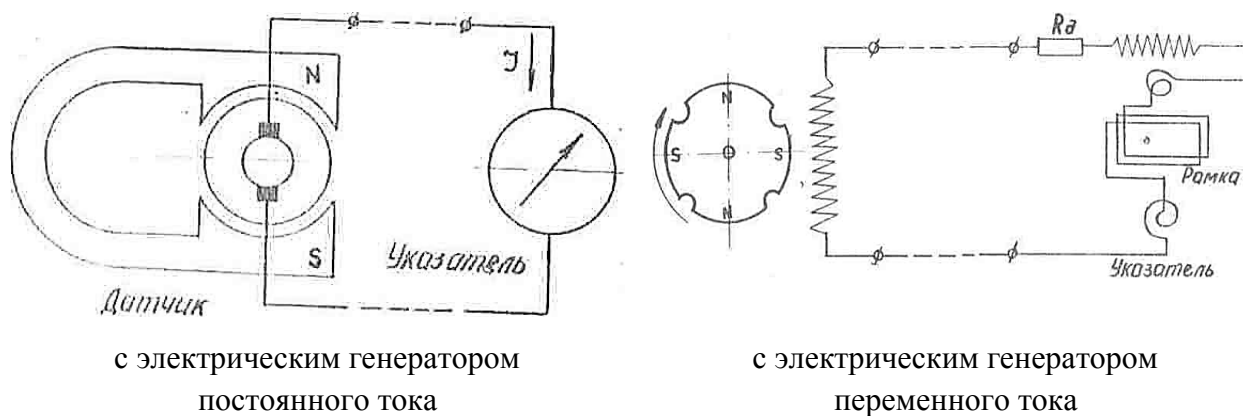


Рисунок 2.51 – Тахометр с электрическим генератором

Принцип действия электрического генератора заключается в том, что при движении проводника в магнитном поле возникает электродвижущая сила. Величина электродвижущей силы пропорциональна магнитной индукции, длине проводника и скорости его движения. При вращении ротора генератора постоянного тока в его обмотке наводится Э.Д.С.

У электрических тахометров постоянного тока характеристика линейная, а у тахометров переменного тока – нелинейная. Тем не менее, более широкое применение получили электромашинные тахометры переменного тока. Их основное преимущество перед тахометрами постоянного тока состоит в том, что генератор переменного тока не имеет коллектора, благодаря чему тахометр лучше сохраняет свою первоначальную точность в процессе длительной работы.

Достоинства тахогенераторов постоянного тока являются: малые габариты и масса при большой выходной мощности; отсутствие фазовой

погрешности, что обусловлено работой на активную нагрузку; кроме того, в тахогенераторах с постоянными магнитами не требуется иметь вспомогательный источник электрической энергии для возбуждения. Однако по сравнению с тахогенераторами переменного тока они имеют ряд недостатков: сложность конструкции, высокую стоимость, нестабильность выходной характеристики из-за наличия скользящего контакта; пульсации выходного напряжения и радиопомехи, возникающие в результате коммутации тока щетками.

2.5.3 Датчики температуры

2.5.3.1 Биметаллический датчик температуры

Биметаллический датчик температуры сделан из двух разнородных металлических пластин, скрепленных между собою. Различные металлы имеют различный коэффициент расширения при той или иной температуре. Например, константан практически не расширяется при температуре, железо, напротив испытывает заметное расширение. Если полоски из этих металлов скрепить между собой и нагреть (или охладить), то они изогнутся. В биметаллических датчиках пластинки замыкают или размыкают контакты реле, или двигают стрелку индикатора.

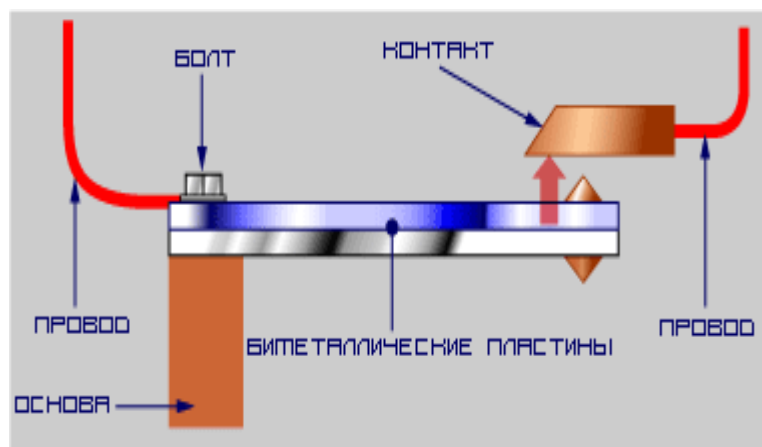


Рисунок 2.52 – Биметаллический датчик температуры

Диапазон работы биметаллических датчиков от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Биметаллические датчики используют для измерения поверхности твердых тел, реже для измерения температуры жидкости. Основным преимуществом датчиков является простота и надежность конструкции, возможность работы без электрического тока, низкая стоимость. Вместе с тем, биметаллические датчики температуры имеют большой разброс характеристик, а так же большой гистерезис переключения, особенно при низких температурах. Основные области применения биметаллических температурных датчиков – автомобильная промышленность, системы отопления и нагрева воды.

2.5.3.2 Термопара

Термопары представляют собой две проволоки из различных металлов, сваренных между собой на одном из концов. Если соединить два проводника из разнородных металлов таким образом, что бы они образовывали замкнутую цепь и поддерживать места контактов проводников при разной температуре, то в цепи потечет постоянный ток.



Рисунок 2.53 – Термопара

Пример пары металлов: хромель-алюмель, медь-константан, железо-константан, платина-платина/родий, рений-вольфрам. Каждый тип подходит для решения своих задач. Термопары хромель-алюмель (тип К) имеют высокую чувствительность и стабильность и работают до температур вплоть до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в окислительной или нейтральной атмосфере. Это один из самых распространенных типов термопар. Термопара железо-константан (тип J) работает в вакууме, восстановительной или инертной атмосфере при температурах до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. При высоких температурах до $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ используют

термопары платина- платина/родий (тип S или R) в керамических защитных кожухах. Они прекрасно измеряют температуру в окислительной, нейтральной среде и вакууме.

2.5.3.3 Термопара сопротивления

Термометры сопротивления - это резисторы, изготовленные из платины, меди или никеля. Это могут быть проволоочные резисторы, либо металлический слой может быть напыленным на изолирующую подложку, обычно керамическую или стеклянную.



Рисунок 2.54 – Термопара

Платина чаще всего применяется в термометрах сопротивления из-за ее высокой стабильности и линейности изменения сопротивления с температурой. Медь используется в основном для измерения низких температур, а никель в недорогих датчиках для измерения в диапазоне комнатных температур. Для защиты от внешней среды платиновые термометры сопротивления помещают в защитные металлические чехлы и изолируют керамическими материалами, такими как оксид алюминия или оксид магния. Такая изоляция снижает так же воздействие вибрации и ударов на датчик. Однако вместе с дополнительной изоляцией растет и время отклика датчика на резкие температурные изменения. Платиновые термометры сопротивления одни из самых точных датчиков температуры.

Кроме того, они стандартизированы, что значительно упрощает их использование. Стандартно производятся датчики сопротивлением 100 и 1000 Ом. Изменение сопротивления таких датчиков с температурой дается в любых тематических справочниках в виде таблиц или формул. Диапазон измерений платиновых термометров сопротивления составляет -180°C $+600^{\circ}\text{C}$. Несмотря на изоляцию, стоит оберегать термометры сопротивления от сильных ударов и вибрации.

2.5.3.4 Термисторы

Термисторы – датчики, в которых используется эффект изменения электрического сопротивления материала под воздействием температуры. Обычно в качестве термисторов используют полупроводниковые материалы, как правило, оксиды различных металлов. В результате получаются датчики с высокой чувствительностью. Однако большая нелинейность позволяет использовать термисторы лишь в узком диапазоне температур.

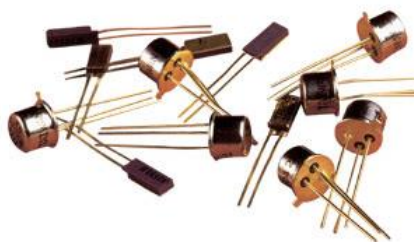


Рисунок 2.55 – Термисторы

Термисторы имеют невысокую стоимость и могут изготавливаться в миниатюрных корпусах, позволяя увеличить тем самым быстродействие. Существует два типа термисторов, использующих положительный температурный коэффициент – когда электрическое сопротивление растет с повышением температуры и использующих отрицательный температурный коэффициент – здесь электрическое сопротивление падает при повышении температуры. Термисторы не имеют определенной температурной характеристики. Она зависит от конкретной модели прибора и области его

применения. Основными достоинствами термисторов является их высокая чувствительность, малые размеры и вес, позволяющие создавать датчики с малым временем отклика, что важно, например, для измерения температуры воздуха. Безусловно, невысокая стоимость так же является их достоинством, позволяя встраивать датчики температуры в различные приборы. К недостаткам можно отнести высокую нелинейность термисторов, позволяющую их использовать в узком температурном диапазоне. Использование термисторов так же ограничено в диапазоне низких температур.

2.5.4 Датчики давления

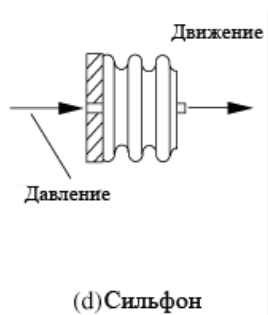


Рисунок 2.56 – Сильфоны



Рисунок 2.57 – Мембраны

2.5.4.1 Сильфоны

Сильфоны имеют цилиндрическую форму и содержат много складок. Они могут деформироваться в осевом направлении при изменении давления (сжатие или расширение). Давление, которое должно быть измерено прикладывается к одной стороне сильфона (внутри или снаружи), тогда как на противоположную сторону действует атмосферное давление. Абсолютное давление может быть измерено путем откачки воздуха из внешнего или внутреннего пространства сильфона, а затем измерением давления на противоположной стороне.

Сильфон может быть подключен только к включающим / выключающим переключателям или к потенциометру и используется при низких давлениях, <200 Па с чувствительностью 1,2 Па.

2.5.4.2 Мембраны (Диафрагмы)

Мембраны изготовлены из круглых металлических дисков или гибких элементов, таких как резина, пластик или кожа. Материал, из которого изготовлена мембрана зависит от того используется ли свойства упругости этого материала или ему должен противостоять другой элемент (например - пружина). Мембраны изготовленные из металлических дисков используют упругие характеристики, а тем, которым противостоят другие упругие элементы, изготовлены из гибких элементов.

Мембраны очень чувствительны к резким изменениям давления. Мембраной изготовленной из металла можно измерить максимальное давление равное примерно 7 МПа, а мембраной использующей упругий тип материала можно измерять чрезвычайно низкие давления (0,1 кПа - 2,2 МПа) при подключении к емкостным преобразователям или к датчикам перепада давления. Диафрагмы бывают плоские, гофрированные и капсульного типа. Как отмечалось ранее, мембраны очень чувствительны (0,01 МПа). Они могут измерять дробные разности давления на очень маленьком диапазоне (скажем, давления нескольких дюймов воды) (эластичный тип) или большие перепады давления (приближаясь к максимальному диапазону в 207 кПа) (металлический тип).

Мембраны очень универсальны - они обычно используются в очень агрессивных средах или в ситуациях с экстремальными избыточными давлениями.

2.6 Устройство управления мехатронных модулей и систем.

Контроллеры

Любая машина, способная автоматически выполнять некоторые операции, имеет в своем составе **контроллер** (англ. *управляющий*) — **модуль, обеспечивающий логику работы устройства**. Контроллер — это мозг машины. Естественно, чем сложнее логика работы машины, тем «умнее» должен быть контроллер.

Технически контроллеры реализуются по-разному. Это может быть механическое устройство, пневматический или гидравлический автомат, релейная или электронная схема или даже компьютерная программа. Контроллеры, выполненные на основе реле или микросхем с «жесткой» логикой, невозможно научить делать другую работу без существенной переделки. Очевидно, что такой возможностью обладают только **программируемые логические контроллеры (ПЛК)**. Идея создания ПЛК родилась практически сразу с появлением микропроцессора, т. е. более 30 лет назад.



Рисунок 2.58 – Принцип работы ПЛК

Программируемый логический контроллер, ПЛК — микропроцессорное устройство, предназначенное для управления технологическими процессами в промышленности и другими сложными технологическими объектами. Принцип работы ПЛК заключается в сборе сигналов от датчиков и их обработке по прикладной программе пользователя с выдачей управляющих сигналов на исполнительные устройства.

Физически, типичный ПЛК представляет собой блок, имеющий определенный набор выходов и входов, для подключения датчиков и исполнительных механизмов.

Программируемый контроллер — это программно управляемый **дискретный автомат**, имеющий некоторое множество входов, подключенных посредством датчиков к объекту управления, и множество выходов, подключенных к исполнительным устройствам. ПЛК контролирует состояния входов и вырабатывает определенные последовательности программно заданных действий, отражающихся в изменении выходов. ПЛК предназначен для работы в режиме реального времени в условиях промышленной среды и должен быть доступен для программирования неспециалистом в области информатики.

Изначально ПЛК предназначались для управления последовательными логическими процессами, что и обусловило слово «логический» в названии ПЛК. Современные ПЛК помимо простых логических операций способны выполнять цифровую обработку сигналов, управление приводами, регулирование, функции операторского управления и т. д.

Основные функции, выполняемые ПЛК в системах управления это управление, защита, измерение физических сигналов, отображение и регистрация технологических процессов. ПЛК является основным функциональным элементом современных АСУ ТП.

На заре своего появления ПЛК имели только **бинарные входы**, т. е. входы, значения сигналов на которых способны принимать только два состояния — логического нуля и логической единицы. Так, наличие тока (или напряжения) в цепи входа считается обычно логической единицей. Отсутствие тока (напряжения) означает логический ноль. Датчиками, формирующими такой сигнал, являются кнопки ручного управления, концевые датчики, датчики движения, контактные термометры и многие другие.

Бинарный выход также имеет два состояния — включен и выключен. Сфера применения бинарных выходов очевидна: электромагнитные реле, силовые пускатели, электромагнитные клапаны, световые сигнализаторы и т.д.

В современных ПЛК широко используются **аналоговые** входы и выходы. Аналоговый или **непрерывный** сигнал отражает уровень напряжения или тока, соответствующий некоторой физической величине в каждый момент времени. Этот уровень может относиться к температуре, давлению, весу, положению, скорости, частоте и т.д., словом, к любой физической величине.

Аналоговые входы контроллеров могут иметь различные параметры и возможности. Так, к их параметрам относятся: разрядность АЦП, диапазон входного сигнала, время и метод преобразования, несимметричный или дифференциальный вход, уровень шума и нелинейность, возможность автоматической калибровки, программная или аппаратная регулировка коэффициента усиления, фильтрация.

Особые классы аналоговых входов представляют входы, предназначенные для подключения **термометров сопротивления и термопар**. Здесь требуется применение специальной аппаратной поддержки (трехточечное включение, источники образцового тока, схемы компенсации холодного спая, и т. д.).

В сфере применения ПЛК бинарные входы и выходы называют обычно **дискретными**. Хотя, конечно, это не точно. Аналоговые сигналы в ПЛК обязательно преобразуются в цифровую, т. е. заведомо дискретную форму представления. Но в технических документах ПЛК любой фирмы вы встретите именно указание количества дискретных и аналоговых входов. Поэтому и далее мы сохраним устоявшуюся здесь терминологию.

Помимо «классических» дискретных и аналоговых входов-выходов многие ПЛК имеют **специализированные входы-выходы**. Они ориентированы на работу с конкретными специфическими датчиками,

требующими определенных уровней сигналов, питания и специальной обработки. Например, блоки управления шаговыми двигателями, интерфейсы дисплейных модулей и т. д.

Входы-выходы ПЛК не обязательно должны быть физически сосредоточены в общем корпусе с процессорным ядром. В последние годы все большую популярность приобретают технические решения, позволяющие полностью отказаться от прокладки кабелей для аналоговых цепей. Входы-выходы выполняются в виде миниатюрных модулей, расположенных в непосредственной близости от датчиков и исполнительных механизмов. Соединение подсистемы ввода-вывода с ПЛК выполняется посредством одного общего цифрового кабеля (промышленной сети).

2.6.1 Классификация ПЛК.

Количество и разнообразие ПЛК весьма велико. Нет ни одной фирмы в области автоматики и электроники, которая не выпускала бы собственные ПЛК. Тем не менее, все ПЛК объединяет их общая архитектура.

