

Министерство образования и науки Хабаровского края  
Краевое государственное автономное  
профессиональное образовательное учреждение  
«Губернаторский авиастроительный колледж г. Комсомольска – на - Амуре  
(Межрегиональный центр компетенций)»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ ПО  
МДК.1.1 СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ПМ.01. ВЫПОЛНЕНИЕ МОНТАЖА ПРИБОРОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ  
СИСТЕМ АВТОМАТИКИ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ОХРАНЫ  
ТРУДА И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ  
15.01.31 МАСТЕР КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ПРИБОРОВ И АВТОМАТИКИ

Комсомольск 2024

Носкова Е.Д. Учебное пособие по выполнению практических работ по МДК.1.1 Средства автоматизации и измерения технологического процесса ПМ.01. Выполнение монтажа приборов и электрических схем систем автоматики в соответствии с требованиями охраны труда и экологической безопасности Пособие для студентов специальности 15.01.31 Мастер контрольно-измерительных приборов и автоматики /Е.Д. Носкова. – Губернаторский авиастроительный колледж г. Комсомольска –на – Амуре, 2024-58 с.

Представленное учебное пособие представляет собой практический материал по системам автоматики для студентов специальности 15.01.31 Мастер контрольно-измерительных приборов и автоматики

Учебный материал изложен в доступной для понимания и выполнения студентов НПО форме.

## ВВЕДЕНИЕ

Основной формой производства становится комплексно-автоматизированное и высокомеханизированное производство, не только массовое, но и серийное. Любые неавтоматизированные процессы следует рассматривать как вынужденное решение, когда в условиях конкретного производства еще не возникли технические и экономические условия для автоматизации. Источниками технического, экономического и социального эффекта при внедрении автоматизации являются: 1- повышение качества продукции; 2- повышение производительности; 3- сокращение ручных работ и трудоемкости обслуживания.

Для непрерывного производства основной источник экономического эффекта - улучшение качества продукции, а для дискретного - повышение производительности машин. Неавтоматизированное производство имеет низкий потенциал вследствие своей невысокой интенсивности, отсутствия концентрации операций, их совмещения во времени.

Основное направление комплексной автоматизации – это создание процессов, где присутствие человека исключено, а не в том, чтобы высвободить людей с ручных операций. При этом создаваемые автоматы не должны имитировать ручные действия человека при манипулировании или управлении машинами.

В стратегическом плане автоматизацией целесообразно заниматься там, где можно добиться эффекта вследствие применения прогрессивной технологии. При этом целесообразно руководствоваться рядом принципов технической политики:

Современное состояние и ближайшие перспективы автоматизации в машиностроении связаны, прежде всего, с переходом от создания отдельных машин и агрегатов к разработке систем автоматических машин, охватывающих различные стадии производственного процесса – от заготовительных до сборочных, с оптимизацией технических решений. Центр тяжести разработок переносится с массового на серийное производство с широким развитием автоматизации и механизации вспомогательных процессов, причем автоматизации не только технологических операций, но и функций управления.

Комплексная автоматизация базируется на непрерывном совершенствовании технических средств (от простейших механизмов до сложных электронных систем; СПУ, электронных вычислительных и управляющих машин и др.); на широком использовании общности методов и средств автоматизации на различных стадиях производственного процесса, на применении методов унификации.

Развитие автоматизации на современном этапе характерно смещением центра тяжести разработок с массового на серийное производство, составляющую основную часть машиностроительной отрасли (около 80% всей машиностроительной продукции выпускается на заводах серийного и единичного производства).

Другая характерная особенность современной автоматизации – расширение арсенала технических средств и, как следствие, многовариантность решения задач автоматизации производственных процессов.

Стратегия комплексной автоматизации машиностроительного производства как основа технической политики определяется рядом аспектов, в том числе:

- 1) правильным пониманием содержания и основной направленности работ по автоматизации;
- 2) объективной оценкой во времени перспективности и целесообразности области применения новых методов и средств автоматизации, их состоянием и взаимосвязью с известными, традиционными.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Практическая работа № 1 Исследование работы электропневматических приводных механизмов

Практическая работа № 3 Исследование работы приводных механизмов асинхронного трехфазного двигателя

Практическая работа № 4 Исследование элементов релейно-контактной аппаратуры

Практическая работа № 5 Изучение устройства и принципа действия пневматического регулятора

Практическая работа № 6 Изучение аппаратных и программных средств систем управления логическими контроллерами и сопрягаемыми с ними средствами автоматизации

Практическая работа № 7 Изучение основ управления шаговым двигателем, управление углом поворота вала, скоростью, направлением

Практическая работа № 8 Изучение основ управления асинхронным двигателем с помощью частотного преобразователя

Практическая работа № 9 Исследование работы асинхронного трехфазного двигателя

Практическая работа № 10 Исследования приборов для измерения температуры

Практическая работа 11 Снятие характеристик при измерении температуры с помощью термопреобразователя сопротивления

Практическая работа № 12 Снятие характеристик при измерении температуры с помощью термопреобразователя сопротивления

Практическая работа 15 Снятие статических характеристик и изучение принципа работы датчика температуры: бесконтактный пирометр