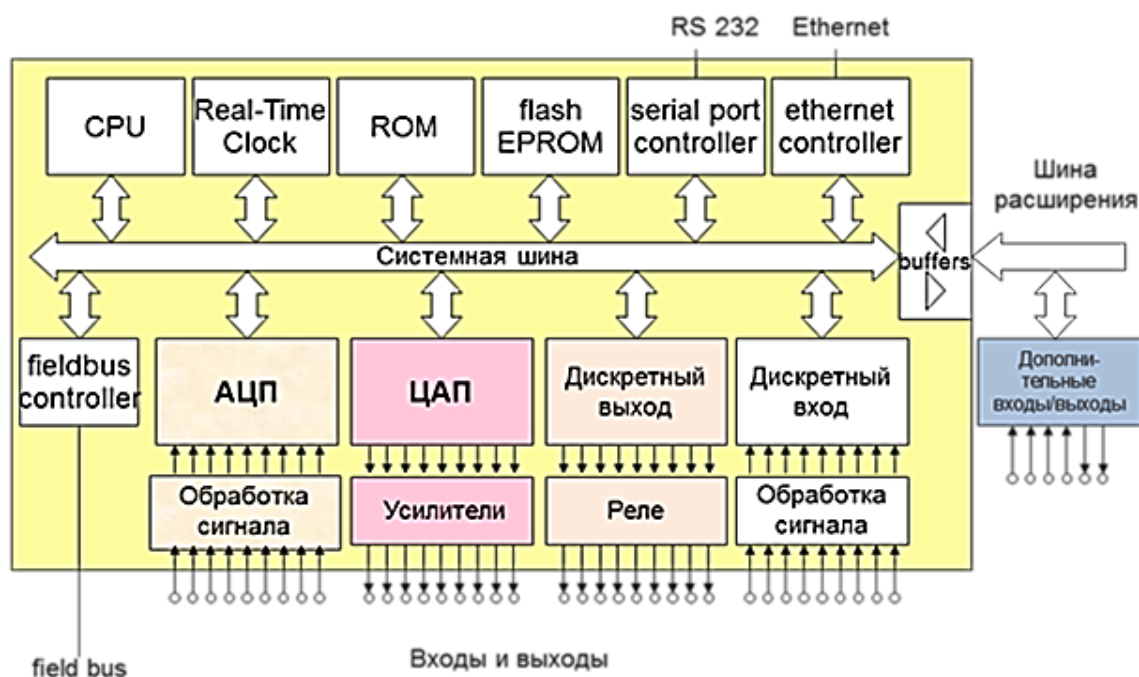


Рисунок 2.59 – Архитектура ПЛК

ПЛК представляют собой типичную микропроцессорную систему. К системной шине подключены общие для микропроцессорной системы устройства: процессор (CPU), энергонезависимые часы (Real-Time Clock) и память (flash EPROM), оперативная память (ROM), контроллеры для подключения последовательного порта (RS-232), офисной (Ethernet) и промышленной (field bus) информационных сетей. Кроме этого, к системной шине подключаются разнообразные устройства ввода и вывода сигналов. Характерной особенностью ПЛК является возможность расширения конфигурации по системной шине, то есть возможность подключения напрямую к системной шине дополнительных устройств ввода/вывода.

При всем многообразии ПЛК их можно классифицировать на следующие группы:

1. Моноблочные простейшие ПЛК (интеллектуальные реле).
2. Модульные ПЛК.
3. Специализированные ПЛК.

Моноблочные простейшие ПЛК. Эти ПЛК являются самыми распространенными.

Характерными особенностями данного типа ПЛК являются небольшие размеры, сравнительно малая стоимость (от 100 до 200 евро), небольшое число входов/выходов, большинство из которых – дискретные. Поэтому эти контроллеры иногда называют интеллектуальными реле. Кроме этого, все эти ПЛК имеют встроенные контроллеры для подключения к промышленной и офисной сетям, а также адаптер последовательного порта RS-232 для подключения к компьютеру.

Большинство современных модульных ПЛК имеют возможность расширения по системной шине для подключения дополнительных модулей входа/выхода.

Модульный ПЛК. В модульных контроллерах модули входов-выходов устанавливаются в разном составе и количестве в зависимости от требуемой конфигурации. Так достигается минимальная аппаратная избыточность. В

распределенных системах модули или даже отдельные входы-выходы, образующие единую систему управления, могут быть разнесены на значительные расстояния и соединяться через промышленную информационную сеть.

Специализированные ПЛК. Это ПЛК, предназначенные для управления определенными объектами (котлами, насосами, холодильниками и так далее). Характеризуются специальными входами/выходами для подключения конкретных устройств (термопары, терморезисторы и т.д.) и встроенной программой управления. Выпускаются большими сериями.

Большинство современных устройств защиты в электрических распределительных сетях также являются ПЛК. Защитные приспособления - узкоспециализированные ПЛК, которые измеряют электрический ток и напряжения в сетях подстанции, а также состояние коммутационной аппаратуры, чтобы обнаружить ситуации, которые могли подвергнуть опасности оборудование (перегрузки, короткое замыкание, перегрев и т.д.) и приводят в действие соответствующие выключатели, чтобы предохранить оборудование подстанции.

Кроме того, эти ПЛК записывают данные, и посылают отчеты в SCADA - системы подстанции.

2.6.2 Рабочий цикл ПЛК и время сканирования

Все ПЛК работают по методу *периодического опроса* входных данных (*сканирования*). ПЛК опрашивает входы, выполняет пользовательскую программу и устанавливает необходимые значения выходов. Таким образом, вычисления в ПЛК всегда повторяются циклически. Одна итерация, включающая замер, обсчет и выработку воздействия, называется **рабочим циклом** ПЛК. Выполняемые действия зависят от значения входов контроллера, предыдущего состояния и определяются пользовательской программой.

По включению питания ПЛК выполняет самотестирование и настройку аппаратных ресурсов, очистку оперативной памяти данных (ОЗУ), контроль целостности прикладной программы пользователя. Если прикладная программа сохранена в памяти, ПЛК переходит к основной работе, которая состоит из постоянного повторения последовательности действий, входящих в *рабочий цикл*.

Рабочий цикл ПЛК состоит из нескольких фаз.

1. Начало цикла.
2. **Чтение состояния входов.**
3. **Выполнение кода программы пользователя.**
4. **Запись состояния выходов.**
5. Обслуживание аппаратных ресурсов ПЛК.
6. Монитор системы исполнения.
7. Контроль времени цикла.
8. Переход на начало цикла.



Рисунок 2.60 – Рабочий цикл ПЛК

В самом начале цикла ПЛК производит физическое чтение входов. Считанные значения размещаются в области памяти входов. Таким образом, создается полная одномоментная зеркальная копия значений входов.

Далее выполняется код *пользовательской программы*. Пользовательская программа работает с копией значений входов и выходов, размещенной в оперативной памяти. Если прикладная программа не загружена или остановлена, то данная фаза рабочего цикла, естественно, не выполняется. Отладчик системы программирования имеет доступ к образу

входов-выходов, что позволяет управлять выходами вручную и проводить исследования работы датчиков.

После выполнения пользовательского кода физические выходы ПЛК приводятся в соответствие с расчетными значениями (фаза 4).

Пользовательская программа работает только с мгновенной копией входов. Таким образом, значения входов в процессе выполнения пользовательской программы не изменяются в пределах одного рабочего цикла. Это фундаментальный принцип построения ПЛК *сканирующего типа*. Такой подход исключает неоднозначность алгоритма обработки данных в различных его ветвях. Кроме того, чтение копии значения входа из ОЗУ выполняется значительно быстрее, чем прямое чтение входа. Аппаратно чтение входа может быть связано с формированием определенных временных интервалов, передачей последовательности команд для конкретной микросхемы или даже запросом по сети.

Общая продолжительность рабочего цикла ПЛК называется *временем сканирования*. Время сканирования в значительной степени определяется длительностью фазы кода пользовательской программы. Время, занимаемое прочими фазами рабочего цикла, практически является величиной постоянной. Для задачи среднего объема время распределится примерно так: 98% — пользовательская программа, 2% — все остальное.

Время реакции — это время с момента изменения состояния системы до момента выработки соответствующей реакции. Очевидно, для ПЛК время реакции зависит от распределения моментов возникновения события и начала фазы чтения входов. Если изменение значений входов произошло непосредственно перед фазой чтения входов, то время реакции будет наименьшим и равным времени сканирования.

2.6.3 Стандарт языков программирования ПЛК (МЭК 61131-3)

Без пользовательской программы ПЛК является бесполезной коробкой, поскольку обработка состояния входов в состояние выходов осуществляется

с помощью программы. Поэтому, прежде чем использовать ПЛК, его нужно программировать. В 1979 году в рамках Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) была создана специальная группа технических экспертов по проблемам ПЛК, включая аппаратные средства, программирование, монтаж, тестирование, документацию и связь.

Первый вариант стандарта МЭК 61131 был опубликован в 1982 году. Ввиду сложности получившегося документа было решено разбить его на несколько частей. В настоящее время стандарт включает следующие части.

Часть 1. Общая информация.

Часть 2. Требования к оборудованию и тестам.

Часть 3. Языки программирования.

Часть 4. Руководства пользователя.

Часть 5. Спецификация сообщений.

Часть 6. Промышленные сети.

Часть 7. Программирование с нечеткой логикой.

Часть 8. Руководящие принципы применения и реализации языков ПЛК.

Третий раздел этого стандарта (МЭК 61131-3) посвящен языкам программирования ПЛК. Согласно ему, стандартными считаются пять языков программирования. Три графических:

- ***Ladder Diagram (LD, LAD, PKC)*** — язык релейной (лестничной) логики;
- ***Function Block Diagram (FBD)*** — язык функциональных логических блоков;
- ***Sequential Function Chart (SFC)*** — язык последовательных функциональных диаграмм;

и два текстовых языка:

- ***Instruction List (IL)*** — список инструкций (аппаратно-независимый низкоуровневый ассемблероподобный язык);

- **Structured Text (ST)** – Текстовый Паскалеподобный язык программирования.

Включение в стандарт пяти языков объясняется в первую очередь историческими причинами. Разработчики стандарта столкнулись наличием огромного количества различных вариаций похожих языков программирования ПЛК. Вошедшие в стандарт языки созданы на основе наиболее популярных языков программирования наиболее распространенных в мире контроллеров.

Текстовые языки программирования предназначены, в первую очередь, для программистов, а более простые, графические языки, доступны для понимания и применения любому инженеру или технологу. После принятия стандарта появилась возможность создания **аппаратно-независимых библиотек**. Это регуляторы, фильтры, управление сервоприводом, модули с нечеткой логикой и т. д. Наиболее удачные, отработанные востребованные библиотеки становятся коммерческими продуктами.

Все производители ПЛК соблюдают требования стандарта МЭК 61131-3. Специалист, прошедший обучение по программе, включающей стандарт МЭК 61131, сможет работать с ПЛК любой фирмы.

2.6.4 Понятие промышленной информационной сети (Field Bus). Классификация промышленных сетей

Промышленная сеть — термин АСУ ТП, под ним понимается сеть передачи данных, связывающая различные датчики исполнительные механизмы, промышленные контроллеры. Устройства используют сеть для:

- передачи данных;
- настройки, ввода в эксплуатацию и диагностики оборудования АСУ ТП;
- питания датчиков и исполнительных механизмов;
- передачи данных между датчиками и исполнительными механизмами, минуя центральный контроллер;

- связи между датчиками, исполнительными механизмами, ПЛК, и АСУ ТП верхнего уровня;
- связи между контроллерами и системами человеко-машинного интерфейса (операторскими системами).

Промышленные сети применяют для передачи данных кабели, оптоволоконные линии, беспроводную связь. Промышленные сети могут взаимодействовать с обычными компьютерными сетями, в частности использовать глобальную сеть Internet.

Часто промышленные сети называют «Полевая шина». Название «Полевая шина» происходит дословного перевода английского термина ***fieldbus***. В настоящее время в профессиональной технической литературе применяется термин «Промышленная сеть», который является более адекватным переводом.

Промышленная сеть — это среда передачи данных, которая должна отвечать множеству разнообразных, а зачастую противоречивых требований.

Промышленная сеть — это набор стандартных протоколов обмена данными, позволяющих связать воедино оборудование различных производителей, а также обеспечить взаимодействие нижнего и верхнего уровней АСУ.

Промышленная сеть — это образ мысли инженера, определяющий конфигурацию и принципы построения системы.

Появлению промышленных сетей способствовал следующий фактор. Когда микропроцессоры и другие специализированные микросхемы стали достаточно дешевыми, стало целесообразным выделять в общей системе АСУ отдельные локальные задачи, решение которых поручать локальным контроллерам. Контур управления, таким образом, замыкается на нижнем уровне. Сеть же позволяет контроллерам в качестве аргументов для вычисления управляющего воздействия использовать переменные других контроллеров, обеспечивая связанность системы управления в целом.

Такая архитектура существенно увеличивает производительность, надежность и масштабируемость систем. Кроме того, современные исполнительные механизмы, как правило, уже сами являются интеллектуальными и законченными «субъектами» промышленных сетей.

Таким образом, промышленные информационные сети АСУ ТП можно описать в виде иерархической структуры, представленной на рисунке.

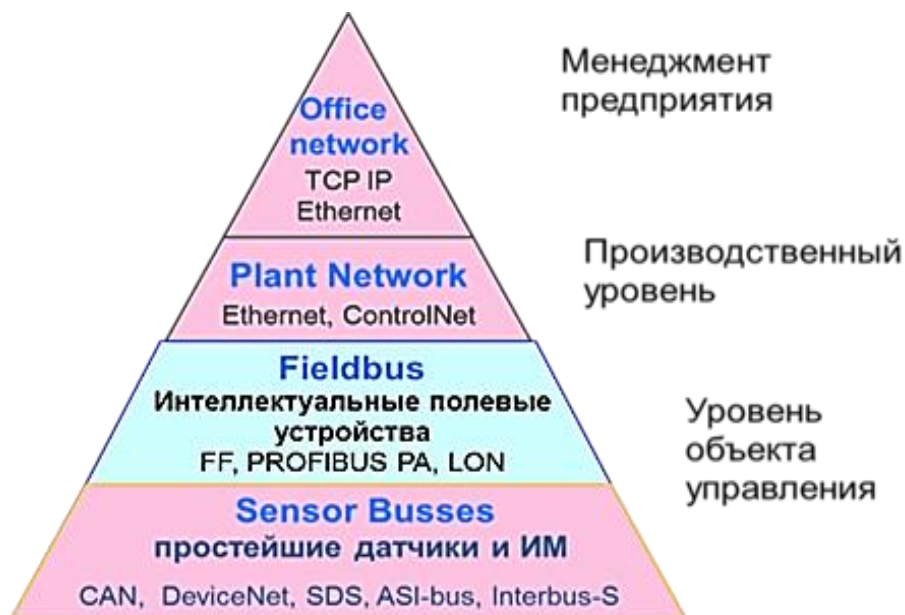


Рисунок 2.61 – Иерархическая структура промышленной информационной сети

Все виды промышленных сетей можно классифицировать по следующим показателям:

- топология сети,
- объем информационного сервиса, предоставляемого сетью,
- способ доступа к физическому каналу передачи данных.

Наиболее распространенный тип сетевой топологии — это **общая шина**. Основное преимущество — простота и дешевизна, легкость переконфигурирования. Не боится отключения или подключения устройств во время работы. Хорошо подходит для сильно распределенных объектов. Имеет ряд «генетических» недостатков, а именно: присутствие в каждой

точке сети общего трафика, опасность потери связи при одиночном обрыве канала связи или фатальном выходе из строя одного узла.

Наиболее распространенными стандартами промышленных информационных сетей являются:

- **RS-485** — самая простая, дешёвая и широко распространённая промышленная сеть;
- Промышленный **Ethernet**;
- **HART** — сеть для аналоговых датчиков и их настройки;
- **AS-Interface** — дешёвая и помехозащищённая сеть для дискретных датчиков малой производительности;
- **CAN** — промышленная сеть для транспорта и машиностроения автоматики: CANbus, CANopen, DeviceNet;
- **ProfiBus** — промышленная сеть, международный стандарт, созданный с активным участием фирмы Siemens AG, содержащий ряд профилей, например: ProfiBus DP, ProfiBus FMS, ProfiBus PA.

Основой почти всех промышленных информационных сетей является интерфейс RS-485.

RS-485 — полудуплексный многоточечный последовательный интерфейс передачи данных. Передача данных осуществляется по одной паре проводников с помощью дифференциальных сигналов. Разница напряжений между проводниками одной полярности означает логическую единицу, разница другой полярности — ноль.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите классификационные признаки мехатронных модулей по конструктивным признакам.
2. Приведите примеры преобразователей движения.
3. Область применения реечных передач.
4. Особенности применения планетарных передач.
5. Особенности применения волновых зубчатых передач.

6. Сравнительные отличия передач винт-гайка качения от винт-гайка скольжения.
7. Область применения дифференциальных и интегральных передач винт-гайка.
8. Как работает тахогенератор постоянного тока?
9. Что представляет собой серводвигатель и сервопривод?
10. Каковы достоинства и недостатки двигателей постоянного тока?
11. Объясните принцип работы двигателей постоянного тока.
12. Изложите принцип работы синхронных двигателей.
13. Изложите принцип работы пневмодвигателей.
14. Каков состав блока подготовки воздуха в пневмосистеме?
15. Каковы назначение, схемы и принцип работы электроконтактных датчиков?
16. Каковы области применения, преимущества и недостатки потенциометрических датчиков?
17. Как работают и где применяются тензометрические датчики?
18. Каковы принцип работы и области применения индуктивных датчиков?
19. Какие существуют разновидности емкостных датчиков и для чего они применяются?
20. Для каких измерений используются пьезометрические датчики?
21. Какие виды терморезисторов существуют? Каковы их основные характеристики и области применения?
22. На чём основан принцип действия термоэлектрических преобразователей? Какие материалы используются для термопар?
23. На чём основан принцип действия асинхронного тахогенератора?
24. В чём состоит отличие работы асинхронного тахогенератора от синхронного?
25. Сформулировать определения «модуль движения», «мехатронный модуль движения» и различия между ними.
26. Объяснить принцип действия модулей движения.
27. Состав мехатронного модуля движения
28. Структурная и функциональная схемы мехатронных модулей движения.
29. Что такое контроллеры?
30. Что такое интеллектуальные мехатронные модули?

Тема 3. Теория автоматического управления мехатронными модулями и системами

3.1 Основные понятия и определения теории автоматического управления

3.1.1 Устройства управления мехатронными модулями

В мехатронике существуют 3 задачи управления: управление манипуляторами, системой передвижения и совместное управление группой мехатронных устройств. Применяемые для решения этих задач способы управления можно классифицировать следующим образом.

По степени участия человека в процессе управления существуют системы:

- автоматического;
- автоматизированного;
- ручного управления.

По типу алгоритма автоматического управления различают системы:

- программного;
- адаптивного;
- интеллектуального управления.

По типу движения существуют системы управления:

- непрерывные (контурные);
- дискретные позиционные (шагами "от точки к точке");
- дискретные цикловые (с одним шагом по каждой координате).

(В отечественной литературе дискретное позиционное управление часто называется просто позиционным.)

По виду управляемых переменных различают системы управления:

- положением (позицией);
- скоростью;
- силой (моментом);

Применительно к управлению манипуляторами эти способы означают управление абсолютными координатами его рабочего органа, его скоростью и силой.

Часто перечисленные способы управления применяются в комбинации одновременно по разным координатам, в виде некоторой функциональной зависимости одной управляемой переменной от другой или путем последовательного перехода от одного способа управления к другому.

3.1.2 Основные понятия и определения теории автоматического управления

Теория автоматического управления изучает свойства различных, в основном технических устройств с целью заставить их работать с большей эффективностью для человека. Анализ этих свойств дает основания для исследования возможностей повышения эффективности работы устройств в автоматическом режиме, т. е. без вмешательства человека-оператора.

Теория автоматического управления (ТАУ) – научно-техническая дисциплина, в рамках которой изучаются свойства и характеристики САУ, принципы управления, методы анализа и синтеза САУ.

Анализ САУ – расчет основных характеристик САУ и оценка качества процессов в ней.

Синтез САУ – направленный расчет, имеющий своей целью отыскание рациональной структуры системы и установление величин параметров её отдельных звеньев, удовлетворяющих заданному качеству процессов.

Система – совокупность элементов (технических средств), объединенных общим режимом функционирования.

Управление — это контролируемое воздействие на объект, предназначенное для достижения цели управления — определенных критериев качества, которые могут включать в себя следующие условия: ограничения на максимальное и установившееся отклонения от заданного режима, получение желаемого вида переходных процессов, необходимость

компенсации неблагоприятных факторов, уменьшение энергии, затраченной на управление и т. п.

Автоматизация процессов заключается в проектировании специальных устройств, а в более широком смысле — САУ, работающих по принципу «включил и забыл». Назначение системы управления заключается в том, чтобы заставить объект управления (ОУ) выполнять возложенную на него задачу с желаемым качеством. Сами по себе ОУ часто не обеспечивают желаемого хода процессов на выходе, не устраняют отклонений от заданных режимов, поэтому такие ОУ снабжаются регуляторами, или устройствами управления (УУ).

Объект управления (ОУ) – совокупность технических средств, нуждающихся в воздействии со стороны УУ для осуществления требуемого закона функционирования.

Управляющее устройство (УУ)– совокупность технических средств, осуществляющих формирование управляющего воздействия на ОУ.

Таким образом, САУ представляет собой объединение ОУ и УУ. В зависимости от субъекта, принимающего решения о воздействии на объект, управление бывает ручным и автоматическим.

Принцип управления отражает характер взаимодействия управляющего устройства и объекта управления (разомкнутое, замкнутое и т.д.).

Регулирование — это управление с целью обеспечения близости управляемых координат объекта к их заданным значениям.

Следящее регулирование — это приведение управляемых координат к значениям заранее неизвестных, но доступных для измерения путем их сравнения благодаря наличию в системе контура обратной связи (ОС). Данное понятие включает в себя комплекс технических средств, обеспечивающих:

- измерение выходной переменной объекта с помощью датчика;
- измерение или генерирование по определенной программе сигнала;

- формирование с помощью сравнивающего устройства сигнала невязки или ошибки регулирования — разности между установленным и текущим значением управляемой переменной;

- преобразование ошибки регулирования в управляющий сигнал, подаваемый через исполнительное устройство на объект управления.

В правильно спроектированной системе управления сигнал невязки заставляет объект реагировать таким образом, чтобы уменьшить величину ошибки до допустимого, а в идеале — до нулевого значения. Примером следящей системы может служить система автоматического наведения антенны локатора, телескопа, ствола орудия, лазерного луча и т. п. на движущуюся цель.

Стабилизация — это регулирование управляемых координат к постоянным значениям с помощью обратной связи. Являясь частным случаем следящей системы, система стабилизации не требует непрерывного измерения значений из-за ее постоянства в пределах рабочего интервала времени. Примером системы стабилизации может служить кондиционер, поддерживающий в комнате заданную температуру воздуха.

Программное регулирование — это регулирование координат объекта по определенному закону — заранее известной функции времени. Типичными примерами систем с программным управлением могут служить:

- робот-манипулятор, переносящий деталь по заданной траектории;
- станок с программным управлением;
- система автоматической посадки самолета по специальной траектории — глиссаде.

При полностью известных условиях работы объекта и в отсутствие факторов, отклоняющих его движение от заданного, программное управление является надежным и дешевым методом регулирования.

Возмущение (возмущающее воздействие) — это неуправляемое воздействие извне на любой элемент системы, как правило, затрудняющее достижение цели управления. Примерами возмущений являются:

- износ инструмента при металлообработке;
- боковой ветер, сносящий самолет с заданного курса;
- утечка тепла через открытые окна, двери, щели в стенах в системе стабилизации комнатной температуры;
- инструментальные погрешности настройки датчиков, из-за чего последние сообщают регулятору недостоверную информацию о состоянии системы.

Входное (управляющее) воздействие – воздействие из внешней среды на САУ в соответствии с заданным законом управления.

Выходное (управляемое) воздействие – величина, характеризующая состояние ОУ.

Возмущающее воздействие (помеха) – воздействие (внешнее или внутреннее), вызывающее незапланированное изменение выходной величины.

Одномерная САУ – система, имеющая один вход и один выход.

Многомерная САУ – система, имеющая более одного входа и/или выхода.

Переходной процесс – изменение выходной величины при каком-либо изменении входной величины.

Установившийся процесс – процесс, устанавливающийся в устойчивой системе после окончания переходного процесса и характеризующийся определенным соотношением между входной и выходной величинами.

Переходная функция $h(t)$ – реакция САУ на единичное ступенчатое входное воздействие.

Импульсная переходная функция $w(t)$ – реакция САУ на входное воздействие типа дельта-импульс.

Передаточная функция $W(p)$ – отношение изображений по Лапласу выходной величины к входной при нулевых начальных условиях.

Частотная функция $W(j\omega)$ – функция, получаемая из передаточной функции путем подстановки $p=j\omega$.

Математическая модель САУ – математическое описание связи входной и выходной величины в виде дифференциального уравнения или передаточной функции.

Устойчивость САУ – свойство САУ возвращаться в исходное или близкое к нему состояние после прекращения действия на систему возмущающего воздействия.

Качество процессов в САУ характеризуется тем, на сколько процесс управления близок к задаваемому. Количественно оно характеризуется показателями качества, которые выбираются в соответствии с целью управления.

Корректирующие устройства – устройства, вводимые в САУ для обеспечения заданного качества процессов.

Одним из основных понятий ТАУ является понятие динамического звена. Для расчета различных САУ они обычно разбиваются на динамические звенья. Под динамическим звеном понимают устройство любого физического вида и конструктивного оформления, описываемое определенным дифференциальным уравнением. В соответствии с этим классификация звеньев производится именно по виду дифференциального уравнения или виду передаточной функции. Одним и тем же уравнением могут описываться весьма разнообразные устройства (механические, гидравлические, электрические, электронные и т.д.).

Динамические характеристики используются для качественной и количественной оценки свойств звеньев и САУ в целом. Для этого рассматриваются: переходная и импульсная переходная функции, передаточная и частотная функции, амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики.

3.2 Типовые динамические звенья САУ мехатронных модулей

1. Безынерционное (усилительное) звено. Уравнение динамики звена имеет вид

$$y(t) = kx(t),$$

где k - коэффициент усиления (передачи).

Передаточная функция равна

$$W(p) = k.$$

Переходная функция звена равна

$$h(t) = k.$$

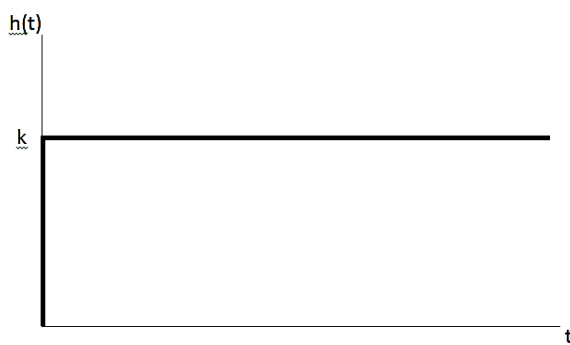


Рисунок 3.1 - Переходная функция безынерционного звена

Примерами звена являются механический редуктор (без учета явления скручивания и люфта), безынерционный (широкополосный) электронный усилитель, делитель напряжения и т. п. Многие датчики сигналов, например, потенциометрические, индукционные, фотоэлектрические датчики, вращающиеся трансформаторы и т.п., также могут рассматриваться как безынерционные звенья.

Безынерционное звено является некоторой идеализацией реальных звеньев. В действительности ни одно звено не в состоянии равномерно пропускать все частоты от 0 до ∞ . Обычно к такому виду звена сводится одно из реальных звеньев, например, апериодическое или колебательное, если можно пренебречь влиянием переходных процессов.

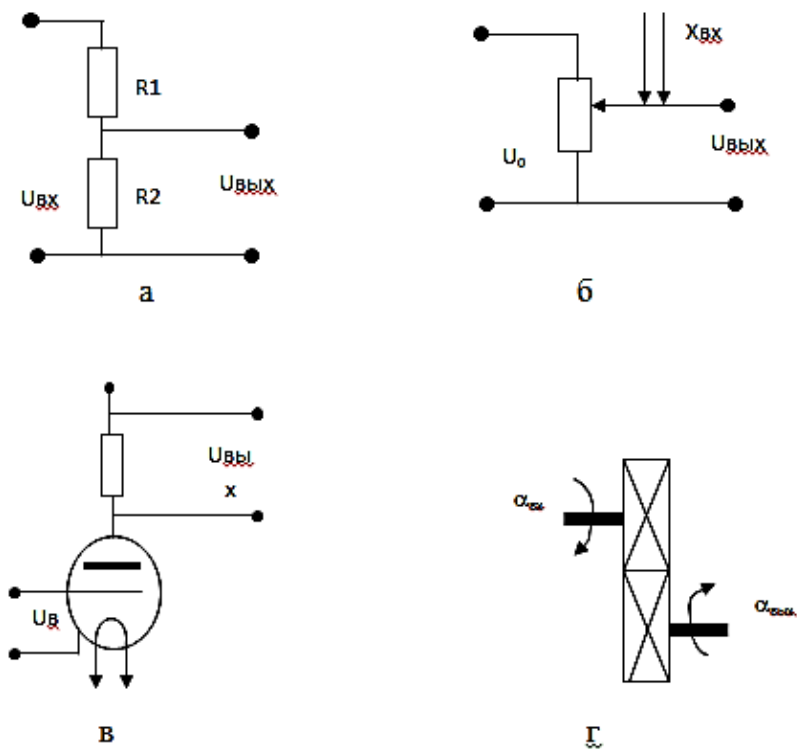


Рисунок 3.2 - Примеры безынерционных звеньев:
а - делитель напряжения, б - потенциометрический датчик,
в - электронный усилитель, г - механический редуктор

2. Инерционное (апериодическое) звено первого порядка. Звено называется апериодическим, если его дифференциальное уравнение имеет вид

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx,$$

где T - постоянная времени, k - коэффициент передачи.

Передаточная функция звена записывается

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Переходная функция определяется выражением

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

Выражение для переходной функции представляет собой экспоненту с постоянной времени T .

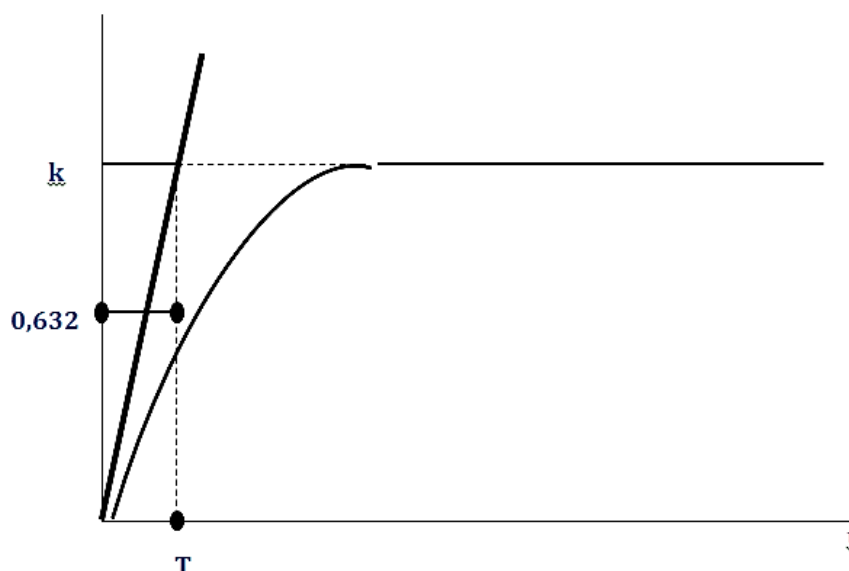


Рисунок 3.3 - Переходная функция апериодического звена

Переходная функция апериодического звена достигает своего установившегося значения k не сразу, а постепенно по экспоненциальному закону. Экспонента рассматривается, начиная с момента времени $t = 0$. Чем больше постоянная времени звена, тем дольше длится переходный процесс, т.е. медленнее устанавливается значение $y = kx$ на выходе звена. Элемент автоматических систем может быть отображен апериодическим звеном, если он содержит хотя бы одну емкость энергии. Такими емкостями в электрических цепях являются "С" и "L": в конденсаторе С накапливается энергия электрического поля, а в индуктивности L - магнитного. Емкостями энергии в механических системах являются движущие массы, пружины и т.д. Накопление и рассеивание энергии в апериодическом звене происходит постепенно.

Примерами таких звеньев являются: двигатель любого типа (электрический, гидравлический, пневматический и т.д.), выходной величиной которого является скорость вращения; нагревательная печь, у которой входная величина — количество поступающего в единицу времени тепла, а выходная — температура в печи, термopара, электрические LR- и RC-

цепи (четыреполюсники), в которых выходное напряжение снимается, соответственно, с сопротивления R и емкости C.

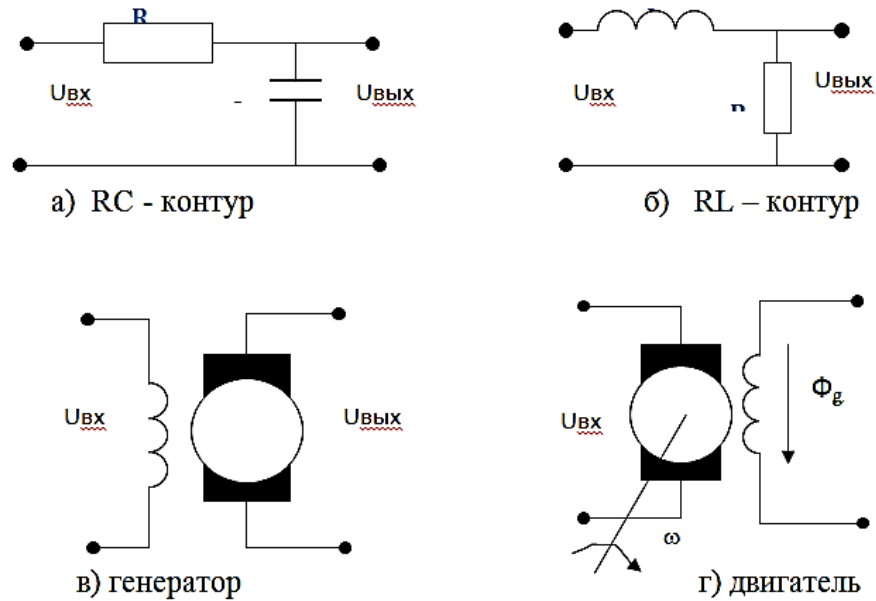


Рисунок 3.4 - Примеры инерционных звеньев первого порядка

3. Аперийодическое звено второго порядка. Дифференциальное уравнение звена имеет вид:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx$$

Передаточная функция звена равна:

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

Корни характеристического уравнения звена должны быть вещественными. Аперийодическое звено второго порядка эквивалентно двум аперийодическим звеньям первого порядка, включенным последовательно, с общим коэффициентом передачи k и постоянными времени T_1 и T_2 .

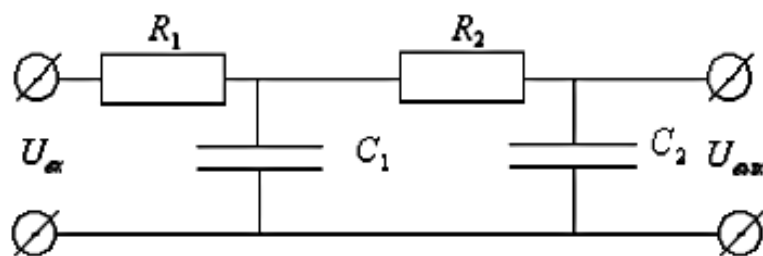


Рисунок 3.5 – Пример апериодического звена второго порядка

Переходная функция звена имеет вид:

$$h(t) = k[1 - T_1/(T_1 - T_2)\exp\{-t/T_1\} + T_2/(T_1 - T_2)\exp\{-t/T_2\}] .$$

4. Идеальное интегрирующее звено. К данному типу относится такое звено, выходная величина которого пропорциональна интегралу по времени от входной величины

$$y(t) = k \int_0^t x(\tau) d\tau .$$

Применяя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получаем передаточную функцию для интегрирующего звена

$$W(p) = k/p .$$

Переходная функция звена

$$h(t) = kt$$

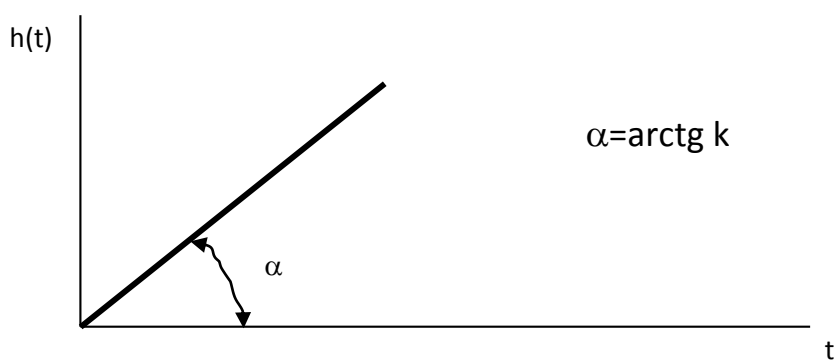


Рисунок 3.6 – Переходная функция интегрирующего звена

Такое звено является идеализацией реальных интегрирующих звеньев. Примеры интегрирующих звеньев следующие: операционный усилитель в режиме интегрирования, обычный гидравлический демпфер, если входной величиной является сила, действующая на поршень, а выходной – перемещение поршня, электродвигатель, у которого можно пренебречь постоянной времени, а в качестве выходной величины рассматривать угол поворота вала.

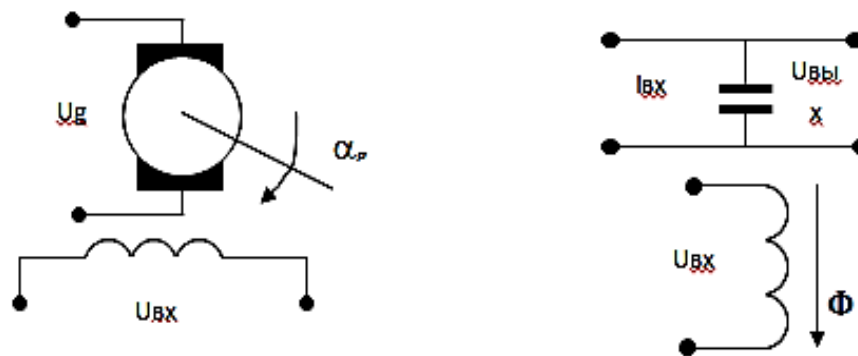


Рисунок 3.7 – Пример интегрирующего звена

5. Реальное интегрирующее звено (интегрирующее звено с замедлением). Звено описывается дифференциальным уравнением:

$$T \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = kx$$

Передаточная функция звена записывается:

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

Примером такого звена является реальный двигатель, если в качестве выходной величины рассматривать не угловую скорость, а угол поворота, являющийся интегралом от угловой скорости. К такому же типу звена сводятся демпфер, серводвигатель, интегрирующий привод, если более точно рассматривать их уравнения движения, и др.

Интегрирующее звено с замедлением можно представить как совокупность двух включенных последовательно звеньев: идеального интегрирующего и апериодического первого порядка.

Переходная функция звена описывается формулой:

$$h(t) = k[1 - T(1 - \exp\{-t/T\})] .$$

6. Идеальное дифференцирующее звено. В соответствии с наименованием звена его выходная величина пропорциональна производной по времени от входной

$$y(t) = k \frac{dx}{dt} .$$

Передаточная функция звена равна

$$W(p) = kp .$$

Переходная функция определяется формулой

$$h(t) = k\delta(t) ,$$

где $\delta(t)$ - дельта-функция.

Таким образом, дифференцирующее звено не пропускает постоянного по величине сигнала. При подаче на его вход ступенчатого сигнала на выходе формируется импульс типа "дельта-функция".



Рисунок 3.8 – Переходная функция дифференцирующего звена

Единственным идеальным дифференцирующим звеном, которое точно описывается уравнением, является тахогенератор постоянного тока, если в качестве входной величины рассматривается угол поворота его ротора, а в качестве выходной – вырабатываемое им напряжение, пропорциональное скорости вращения его якоря, которая является производной по времени от угла поворота якоря. Приблизненно в качестве идеального дифференцирующего звена может рассматриваться операционный усилитель в режиме дифференцирования.

7. Реальное дифференцирующее звено (дифференцирующее звено с замедлением). Динамические свойства звена описываются уравнением:

$$T \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = k \frac{dx}{dt} .$$

Передаточная функция звена равна:

$$W(p) = \frac{k p}{1 + T p}$$

Звено условно можно представить в виде двух включенных последовательно звеньев: идеального дифференцирующего и апериодического первого порядка.

Примерами звеньев являются: электрические RC- и RL-цепи (четырёхполюсники), когда выходное напряжение снимается, соответственно, с сопротивления R и индуктивности L, успокоитель (демпфер) с пружиной.

Переходная функция звена определяется формулой:

$$h(t) = (k/T) \exp\{-t/T\} .$$

8. Колебательное звено. Звено описывается тем же дифференциальным уравнением, что и апериодическое звено второго порядка, однако корни характеристического уравнения должны быть комплексными.

Данное звено определяется уравнением:

$$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\rho T \frac{dy}{dt} + y = kx$$

при степени затухания $0 < \rho < 1$, что соответствует комплексным корням характеристического уравнения.

Постоянная времени колебательного звена T связана с его резонансной частотой ω_0 соотношением $T = \omega_0^{-1}$.

Передаточная функция звена определяется формулой

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\rho T p + 1}$$

Переходная функция звена задается выражением

$$h(t) = k \left[1 - e^{-\rho t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{\rho}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) \right]$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}$.

Примерами колебательных звеньев являются: электрический контур, содержащий индуктивность, емкость и омическое сопротивление, физический маятник, масса, подвешенная на пружине и имеющая демпфер, упругие механические передачи, гироскопические элементы и др.

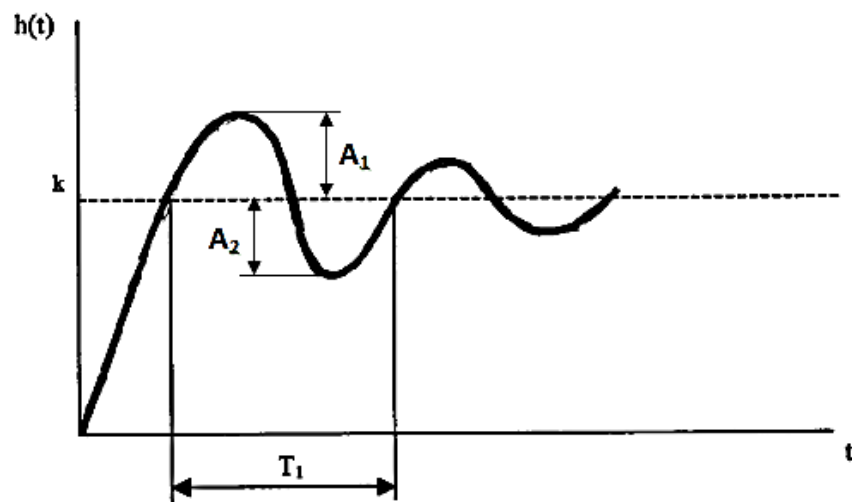


Рисунок 3.9 – Переходная функция колебательного звена

9. Интегро-дифференцирующее звено

Под улучшением качества процесса автоматического регулирования, помимо повышения точности в типовых режимах, понимается изменение динамических свойств автоматической системы с целью получения необходимого запаса устойчивости и быстродействия. В этой проблеме основное значение имеет обеспечение запаса устойчивости. Это объясняется тем, что стремление снизить ошибки регулирования приводит, как правило, к необходимости использовать такие значения общего коэффициента усиления, при которых без принятия специальных мер автоматическая система вообще оказывается неустойчивой.

В связи с этим повышение общего коэффициента усиления до значения, при котором обеспечивается выполнение требований к точности, обычно может производиться только при одновременном повышении запаса устойчивости автоматической системы, что осуществляется при помощи так называемых корректирующих устройств.

К корректирующим средствам относятся, в частности, корректирующие звенья, представляющие собой динамические звенья с определенными передаточными функциями.

Передаточная функция Интегро-дифференцирующего звена определяется формулой:

$$W(p) = \frac{k(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1};$$

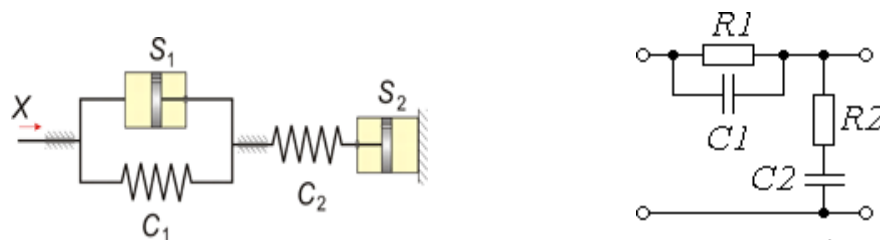


Рисунок 3.10 – Примеры интегро-дифференцирующих звеньев

Пример:



Рисунок 3.11 – Функциональная схема привода главного движения станка

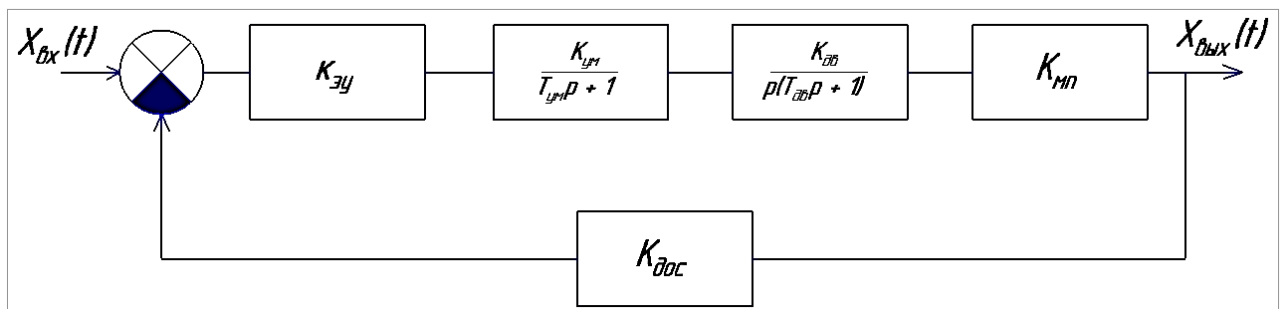


Рисунок 3.12 – Структурная схема привода главного движения станка

3.3 Структурные схемы САУ

Для анализа различных САУ их обычно разбивают на отдельные элементы, динамическими характеристиками которых являются передаточные функции не выше второго порядка, т.е. на типовые звенья. Если известна функциональная схема САУ и передаточные функции звеньев, то составляется структурная схема системы путем формальной замены описания каждого звена на его передаточную функцию.

Изображение системы в виде совокупности типовых звеньев с указанием связей между ними, входных, выходных и возмущающих воздействий, называется структурной схемой. Данный способ составляет суть структурного метода, т.е. метода представления САУ различной физической природы. Хотя структурный метод не предлагает новых

способов расчета, он позволяет наглядно представить взаимосвязь элементов системы и оценить при наличии соответствующего опыта отдельные свойства переходных и статических процессов. Он широко используется в практике проектирования САУ и анализа их характеристик.

Переход от исходной передаточной функции системы к ее структурной схеме может иметь несколько вариантов решения. Возможен и обратный переход, т.е. на основе структурной схемы можно получить дифференциальное уравнение системы, причем эта задача имеет единственное решение.

С целью упрощения структуры системы применяются различные ее преобразования, учитывающие вид соединения звеньев в системе. Наиболее распространенными являются последовательное и параллельное соединение звеньев, а также соединение с обратной связью.

Последовательное соединение звеньев с передаточными функциями $W_i(p)$, $i=1, \dots, m$, представлено на рисунке



Рисунок 3.13 – Последовательное соединение m звеньев

Передаточная функция последовательного соединения звеньев равна произведению передаточных функций всех звеньев:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \prod_{i=1}^m W_i(p)$$

Параллельное соединение звеньев показано на рисунке

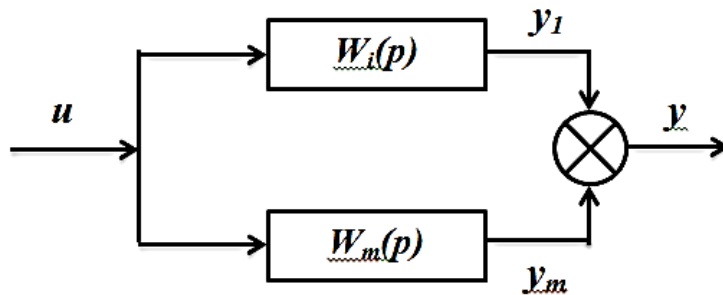


Рисунок 3.14 – Параллельное соединение звеньев

Передаточная функция параллельного соединения звеньев равна сумме передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \sum_{i=0}^m W_i(p).$$

Соединение с обратной связью. Такое соединение звеньев показано на рис.14, причем знак "-" внутри сумматора означает отрицательную обратную связь, а знак "+" – положительную обратную связь.

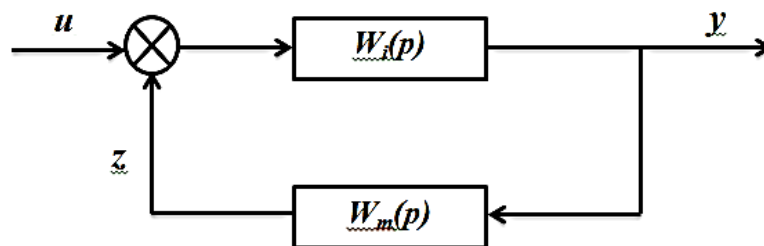


Рисунок 3.15 – Соединение звеньев с обратной связью

Передаточная функция с отрицательной обратной связью равна:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}.$$

Передаточная функция системы с отрицательной обратной связью равна дроби, в числителе которой стоит передаточная функция прямого канала, а знаменатель представляет собой сумму единицы и произведения передаточных функций прямого и обратного каналов системы.

В случае положительной обратной связи формула принимает вид

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)}.$$

т.е. формулы отличаются только знаком в знаменателе.

Пример:

По структурной схеме привода главного движения станка построим передаточную функцию САУ $W(p)$.

В начале рассчитаем передаточную функцию разомкнутой системы, в которой все элементы соединены последовательно:

$$W(p)_{p.c.} = K_{эу} * \frac{K_{ум}}{T_{ум} * p + 1} * \frac{K_{дв}}{p(T_{дв} * p + 1)} * K_{мп};$$

$$W(p)_{p.c.} = \frac{K_{эу} * K_{ум} * K_{дв} * K_{мп}}{p(T_{ум} * p + 1)(T_{дв} * p + 1)},$$

при условии, что $K = K_{эу} * K_{ум} * K_{дв} * K_{мп}$, передаточная функция будет иметь вид:

$$W(p)_{p.c.} = \frac{K}{p(T_{ум} * p + 1)(T_{дв} * p + 1)}.$$

Найдем передаточную функцию замкнутой системы:

$$W(p) = \frac{W(p)p.c.}{1 + W(p)p.c.*W_{\text{дос}}(p)},$$

$$W(p) = \frac{\frac{K}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1)}}{1 + \frac{K}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1)}*K_{\text{дос}}} = \frac{\frac{K}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1)}}{\frac{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1) + K*K_{\text{дос}}}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1)}} = \frac{K}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1) + K*K_{\text{дос}}}.$$

Передаточная функция замкнутой системы привода главного движения станка:

$$W(p) = \frac{K}{p(T_{\text{ум}}*p+1)(T_{\text{дв}}*p+1) + K*K_{\text{дос}}}.$$

3.4 Устойчивость систем автоматического управления мехатронными модулями

Устойчивость САУ является одним из важнейших условий ее работоспособности. Это понятие включает в себя требование затухания переходных процессов во времени. Система с расходящимся переходным процессом является неработоспособной.

Рассмотрим применение критерия устойчивости Гурвица и критерий устойчивости Михайлова.

Критерий устойчивости Гурвица - это *алгебраический критерий*, по которому условия устойчивости сводятся к выполнению ряда неравенств, связывающих коэффициенты уравнения системы.

Пусть характеристическое уравнение линейной системы в развернутой форме имеет вид:

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n = 0.$$

Необходимым условием устойчивости САУ является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения.

Однако в общем случае положительность коэффициентов уравнения недостаточна для устойчивости системы. В самом деле, положительные коэффициенты уравнения могут получиться и при положительных вещественных частях комплексных корней. Но все вещественные корни при положительных коэффициентах уравнения будут обязательно отрицательными.

Приведем теперь критерий устойчивости Гурвица. Он формулируется следующим образом: **Для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы были положительными n главных определителей следующей матрицы коэффициентов характеристического уравнения данной системы:**

$$\Delta_n = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}$$

В первой строке матрицы пишутся коэффициенты с нечетными индексами, во второй — с четными. Концы строк заполняются нулями, так чтобы матрица имела n столбцов, где n — порядок уравнения системы. Третья и четвертая строки получаются сдвигом первых двух на одно место вправо и т.д. Формируется квадратная матрица Гурвица размером $n \times n$.

Развернем критерий Гурвица для нескольких конкретных значений n .

Для $n = 1$

$$a_1 p + a_0 = 0$$

И условия устойчивости сводятся к неравенствам:

$$a_1 > 0; a_0 > 0.$$

Для $n = 2$

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & 0 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}$$

Условия устойчивости:

$$a_2 > 0; a_1 > 0; a_0 > 0.$$

Если определитель $\Delta_n=0$, то система находится на границе устойчивости. Возможны два случая:

1. апериодическая граница устойчивости, если свободный член характеристического уравнения равен нулю, что соответствует нейтрально устойчивой системе;

2. колебательная граница устойчивости, если определитель $D_{n-1}=0$.

Из условия $D_{n-1}=0$ можно определить параметры, при которых система находится на границе устойчивости.

Для $n = 3$

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}$$

Условия устойчивости: $\Delta_1 > 0$.

Для $n = 4$

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0$$

Условия устойчивости, получаемые из критерия Гурвица, как видно из изложенного, усложняются с ростом порядка системы. При этом для систем достаточно высокого порядка оказывается затруднительным выяснять влияние на устойчивость системы значений отдельных параметров звеньев, входящих в состав коэффициентов уравнения. Это связано с тем, что, как правило, одни и те же параметры одновременно входят в несколько коэффициентов уравнения системы. Поэтому критерий Гурвица применяют только для систем невысокого порядка и прежде всего для анализа устойчивости, когда надо определить, устойчива ли система при известных значениях всех ее параметров. При решении задачи синтеза системы, когда требуется выбрать значения отдельных параметров системы, критерий Гурвица становится неудобным уже для систем выше четвертого порядка.

Пример:

Определение устойчивости по критерию Гурвица замкнутой САУ

Дано: Передаточная функция замкнутой САУ привода главного движения станка:

$$W(p) = \frac{K}{p(T_{ум} * p + 1)(T_{дв} * p + 1) + K * K_{дос}} \cdot$$

Значения коэффициентов:

K	T _{ум} , с	T _{дв} , с
100	0.1	0.5

Подставим в передаточную функцию данные, тогда передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = \frac{100}{p(0,1p+1)(0,5p+1)+100} = \frac{100}{0,05p^3+0,6p^2+p+100} \cdot$$

Характеристическое уравнение замкнутой САУ:

$$0,05p^3 + 0,6p^2 + p + 100 = 0.$$

Для системы третьего порядка главный определитель Гурвица имеет вид:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0,05 & 0 \\ 100 & 0,6 & 0 \\ 0 & 1 & 0,05 \end{vmatrix}.$$

Определитель диагонального минора имеет вид:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0,05 \\ 100 & 0,6 \end{vmatrix}.$$

Произведём вычисления:

$$\Delta_1 = 1(0,6 \cdot 0,05) - 100(0,05 \cdot 0,05) = -0,22;$$

$$\Delta_2 = 0,6 \cdot 1 - 0,05 \cdot 100 = -4,4.$$

Замкнутая система неустойчива, т.к. определители имеют отрицательное значение: $\Delta_1 = -0,22 < 0$, $\Delta_2 = -4,4 < 0$.

Частотный критерий устойчивости Михайлова

Критерий устойчивости Михайлова - это *графический критерий*, по которому условия устойчивости сводятся к изображению характеристической кривой на комплексной плоскости.

Пусть левая часть характеристического уравнения, называемая характеристическим полиномом, имеет вид:

$$F(p) = a_0 p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$$

Подставим в этот полином вместо переменного p чисто мнимый корень, который в дальнейшем будем обозначать $j\omega$. Тогда получим функцию комплексного переменного:

$$F(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1} j\omega + a_n$$

которую можно так же, как амплитудно-фазовую характеристику, представить в виде суммы действительной и мнимой частей:

$$F(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$$

Действительная часть $P(w)$ содержит только четные степени переменного w :

$$P(w) = a_n - a_{n-2}w^2 + a_{n-4}w^4 - \dots$$

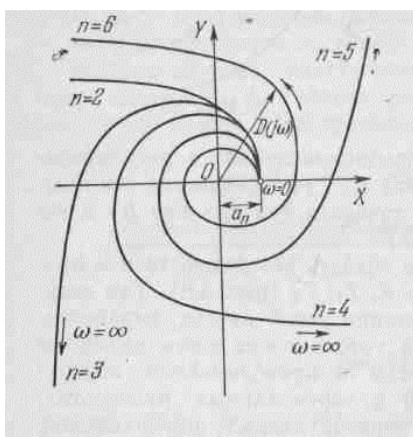
а мнимая часть $Q(w)$ — только нечетные:

$$Q(w) = a_{n-1}w - a_{n-3}w^3 + a_{n-5}w^5 - \dots$$

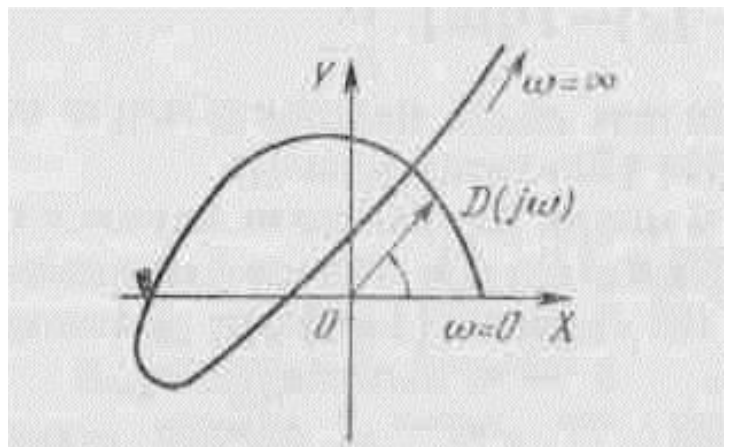
Каждому фиксированному значению переменного w соответствует комплексное число, которое можно изобразить в виде вектора на комплексной плоскости. Если теперь изменять параметр w от 0 до ∞ , то конец вектора $F(jw)$ опишет некоторую линию, которая называется характеристической кривой или годографом Михайлова. По виду этой кривой можно судить об устойчивости системы.

Формулировка критерия Михайлова:

Разомкнутая система будет устойчива, если годограф вектора Михайлова (при $w = 0$), начиная своё движение с положительной действительной полуоси комплексной плоскости, двигаясь против часовой стрелки и нигде не обращаясь в нуль, последовательно обходит столько квадрантов комплексной плоскости, каков порядок исходного характеристического уравнения замкнутой системы, и уходит в последнем квадранте в бесконечность.



САУ – устойчивы



САУ - неустойчива

Рисунок 3.16 – Годограф Михайлова

Пример:

Проверка САУ на устойчивость с помощью частотного критерия

Михайлова

Характеристическое уравнение замкнутой САУ:

$$0,05p^3 + 0,6p^2 + p + 100 = 0.$$

Амплитудо-фазовая характеристика замкнутой системы:

Заменяем p на $j\omega$:

$$F(j\omega) = -0,05j\omega^3 - 0,6\omega^2 + j\omega + 100$$

Вещественная частотная характеристика:

$$P(\omega) = 100 - 0,6\omega^2,$$

Мнимая частотная характеристика:

$$jQ(\omega) = \omega - 0,05\omega^3.$$

Построим годограф Михайлова (Амплитудо-фазовая характеристика):

ω	$P(\omega)$	$jQ(\omega)$
0	100	0
0,5	99,85	0,49375
1	99,4	0,95
1,5	98,65	1,33125
2	97,6	1,6
2,5	96,25	1,71875
3	94,6	1,65
3,5	92,65	1,35625
4	90,4	0,8
4,5	87,85	-0,05625
5	85	-1,25
5,5	81,85	-2,81875
6	78,4	-4,8
6,5	74,65	-7,23125
7	70,6	-10,15
7,5	66,25	-13,5938
8	61,6	-17,6
8,5	56,65	-22,2063
9	51,4	-27,45
9,5	45,85	-33,3688
10	40	-40

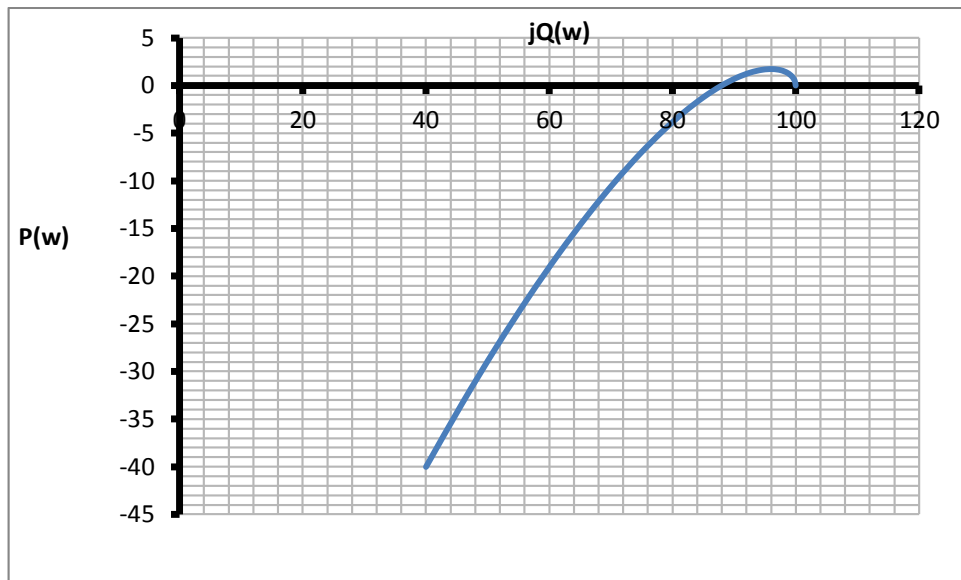


Рисунок 3.17 – Амплитудно-фазовая характеристика

Линейная система n -ного порядка устойчива, если кривая Михайлова охватывает начало координат и последовательно проходит n квадрантов. **Наша система неустойчива, т.к. кривая не охватывает начало координат.**

Вопросы для самопроверки

1. Какова передаточная функция апериодического звена первого порядка?
2. Какова передаточная функция интегрирующего звена?
3. Какова передаточная функция апериодического звена второго порядка?
4. Какова передаточная функция колебательного звена?
5. Какова передаточная функция дифференцирующего звена?
6. Какова передаточная функция цепи последовательно соединённых звеньев?
7. Какова передаточная функция цепи параллельно соединённых звеньев?
8. Какова передаточная функция цепи с отрицательной обратной связью?
9. Объясните алгебраический критерий устойчивости Рауса-Гурвица.
10. Объясните частотный критерий устойчивости Михайлова.

Тема 4. Компьютерное моделирование в проектировании ММС

4.1 Программные средства, реализующие основные функции визуализации измеряемой и контролируемой информации, передачи данных и команд системе контроля и управления мехатронных модулей и систем

SCADA (аббр. от англ. *supervisory control and data acquisition*, *диспетчерское управление и сбор данных*) — программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте (мониторинг), а также возможного контроля и управления данным объектом.

1. Функции SCADA-систем

В названии SCADA присутствуют две основные функции, возлагаемые на системы этого класса:

- сбор данных о контролируемом процессе;
- управление технологическим процессом, реализуемое ответственными лицами на основе собранных данных и правил (критериев), выполнение которых обеспечивает наибольшую эффективность технологического процесса.

SCADA-системы обеспечивают выполнение следующих функций:

- Прием информации о контролируемых технологических параметрах от контроллеров нижних уровней и датчиков.
- Сохранение принятой информации в архивах.
- Обработка принятой информации.
- Графическое представление хода технологического процесса, а также принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме.
- Прием команд оператора и передача их в адрес контроллеров нижних уровней и исполнительных механизмов.

- Регистрация событий, связанных с контролируемым технологическим процессом и действиями персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание системы.
- Оповещение эксплуатационного и обслуживающего персонала об обнаруженных аварийных событиях, связанных с контролируемым технологическим процессом и функционированием программно-аппаратных средств АСУТП с регистрацией действий персонала в аварийных ситуациях.
- Формирование сводок и других отчетных документов на основе архивной информации.
- Обмен информацией с автоматизированной системой управления предприятием.
- Непосредственное автоматическое управление технологическим процессом в соответствии с заданными алгоритмами.

2. Особенности SCADA-систем как процесса управления

Процесс управления в современных SCADA-системах имеет следующие особенности:

- процесс SCADA применяется в системах, в которых обязательно наличие человека (оператора, диспетчера);
- процесс SCADA был разработан для систем, в которых любое неправильное воздействие может привести к отказу объекта управления или даже катастрофическим последствиям;
- оператор несет, как правило, общую ответственность за управление системой, которая при нормальных условиях только изредка требует подстройки параметров для достижения оптимальной производительности;
- активное участие оператора в процессе управления происходит нечасто и в непредсказуемые моменты времени, обычно в случае наступления критических событий (отказы, нештатные ситуации и пр.);

- действия оператора в критических ситуациях могут быть жестко ограничены по времени (несколькими минутами или даже секундами).

3. Основные требования к SCADA-системам

К SCADA-системам предъявляются следующие основные требования:

- надежность системы;
- безопасность управления;
- открытость, как с точки зрения подключения различного контроллерного оборудования, так и коммуникации с другими программами;
- точность обработки и представления данных, создание богатых возможностей для реализации графического интерфейса;
- простота расширения системы;
- использование новых технологий.

Требования безопасности и надежности управления в SCADA-системах включают:

- никакой единичный отказ оборудования не должен вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- никакая единичная ошибка оператора не должна вызвать выдачу ложного выходного воздействия (команды) на объект управления;
- все операции по управлению должны быть интуитивно-понятными и удобными для оператора (диспетчера).

4. Основные возможности современных SCADA-систем

Исходя из требований, которые предъявляются к SCADA-системам, большинству современных пакетов присущи следующие основные возможности:

- Автоматизированная разработка, позволяющая создавать ПО системы автоматизации без реального программирования.
- Средства сбора и хранения первичной информации от устройств нижнего уровня.

- Средства обработки первичной информации.
- Средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях.
- Средства хранения информации с возможностью ее постобработки (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных).
- Средства визуализации информации в виде графиков, гистограмм и т.п.

5. Структура (архитектура) SCADA-систем

Все современные SCADA-системы включают три основных структурных компонента.

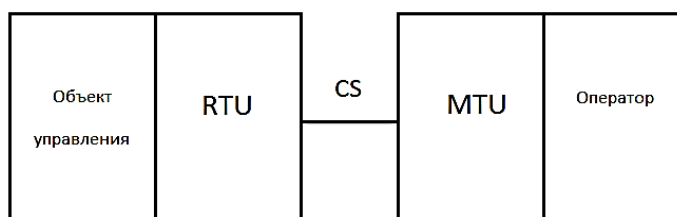


Рисунок 4.1 – Основные структурные компоненты SCADA-системы

Remote Terminal Unit (RTU) - удаленный терминал, осуществляющий обработку задачи (управление) в режиме реального времени.

Системы реального времени бывает двух типов: системы жесткого реального времени и системы мягкого реального времени. *Системы жесткого реального времени* не допускают никаких задержек.

Спектр воплощения RTU широк - от примитивных датчиков, осуществляющих съем информации с объекта, до специализированных многопроцессорных отказоустойчивых вычислительных комплексов, осуществляющих обработку информации и управление в режиме жесткого реального времени. Конкретная его реализация определяется конкретным применением. Использование устройств низкоуровневой обработки информации позволяет снизить требования к пропускной способности каналов связи с центральным диспетчерским пунктом.

Master Terminal Unit (MTU) - диспетчерский пункт управления (главный терминал); осуществляет обработку данных и управление высокого уровня, как правило, в режиме мягкого реального времени. Одна из основных функций - обеспечение интерфейса между человеком-оператором и системой. MTU может быть реализован в самом разнообразном виде - от одиночного компьютера с дополнительными устройствами подключения к каналам связи до больших вычислительных систем и/или объединенных в локальную сеть рабочих станций и серверов.

Communication System (CS) - коммуникационная система (каналы связи), необходима для передачи данных с удаленных точек (объектов, терминалов) на центральный интерфейс оператора-диспетчера и передачи сигналов управления на RTU.

6. SCADA как система диспетчерского управления

Как система диспетчерского управления SCADA может выполнять следующие задачи:

- взаимодействие с оператором (выдача визуальной и слуховой информации, передача в систему команд оператора);
- помощь оператору в принятии решений (функции экспертной системы);
- автоматическая сигнализация об авариях и критических ситуациях;
- выдача информационных сообщений на пульт оператора;
- ведение журнала событий в системе;
- извлечение информации из архива и представление ее оператору в удобном для восприятия виде;
- подготовка отчетов (например, распечатка таблицы температур, графиков смены операторов, перечня действий оператора);
- учет наработки технологического оборудования.

7. SCADA как часть системы автоматического управления

Основная часть задач автоматического управления выполняется, как правило, с помощью ПЛК, однако часть задач может возлагаться на SCADA. Кроме того, во многих небольших системах управления ПЛК могут вообще отсутствовать и тогда компьютер с установленной SCADA является единственным средством управления. SCADA обычно выполняет следующие задачи автоматического управления:

- автоматическое регулирование;
- управление последовательностью операций в системе автоматизации;
- адаптация к изменению условий протекания технологического процесса;
- автоматическая блокировка исполнительных устройств при выполнении заранее заданных условий.

8. Хранение истории процесса

Знание предыстории управляемого процесса позволяет улучшить будущее поведение системы, проанализировать причины возникновения опасных ситуаций или брака продукции, выявить ошибки оператора. Для создания истории система выполняет следующие операции:

- сбор данных и их обработка (цифровая фильтрация, интерполяция, сжатие, нормализация, масштабирование и т. д.);
- архивирование данных (действий оператора, собранных и обработанных данных, событий, алармов, графиков, экранных форм, файлов конфигурации, отчетов и т. п.);
- управление базами данных (реального времени и архивных).

9. Безопасность SCADA - системы

Применение SCADA в системах удаленного доступа через интернет резко повысило уязвимость SCADA к действиям враждебных лиц.

Пренебрежение этой проблемой может приводить, например, к отказу в работе сетей электроснабжения, жизнеобеспечения, связи, отказу морских маяков, дорожных светофоров, к заражению воды неочищенными стоками и т.п. Возможны и более тяжелые последствия с человеческими жертвами или большим экономическим ущербом. Для повышения безопасности SCADA используют следующие методы:

- разграничение доступа к системе между разными категориями пользователей (у сменного оператора, технолога, программиста и директора должны быть разные права доступа к информации и к модификации настроек системы);
- защиту информации (путем шифрования информации и обеспечения секретности протоколов связи);
- обеспечение безопасности оператора благодаря его отдалению от опасного управляемого процесса (дистанционное управление). Дистанционный контроль и дистанционное управление являются типовыми требованиями Ростехнадзора и выполняются по проводной сети, радиоканалу (через GSM- или радиомодем), через интернет и т.д.;
- специальные методы защиты от кибер-атак;
- применение межсетевых экранов.

10.Инструментальные свойства SCADA- системы

К инструментальным относятся свойства SCADA, влияющие на эффективность работы системных интеграторов:

- быстрота разработки проекта;
- легкость освоения;
- поддерживаемые средства коммуникации;
- наличие функций для сложной обработки данных;
- наличие языков МЭК 61131-3 и универсального алгоритмического языка типа Visual Basic;

- степень открытости для разработчика (поддержка COM и ActiveX для подключения программных модулей пользователя, а также OPC, ODBC, OLE DB;
- качество технической документации (полнота, ясность изложения, количество ошибок);
- наличие режима эмуляции оборудования для отладки;
- наличие внутренних графических редакторов, позволяющих отказаться от применения внешних редакторов типа CorelDraw или Photoshop; поддержка типовых графических форматов файлов;
- качество технической поддержки (время реакции на вопросы пользователей, наличие "горячей линии" технической поддержки).

SCADA используют языки программирования МЭК 61131-3, ориентированные на технологов, которые дополняются функциями, специфическими для SCADA. Большинство SCADA имеют встроенный редактор и интерпретатор языка Visual Basic фирмы Microsoft.

11. Эксплуатационные свойства SCADA - системы

Качество SCADA в процессе эксплуатации оценивается конечными пользователями и характеризуется следующим набором свойств:

- нечувствительность к ошибкам пользователя, защищенность от вандалов и враждебных элементов, устойчивость к ошибкам в исходных данных;
- надежность;
- информационная защищенность;
- наличие средств сохранения данных при нештатных ситуациях, отключениях питания и сбоях;
- наличие автомата перезапуска системы при ее зависании или после прерывания питания;

- поддержка резервирования SCADA (операторской станции, сетевых серверов, клиентских рабочих станций, резервное копирование данных);
- поддержка переключения экранов с разной детализацией изображений; поддержка нескольких мониторов.

12. SCADA как открытая система. Степень открытости SCADA

Степень открытости очень сильно влияет на экономическую эффективность системы, однако это влияние носит случайный характер, поскольку зависит от степени использования свойств открытости в конкретном проекте.

Открытость для программирования пользователем SCADA обеспечивается возможностью подключения программных модулей, написанных пользователем или другими производителями. Это обычно достигается тем, что SCADA разрабатывается как контейнер для COM-объектов и ActiveX элементов. Совместимость с аппаратурой и базами данных других производителей достигается с помощью стандарта OPC, применением интерфейса ODBC или OLE DB. Открытость системы программирования достигается поддержкой языков МЭК 61131-3.

Особенно интересно с точки зрения открытости применение веб-интерфейса, поскольку он обеспечивает доступ к SCADA с любого компьютера из любой точки мира, независимо от аппаратной платформы, типа канала связи, операционной системы и используемого веб-навигатора.

13. Подсистема сигнализации

Возможности по предоставлению информации эксплуатационному персоналу об аварийных ситуациях и событиях обеспечиваются подсистемами сигнализации. Такие подсистемы - обязательный компонент любого SCADA-пакета, но механизмы их реализации различны.

В русском языке понятие «сигнализация» стоит рядом с понятием «тревога». Английским аналогом этих понятий является Alarm (аларм). В дальнейшем изложении материала по подсистемам сигнализации различных SCADA-пакетов авторами будет использоваться та терминология, которая одобрена их производителями при переводе документации на русский язык (iFIX – тревоги, InTouch – алармы).

Поддерживаемые типы алармов (тревог), приоритеты, возможности по фильтрации алармов (группировка), механизмы вывода информации об алармах, удобство конфигурирования системы алармов и т. п. - вот далеко не полный перечень характеристик подсистемы сигнализации.

Аларм (состояние тревоги) - это сообщение, формируемое системой управления и имеющее целью привлечь внимание оперативного персонала о возникновении ситуации, которая может привести к нарушению технологического процесса или более серьезным последствиям. Степень важности того или иного аварийного сообщения зависит от последствий, к которым может привести нарушение, вызвавшее данное аварийное сообщение. Наиболее важные аварийные сообщения могут потребовать вмешательства оперативного персонала. Поэтому для большинства аварийных сообщений, сформированных системой, требуется подтверждение (квитирование) их получения оператором/диспетчером.

Наряду с алармами в SCADA - системах существует понятие событий. Под **событием** следует понимать обычные статусные сообщения системы, не требующие подтверждения их получения и ответной реакции оператора. Обычно события генерируются при возникновении в системе определенных условий (регистрация оператора в системе, ввод информации оператором).

Причины, вызывающие состояние аларма, могут быть самыми разными:

- отказ аппаратных средств (датчиков, контроллеров, каналов связи);
- отказ технологического оборудования (насоса, электродвигателя и т. п.);

- выход параметров технологического процесса за заданные границы.
- Все SCADA - системы поддерживают алармы двух типов:

дискретные и аналоговые.

Дискретные алармы срабатывают при изменении состояния дискретной переменной (кран открыт/закрыт, насос включен/выключен). По умолчанию дискретный аларм может срабатывать при переходе на **1 (ON)** или на **0 (OFF)**, в зависимости от конкретного SCADA - пакета.

Аналоговые алармы базируются на анализе выхода значений переменной за указанные верхние и нижние пределы. Аналоговые алармы могут быть заданы в нескольких комбинациях:

- верхние пределы (предаварийный и аварийный);
- нижний пределы (предаварийный и аварийный);
- отклонение от заданного значения;
- скорость изменения параметра.

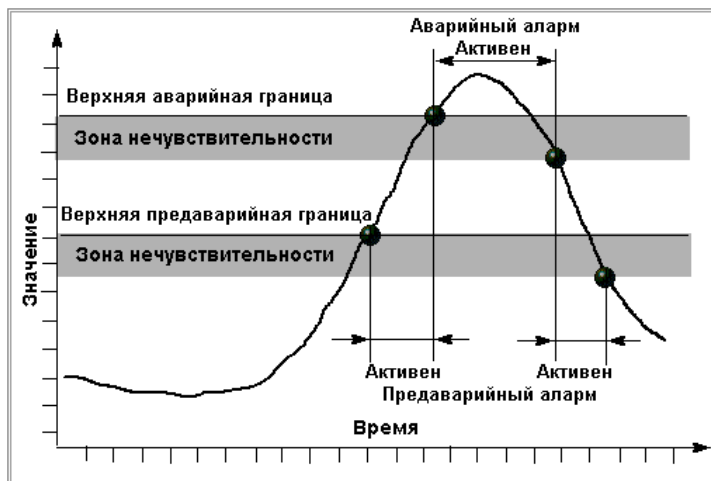


Рисунок 4.2 – Графическая интерпретация верхних предаварийного и аварийного алармов

Для выхода переменной из состояния аларма необходимо, чтобы ее значение стало меньше порогового на величину, называемую зоной нечувствительности. Аналогично можно интерпретировать нижние предаварийные и аварийные алармы.

Все вышеизложенное справедливо и для аларма типа «отклонение».

Заданное значение в ходе технологического процесса может изменяться либо оператором, либо программно (автоматически). Аларм «срабатывает» при выходе значения переменной за границу допустимого отклонения.

Алармы, определяемые скоростью изменения параметра, возникают в случае, если она становится больше (меньше) предельно допустимой. Понятие «зона нечувствительности» к алармам этого типа не применяется.

□ Важную роль в подсистеме алармов любого SCADA-пакета играют приоритеты. Приоритеты алармов могут быть использованы в различных целях: для определения способа вывода алармов (на принтер, в файл, в текущую сводку), для определения порядка их появления в окнах текущих алармов, для запуска скриптов, для определения действия, вызываемого срабатыванием аларма определенного приоритета (например, включение звукового сигнала) и т. п.

Как правило, важность приоритета уменьшается с увеличением его значения. Таким образом, приоритет с номером 1 - самый высокий. Например, если алармы с приоритетами от 1 до 10 должны выводиться на экран, то первыми будут выводиться алармы с приоритетом 1 в порядке их поступления, затем - алармы с приоритетом 2 и т. д. Количество значений (уровней) приоритетов в разных SCADA-пакетах различно (десятки и сотни).

□ Подсистема алармов предусматривает возможность классификации алармов по самым различным признакам: по аппаратам технологического процесса, по типу алармов, имени, приоритету и т. д. В зависимости от этого каждый аларм может быть отнесен к определенной группе (зоне, категории). Подобная **группировка** – удобный способ фильтрации алармов и их обработки (подтверждение, способ вывода, формат, цвет и т. п.).

□ Вывод информации об аварийных ситуациях реализуется различными способами. Ее можно выводить в специализированные окна операторского интерфейса в виде текущих и архивных сводок, записывать в

файлы, распечатывать на принтерах, предназначенных для вывода аварийных сообщений.

Кроме того, эту аварийную информацию можно отображать непосредственно на мнемосхемах интерфейса оперативного персонала:

- вывод в специальные текстовые поля;
- динамизация объектов (изменение цвета, мерцание и т.п.).

Формат вывода (информация, включаемая в аварийное сообщение) определяется на стадии проектирования. В строку аварийного сообщения можно включить текущую время и дату, тип аларма, его приоритет, имя переменной, ее текущее значение, зону нечувствительности, размерность, а также группу алармов и его состояние (подтвержден/неподтвержден). Для дискретных алармов можно создать поле **on (вкл.)/off (выкл.)**. Для алармов с метками времени в поле текущего времени можно выводить информацию с точностью до миллисекунд.

MM/DD	HH:MM:SS	EVT	Type	Operator	Pri	Name	GroupName	Value/Limit
MM/DD	HH:MM:SS	EVT	Type	Operator	Pri	Name	GroupName	Value/Limit
MM/DD	HH:MM:SS	EVT	Type	Operator	Pri	Name	GroupName	Value/Limit
MM/DD	HH:MM:SS	EVT	Type	Operator	Pri	Name	GroupName	Value/Limit
MM/DD	HH:MM:SS	EVT	Type	Operator	Pri	Name	GroupName	Value/Limit

Рисунок 4.3 – Пример формата вывода информации об алармах

14. Подсистема регистрации и архивирования

Представление данных в виде графиков (трендов) реализуется в современных SCADA-пакетах специальными подсистемами. К характеристикам таких подсистем можно отнести способы регистрации архивных данных, способы отображения трендов, удобство по конфигурированию трендов, возможности по переконфигурированию трендов в режиме Runtime, предоставляемый сервис при работе с архивными трендами, возможность построения графиков $y(x)$ и т. п.

Тренды реального времени (Real Time) отображают динамические изменения параметра в текущем времени (в темпе с протеканием

технологического процесса). При появлении нового значения параметра в окне тренда происходит прокрутка графика. Текущее значение параметра выводится, как правило, в правой части окна.

Исторические (Historical) **или архивные тренды** не являются динамическими и строятся на основе выборки архивных данных. Отображаемые значения переменных на архивных трендах неподвижны и могут быть отображены только на определенном выборкой отрезке времени.

При работе SCADA-системы в режиме Runtime (среда исполнения) производится запись значений переменных в регистрационные файлы.

Для записи значений переменных в регистрационный файл могут использоваться различные способы:

- регистрация при изменении переменной на величину, превышающую некоторый порог;
- периодически с заданной частотой.

Предпочтительна регистрация данных в несколько небольших по размеру файлов, чем в один большой файл, т. к. при этом проще осуществлять выборку данных для последующего анализа. Объем выборки для хранения в файлах задается в процессе конфигурирования системы временным периодом (от нескольких часов до недель).

Некоторые SCADA-пакеты используют круговую систему записи в файлы. При этом определяется количество файлов, продолжительность регистрации в каждый из них, время смены регистрационного файла. После того, как истечет время регистрации в последний файл, регистрация будет продолжена снова в первый файл, уничтожая при этом старую информацию.

Разновидностью кругового является метод, когда на стадии проектирования определяется количество файлов, продолжительность регистрации в каждый из них, а также длительность хранения архивных данных для каждого файла. По мере истечения срока хранения информации файлы автоматически уничтожаются, обеспечивая свободное дисковое пространство для вновь создаваемых регистрационных файлов.

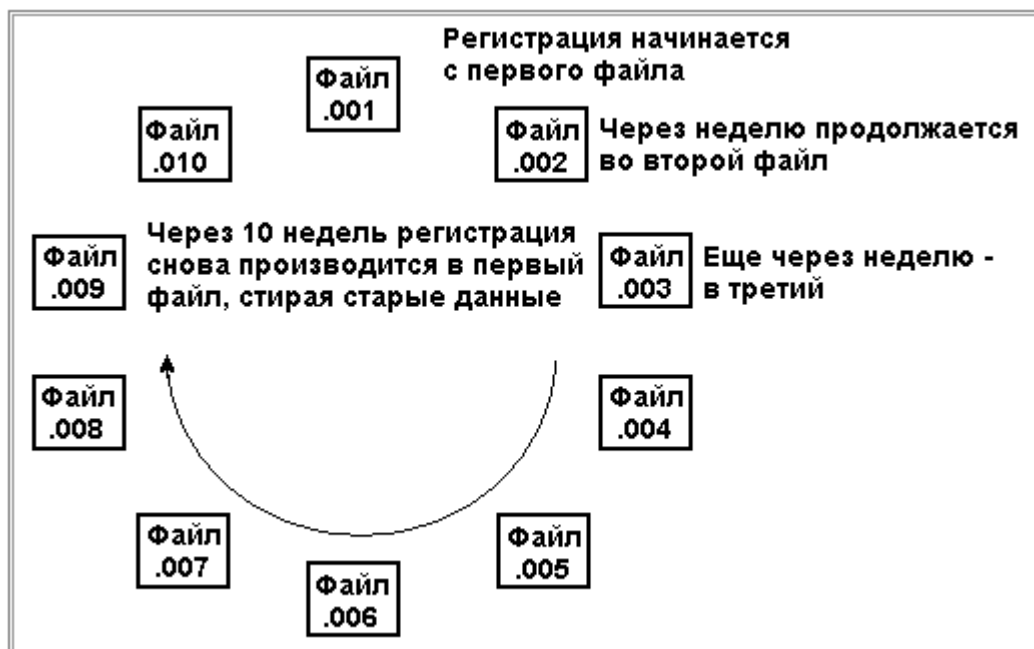


Рисунок 4.4 – Круговая система регистрации данных.

Для графического отображения информации SCADA-системы различных производителей предлагают два решения:

- использование двух различных инструментов для создания диаграмм под тренды реального времени и архивные тренды;
- единый инструмент для трендов реального времени и архивных трендов.

По числу перьев на одной диаграмме также возможны варианты. В одних SCADA-системах количество перьев на диаграмме задано жестко (4, 8, 16 перьев). Другие предлагают диаграммы на неограниченное количество перьев. Настройка диаграмм производится в специальных диалогах. Параметрами настройки могут быть диапазон времени, охватываемый трендом, частота вывода значений переменной (период обновления), разрешение сетки по горизонтальной и вертикальной осям. Могут настраиваться и параметры перьев: маркеры, стиль и толщина линии, цвет.

Возможность переконфигурирования перьев тренда в режиме Runtime – важная характеристика SCADA-пакета. Она закладывается на стадии проектирования с использованием различных методов: с помощью

встроенных функций, уникальных встроенных механизмов.

Удобным механизмом работы с диаграммой в режиме выполнения является отображение курсора времени (визира). В местах пересечения курсора с кривыми высвечиваются значение переменной и время, соответствующее этому значению. Полезной может оказаться и возможность вывода на одной диаграмме перьев с различными пределами отображаемых переменных и различными шкалами.

Для работы с архивными трендами производители SCADA-систем предлагают дополнительный сервис: возможность выделять различные участки диаграммы, увеличивать выделенные участки для детального анализа кривых, перемещаться вдоль архивного тренда и т. п.

15. Подсистема графический интерфейс SCADA. Разработка человеко-машинного интерфейса

Создание графических интерфейсов пользователя на компьютере явилось большим достижением в направлении развития средств диспетчерского управления. Главным эффектом от применения графического интерфейса является существенное снижение количества ошибок, допускаемых оператором (диспетчером) в стрессовых ситуациях при управлении производственными процессами. Проектирование пользовательского интерфейса основано на следующих принципах [[Wang](#)]:

- *узнаваемость*: назначение элементов экрана должно быть понятно без предварительного обучения, допустимые манипуляции с этими элементами также должны быть понятны интуитивно. Пользовательский интерфейс не должен содержать излишней детализации;
- *логичность*: пользователь, имеющий опыт работы с одной программой, должен быть способен быстро, практически без обучения, адаптироваться к любой аналогичной программе;
- *отсутствие "сюрпризов"*: знакомые из прошлого опыта операции с элементами на экране должны вызывать знакомые реакции системы;

- *восстанавливаемость*: система не должна быть чувствительна к ошибкам оператора. Оператор должен иметь возможность отменить любое свое неправильное действие. Для этого используются многократные подтверждения, отмены, возврат на несколько шагов назад, установка контрольных точек и т. п.;
- *наличие удобной справки*, подсказок, встроенных в пользовательский интерфейс, средств контекстного поиска и замены;
- *адаптация к опыту пользователя*: начинающий пользователь должен иметь более простой интерфейс с большим количеством подсказок. Для опытного пользователя количество подсказок должно быть уменьшено, поскольку они мешают в работе.

Качество отображения информации на мнемосхемах определяется характеристиками графических возможностей пакетов. К ним можно отнести графический редактор, возможность создания объемных изображений, наличие библиотек и разнообразие графических заготовок и готовых объектов, богатство инструментария, многообразие динамических свойств элементов мнемосхем, форматы импортируемых изображений, наличие инструментария для создания растровых рисунков, наличие и возможности многооконных режимов и т. п.

При создании компонентов операторских интерфейсов (например, мнемосхем) разработчику приходится использовать графические объекты, представляющие собой технологические аппараты (колонны, емкости, теплообменники и т. д.), участки трубопровода и такие устройства, как клапаны, насосы, электродвигатели, контроллеры, компьютеры и т. д. Как правило, это сложные объекты, полученные объединением множества простых объектов или рисунки типа **Bitmap**.

Создание каждого из этих объектов требует большого времени и может значительно затянуть разработку проекта. Для ускорения работы над проектом практически все SCADA-пакеты предлагает разработчику библиотеки готовых объектов, включающие сотни и тысячи графических

компонентов.

Теперь нет необходимости рисовать объект и терять драгоценное время, если подобный объект есть в библиотеке. Достаточно открыть библиотеку объектов щелчком по соответствующей иконке инструментария, выбрать раздел, затем - объект и вставлять его в любые окна разрабатываемого интерфейса. Операция вставки готового объекта занимает всего несколько секунд.

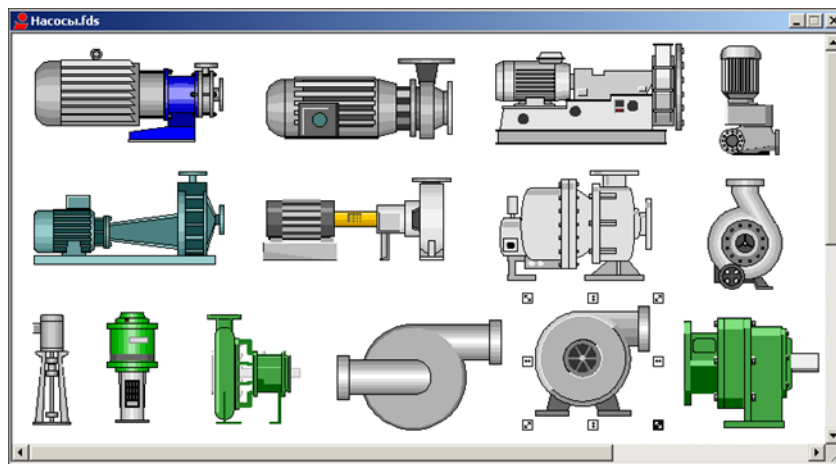


Рисунок 4.5 – Библиотека «Насосы» SCADA-пакета iFIX.

Часто при разработке графического интерфейса приходится создавать типовые группы объектов, предназначенные для решения конкретной задачи.



Например, группа из трех объектов (кнопка «ПУСК», кнопка «СТОП» и индикатор состояния - лампочка зеленого/красного цвета) предназначена для пуска/останова насоса, электродвигателя и т. д. с индикацией их состояния.

Каждый раз для решения этой задачи разработчику придется создавать эти три объекта и конфигурировать их (задавать динамические свойства). Но таких объектов в одном окне может оказаться несколько. Время специалиста в этом случае будет расходоваться неэффективно.

Для решения подобных задач SCADA-пакеты предлагают различные

решения:

- готовые сложные объекты с заданным набором динамических свойств, хранящиеся в специальных библиотеках;
- инструментарий для их создания с возможностью сохранения в библиотеке для многократного использования.

Разработчику надо лишь выбрать требуемый объект из библиотеки, вставить его в графическую страницу и в появившийся на экране диалог ввести имя/имена переменной/переменных.

В SCADA-системах различных производителей набор динамических свойств объектов достаточно типизирован. В режиме исполнения при определенных условиях объекты интерфейса могут:

- перемещаться (горизонтально, вертикально);
- изменять размеры (по горизонтали, по вертикали);
- заполняться цветом (по горизонтали, по вертикали);
- быть ползунковыми регуляторами (горизонтального или вертикального типа);
- появляться на экране и исчезать с него (видимость);
- мерцать;
- вращаться;
- изменять цвет.

Один и тот же объект может иметь набор различных динамических свойств. Комбинации этих свойств предоставляют возможность создавать на экране в режиме исполнения (**Runtime**) практически любые динамические эффекты, облегчая оператору/диспетчеру восприятие информации.

В целях унификации окон интерфейса оператора/диспетчера и сокращения сроков разработки проектов некоторые компании-производители SCADA снабжают свои пакеты программ шаблонами окон с возможностью их модификации и создания собственных шаблонов. Другие SCADA-системы предусматривают возможность импорта/экспорта окон из одних приложений в другие, что также существенно упрощает процесс разработки.

4.2 Программирование контроллеров по стандарту МЭК 61131-3

4.2.1 Язык релейных схем (LADDER DIAGRAM)

Язык лестничных диаграмм (LD), называемый также языком релейных схем, является наиболее простым для понимания и изучения. Синтаксис этого языка удобен для замены логических схем, выполненных на релейной технике. Язык ориентирован на инженеров по автоматизации, работающих на промышленных предприятиях.



Рисунок 4.6 – Синтаксис языка для замены логических схем, выполненных на релейной технике

Он обеспечивает наглядный интерфейс логики работы контроллера, облегчающий не только задачи собственно программирования и ввода в эксплуатацию, но и быстрый поиск неполадок в подключаемом к контроллеру оборудовании. Является самым распространённым языком программирования для ПЛК в США, очень широко распространен во всех странах мира. Программа на языке релейной логики имеет наглядный и интуитивно понятный инженерам-электрикам графический интерфейс, представляющий логические операции, как электрическую цепь с замкнутыми и разомкнутыми контактами. Протекание или отсутствие тока в этой цепи соответствует результату логической операции (*true* — если ток течет; *false* — если ток не течет).

Основными элементами языка являются контакты, которые можно образно уподобить паре контактов реле или кнопки. Пара контактов

отождествляется с логической переменной, а состояние этой пары — со значением переменной.

Рассмотрим конкретный пример. Предположим, что мы имеем некий гидравлический объект и хотим с помощью лампы сигнализировать, что он работает исправно, если выполняются следующие условия:

1. **Насос включен** (это сигнализируется вспомогательным контактом на пусковом устройстве насоса);

2. **Емкость заполнена маслом** (это сигнализируется специальным контактом датчика уровня, который замыкается, когда уровень масла достаточен);

3. **Давление масла соответствует норме** (это сигнализируется контактом датчика давления, который замыкается при соответствующем давлении).

При использовании обычных реле получим следующую релейную схему (рис. 4.7), где все контакты включены последовательно с лампочкой.

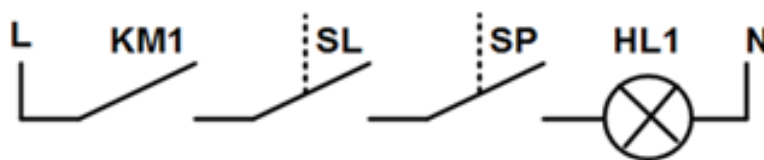


Рисунок 4.7 – Релейная схема гидравлического объекта

Теперь решим нашу задачу с помощью ПЛК. Воспользуемся простейшим ПЛК «LOGO! 230RC» фирмы «Сименс» с питанием 220В переменного тока с 8 дискретными входами и 4 дискретными выходами. Для него входным сигналом, соответствующим логической единице, является переменное напряжение 220В. Дискретными выходами данного ПЛК являются контакты внутренних реле с разрывной мощностью 10А при активной нагрузке.

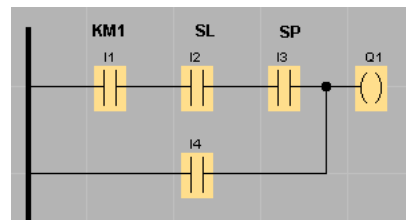
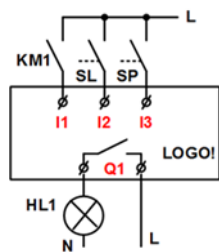


Рисунок 4.8 – Схема подключения ПЛК для управлением гидравлическим объектом

На рисунке 4.8 приведена схема подключения данного ПЛК (для упрощения не показана цепь питания ПЛК).

При замыкании всех контактов ток подается на катушку внутреннего реле Q1. Оно срабатывает, замыкает свой выходной контакт и сигнальная лампочка загорается.

Программу можно усложнить, добавив кнопку для проверки исправности сигнальной лампочки. При нажатии данной кнопки лампочка должна загореться. Это означает, что контакты кнопки должны быть включены параллельно контактам датчиков.

4.2.2 Язык функциональных диаграмм

В этом случае графическая программа состоит из функциональных блоков, соединений между ними и переменных соответствующих входам/выходам ПЛК. Программирование на этом языке представляет собой размещение (из специальных библиотек) на поле набора логических блоков («И», «ИЛИ», «НЕ», триггеров, таймеров, счётчиков, блоков обработки аналогового сигнала, блоков математических операций, блоков инициализации сетевого протокола) и установления связи между ними. Входом блока может являться вход ПЛК, внутренняя переменная ПЛК, константа, либо выход другого блока. Выходы блоков могут быть записаны во внутреннюю переменную ПЛК, поданы на входы других блоков, либо непосредственно на выходы ПЛК. Программа выполняется контроллером слева направо и сверху вниз, циклически (после выполнения последнего

блока, снова выполняется первый). FBD представление всегда получается нагляднее, чем в текстовых языках.

Рассмотрим построение программы FBD на примере простейшего примера. Предположим, что мы имеем некий гидравлический объект и хотим с помощью лампы сигнализировать, что он работает исправно, если выполняются следующие условия:

1. **Насос включен** (это сигнализируется вспомогательным контактом на пусковом устройстве насоса);

2. **Емкость заполнена маслом** (это сигнализируется специальным контактом датчика уровня, который замыкается, когда уровень масла достаточен);

3. **Давление масла соответствует норме** (это сигнализируется контактом датчика давления, который замыкается при соответствующем давлении).

Если обозначить как y сигнальную лампочку, a – контакт пускателя насоса, b – контакт датчика уровня масла, c – контакт датчика давления, то алгоритм работы нашего устройства будет описываться простейшей логической формулой: $y = a \cdot b \cdot c$. Это связано с тем, что все наши логические переменные связаны между собой условием «И», то есть логическим умножением. Соберем схему с ПЛК LOGO! и воспользуемся для построения программы инструментом LOGO!Soft Comfort.

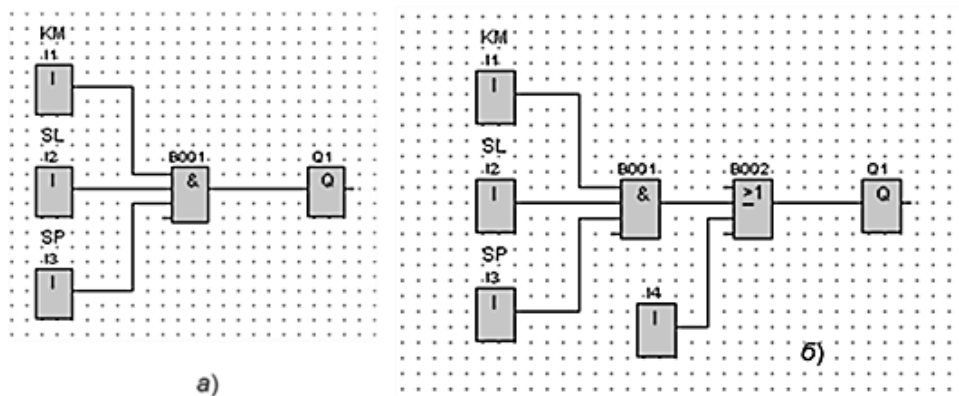


Рисунок 4.9 – Программа, построенная на основе логической формулы

На рисунке 4.9,а представлена программа, построенная на основе логической формулы $y = a \cdot b \cdot c$. Она состоит из трех входов (I1, I2 и I3), сигналы с которых поступают блок логического умножения (операция «И») и далее к выходу Q1. При наличии на всех трех входах логической единицы (переменного напряжения 220В) логическая единица поступает на реле выхода Q1 и его контакты замыкаются, зажигая контрольную лампочку.

Если нам нужно контролировать целостность контрольной лампочки, то программа несколько видоизменится (рис. 4.9,б). В этом случае лампочка должна загораться либо при срабатывании всех трех контактов датчиков *или* при нажатии на контрольную кнопку, подсоединенную к входу I4. Следовательно, обозначив как d сигнал с кнопки, получим новую логическую формулу: $y = (a \cdot b \cdot c) + d$. Программа, соответствующая данной логической формуле, показана на рис. 4.9,б, где добавляется блок логического сложения (операция «ИЛИ»), на который подаются сигналы с кнопки и с блока «И». При наличии на любом из них логической единицы она передается на выход Q1.

Таким образом, чтобы построить программу на языке FBD нужно иметь логическую формулу, описывающую алгоритм работы управляющего устройства.

4.2.3 Разработка дискретного автомата для управления двумя транспортерами

Рассмотрим пример построения программы ПЛК для типовой задачи автоматизированного электропривода, а именно, задачи управления двумя взаимосвязанными технологическими устройствами. Технологическая установка состоит из бункера-дозатора и раздаточного транспортера.

Каждое из устройств приводится в действие с помощью соответствующего трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором: М1 и М2. Общее включение и отключение всей системы производится с помощью кнопок «ПУСК» и «СТОП». Для

обеспечения нормальной работы транспортера необходимо, чтобы он включался раньше бункера-дозатора и сбрасывал весь оставшийся на нем материал. Аналогично, для предотвращения завалов необходимо, чтобы после выключения привода бункера-дозатора M2 транспортер отработал еще некоторое время для сброса материала.

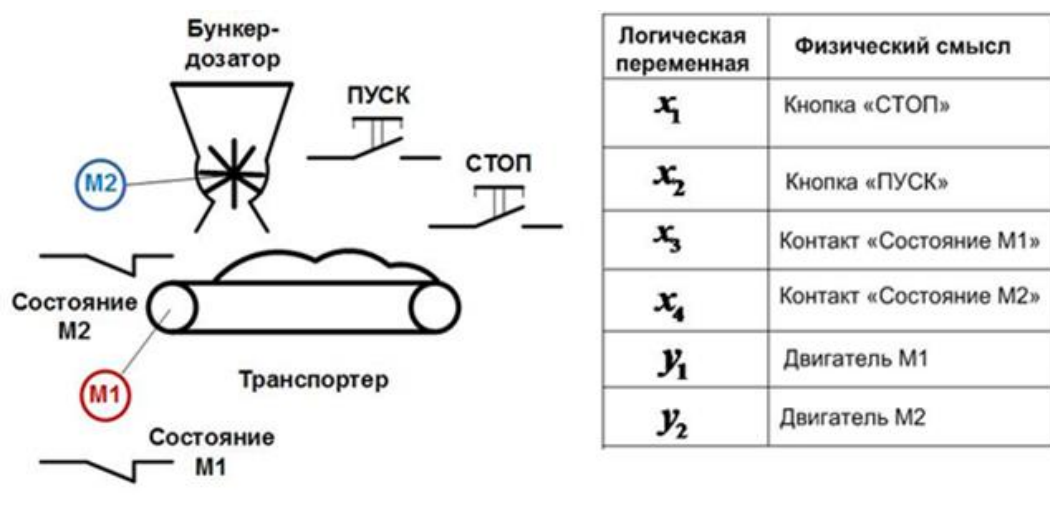


Рисунок 4.10 – Технологическая установка

Кроме этого, как известно, асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором весьма чувствительны к увеличению тока в обмотках статора. Для предотвращения выхода двигателя из строя, его необходимо защищать, то есть выключать, если ток в обмотке статора превышает заданное значение. Существует много типов устройств защиты электродвигателей, но в нашем случае выберем самые простейшие – штатные тепловые реле магнитного пускателя. Его контакты будут сигнализировать о работоспособности двигателя: если контакт теплового реле разомкнулся, то это сигнал о немедленном выключении соответствующего электродвигателя. Таким образом, в нашей системе имеется четыре входных логических сигнала и два выходных

Для реализации системы управления используем ПЛК «LOGO! 230RC» фирмы Siemens, а для включения электродвигателей – магнитные пускатели

КМ1 и КМ2. Принципиальная схема системы управления бункером и транспортером показана на рисунке 4.11.

Кнопка SB1 «Пуск» подключена ко входу I1, кнопка SB2 «Стоп» - к входу I2, а контакты тепловых реле КК1 и КК2 – ко входам I3 и I4, соответственно. К выходу Q1 ПЛК подключена катушка магнитного пускателя КМ1, управляющего двигателем транспортера, а к выходу Q2 – катушка магнитного пускателя двигателя бункера КМ2.

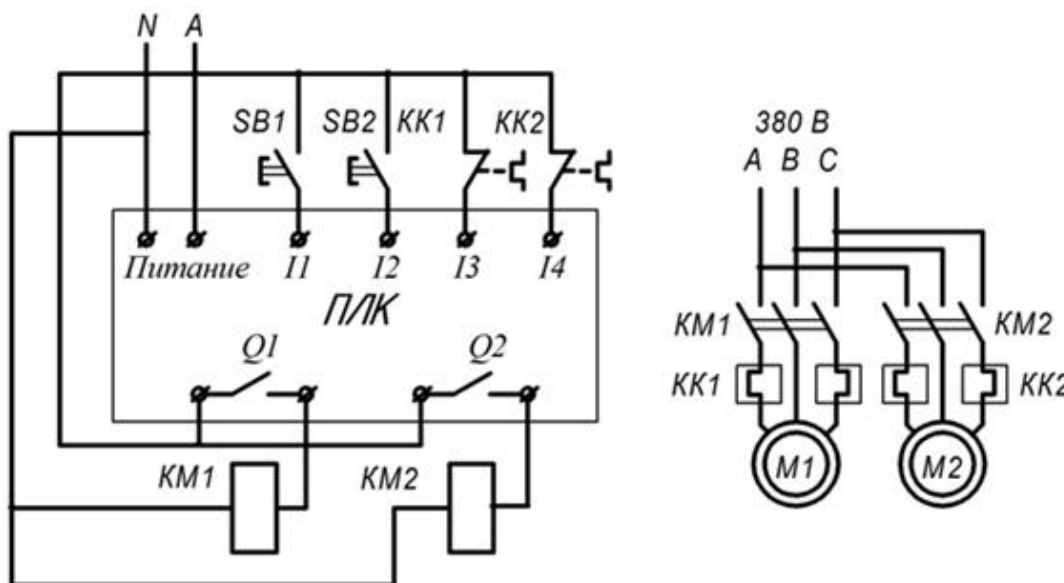


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема системы управления бункером и транспортером

Далее будем разрабатывать программу для ПЛК. Прежде всего, исходя из технологических требований, построим диаграмму состояний нашей системы управления.

В нашем случае имеется три устойчивых состояния двигателей:

- оба двигателя выключены;
- включен только двигатель транспортера М1;
- включены оба двигателя.

Между ними можно выделить четыре перехода нормальной работы:

Переход 1. Осуществляется при нажатии на кнопку «Пуск» SB1. В этом случае, если состояние двигателя нормальное (контакт теплового реле КК1 замкнут) происходит включение двигателя транспортера М1.

Переход 2. Осуществляется после определенной выдержки времени Т1. Здесь, если двигатель транспортера М1 включен и состояние двигателя бункера М2 нормальное (замкнут контакт теплового реле КК2) происходит включение двигателя бункера М2.

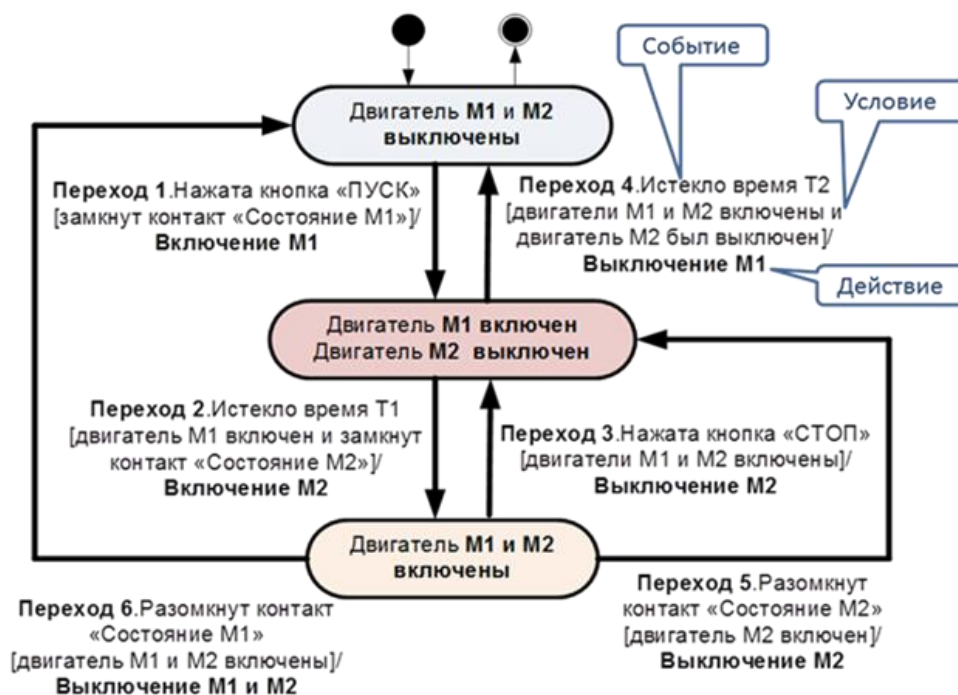


Рисунок 4.12 – Диаграмма состояний системы управления бункером и транспортером

Переход 3. Происходит после нажатия на кнопку «Стоп» SB2. В этом случае, если был включен двигатель бункера, то происходит его выключение, а двигатель транспортера остается включенным.

Переход 4. Осуществляется через некоторое время Т2 после срабатывания перехода 3. Здесь происходит выключение двигателя транспортера, и цикл работы системы заканчивается.

Два следующих перехода срабатывают при аварийных режимах работы:

Переход 5. Происходит при размыкании контакта КК2 теплового реле магнитного пускателя двигателя бункера. В этом случае двигатель бункера М2 выключается и далее инициируется переход 4.

Переход 6. Осуществляется при размыкании контакта теплового реле в цепи статора двигателя транспортера. В этом случае оба двигателя (транспортера и бункера) выключаются без выдержки времени.

На диаграммах состояния принято условия перехода указывать в квадратных скобках, а действия, выполняемые при этом описывать после знака «/».

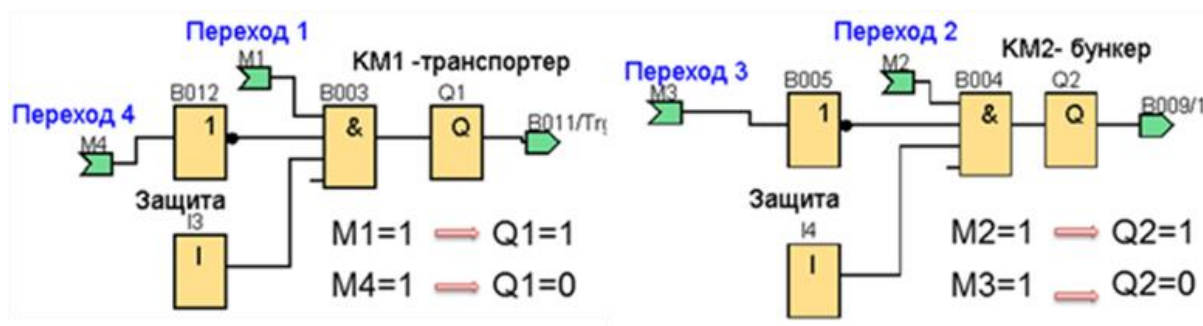


Рисунок 4.13 – Схема формирования переходов (M1, M4; M2, M3)

Нетрудно заметить, что срабатывание защиты электродвигателей, приводящее к их выключению ($Q1=0$ или $Q2=0$) происходит при изменении значения логических переменных x_3 и x_4 с логической 1 на логический 0 (размыкание контактов). Поэтому можно представить выходные величины y_1 и y_2 в следующем виде $y_1 = x_3 \cdot y'_1$; $y_2 = x_4 \cdot y'_2$, где y'_1, y'_2 - фиктивные логические переменные выхода при нормальном режиме работы. Для этого соответствующие выходы ПЛК Q1 и Q2 подключаются к блоку логического умножения «И».

При срабатывании защиты на вход I3 или I4 поступает логический 0 и соответствующий двигатель выключается.

Как следует из диаграммы состояния, двигатель транспортера (выход Q1) запускается переходом 1, а выключается переходом 4. Поэтому будем

использовать «материальное воплощение» перехода. Для этой цели воспользуемся блоками внутренних переменных (флажков) LOGO!. Блок M1 будет соответствовать переходу 1, блок M2 – переходу 2 и так. Логическая 1 на выходе этого блока будет свидетельствовать о том, что соответствующий переход сработал, а логический 0 – нет перехода. Таким образом, подключая выход блока памяти M1 к элементу «И» B003 мы обеспечиваем передачу логической 1 на выход Q1, когда сработает первый переход. Поскольку переход 4 должен выключать двигатель, когда сигнал с M4 будет равен логическому 0, то мы подадим его через инвертор B012. Аналитически «силовую часть» программы для выхода Q1 (двигателя транспортера) можно записать как $Q1 = x_3 \cdot M1 \cdot \overline{M4}$. Аналогичным образом поступаем и для выхода Q2 (двигатель бункера).

Схемы на рисунке 4.13 представляют единую программу, которая для удобства описания разделена на две части. Зеленые розетки и вилки показывают с какого элемента, на какой подаются сигналы.

Поскольку входы I1 и I2 подключены к кнопкам, то для их фиксации используются RS-триггеры B001 и B002. Первый переход (M1) формируется весьма просто: при нажатии кнопки «Пуск» логическая единица передается на вход S триггера B001, который устанавливается в 1 и передает её на блок M1. Сброс этого триггера и, соответственно, блока M1 в логический 0 происходит при срабатывании перехода 4 (выключению двигателя транспортера) подачей 1 на вход триггера R логической 1.

Переход 2 (включение двигателя бункера) осуществляется следующим образом. Сигнал с выхода Q1 подается на таймер «Задержка включения» B011. При включении двигателя транспортера (логическая 1 на выходе Q1) запускается таймер B011 и через промежуток времени T1 передает логическую единицу на блок M2, включая тем самым двигатель бункера.

Переход 3 (выключение двигателя бункера) инициируется подачей логической единицы с кнопки «Стоп» на вход S триггера B002. Далее это логическая единица поступает на блок M2.

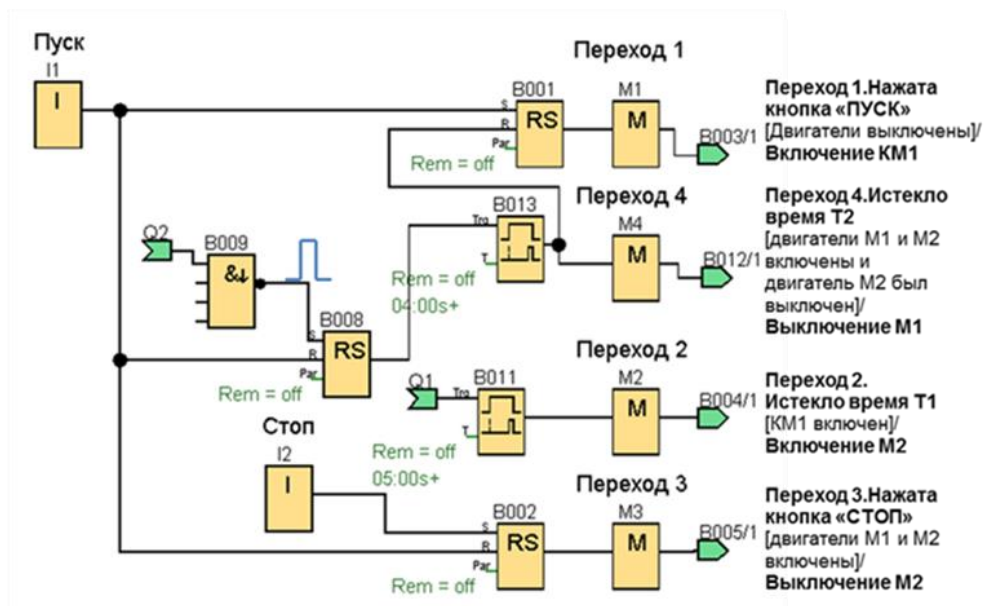


Рисунок 4.14 – Схема формирования переходов (M1 – M4)

Переход 4 должен инициироваться выключением двигателя бункера ($Q2=0$). Чтобы засечь выключение этого двигателя, то есть момент перехода $Q2$ с 1 на 0 будем использовать блок «И-НЕ с управлением по фронту» B009. Этот блок выдает короткий импульс, если один из его выходов меняет своё значение с 1 на 0. Далее этот импульс фиксируется RS-триггером B008. Единица с триггера запускает таймер «Задержка включения» B013, к выходу которого подключен блок памяти M3. Сброс триггеров B002 и B008 происходит при нажатии кнопки «Пуск».

Главным требованием при разработке программы для ПЛК является обеспечение её «прозрачности», то есть пониманию любым специалистом.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные функции SCADA-систем.
2. Перечислите основные структурные компоненты SCADA-системы.
3. Какие задачи выполняет система диспетчерского управления SCADA?
4. Перечислите инструментальные свойства SCADA- системы.
5. Какие языки программирования используют в SCADA-системах?
6. Объясните функции графического интерфейса SCADA-систем

Список литературы

1. Гидравлика, пневматика и термодинамика : курс лекций / под общ. ред. В.М. Филина. — М. : ИД «ФОРУМ» : ИНФРА-М, 2018. — 318 с. — (Среднее профессиональное образование).

Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/957143>

2. Грабченко А.И., Клепиков В.Б., Доброскок В.Л., Крыжный Г.К., Анищенко Н.В., Кутовой Ю.Н., Пшеничников Д.А., Гаращенко Я.Н., Введение в мехатронику: Уч. пособие — Х.: НТУ "ХПИ", 2014. — 274 с.

3. Динамика мехатронных систем / Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. — Новосиб.: НГТУ, 2014. — 176 с.: ISBN 978-5-7782-2415-5

Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/546220>

4. *Шишмарёв, В. Ю.* Автоматика : учебник для среднего профессионального образования / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2017. — 284 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-05168-1. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://biblio-online.ru/bcode/409032>

5. «Пневмоавтоматика – основной курс TP101»: учебник – Festo didactic GmbH & Co