Практическая работа 16 Изучение принципа работы датчика температуры: термопара

Заключение

Список использованных источников

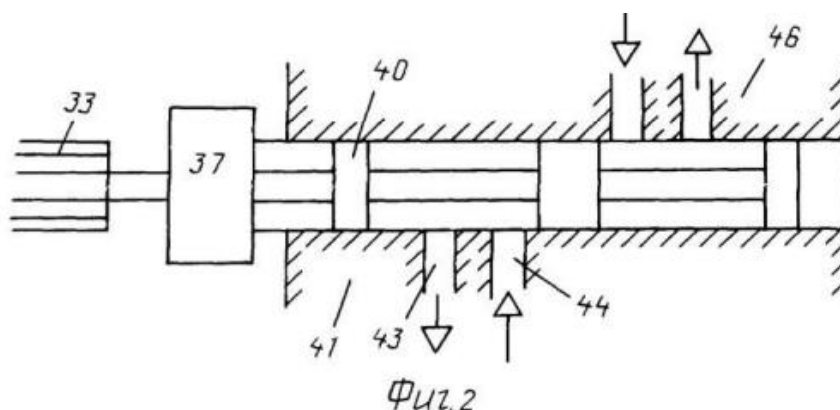
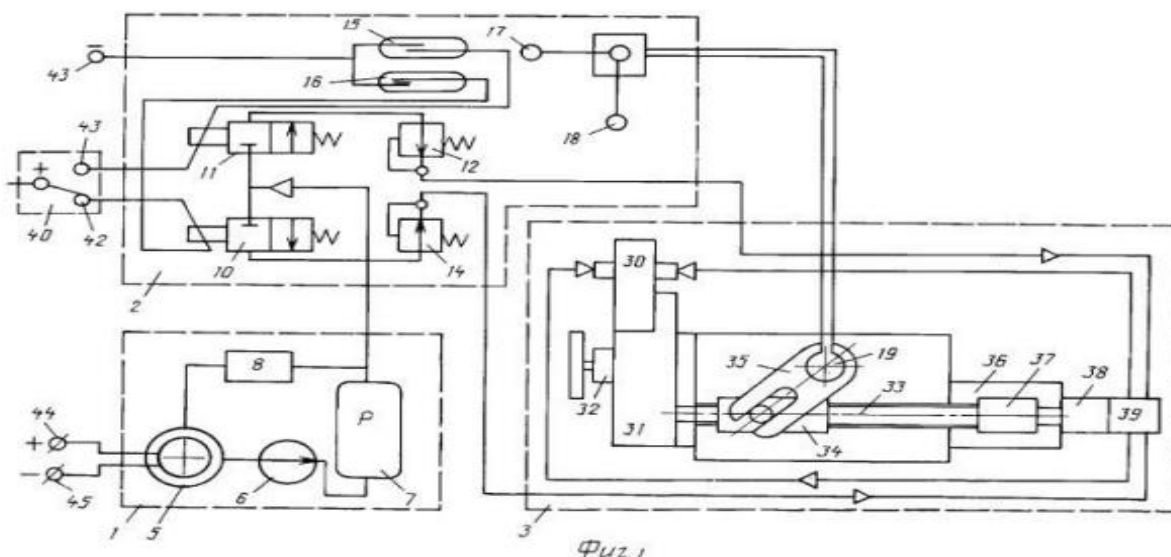
## Практическая работа № 1 Исследование работы электропневматических приводных механизмов

**Цель работы:** Приобретение обучающимися навыков чтения принципиальных пневматических и электрических схем систем управления приводом, а также их монтажа и наладки.

**Задание:**

1. Внимательно изучите и проанализируйте материал по теме.
2. Ответьте на вопросы (в письменной форме):
  - a. Назначение электропневматического привода.
  - b. Изучите схему электропневматического привода (Фиг.1, Фиг.2) и дайте описание его устройства.
  - c. К какой области техники относится данное изобретение.
  - d. Изучите виды электропневматических приводов предшествующих моделей, опишите их технические недостатки.
  - e. Перечислите технические задачи и их решение, которые были устранены в данной конструкции электропневматического привода.
  - f. Перечислите результаты, которые были достигнуты при применении данного типа электропневматического привода.
  - g. Составьте алгоритм работы электропневматического привода.

### Электропневматический привод для запорно-регулирующей арматуры газо-, нефте- и продуктопроводов



Привод предназначен для управления регулирующими органами арматуры, в частности шаровых кранов газопроводов. Привод содержит электропневматическое управляющее устройство, пневматический струйный двигатель, редуктор, кулисно-винтовой поворотный механизм. Привод содержит также компрессор, вход которого соединен с электродвигателем, а выход - с ресивером, выход которого соединен со входом электропневматического управляющего устройства.

#### Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к области пневмомашиностроения, в частности к механизмам, предназначенным для осуществления перестановки (поворота) затворов шаровых кранов при дистанционном и местном управлении.

### Предшествующий уровень техники

Известен пневматический привод с поршневым двигателем, содержащий пневмоцилиндры, поршни, поворотный механизм, конечные выключатели.

**Техническими недостатками** этого привода являются наличие второго рабочего тела (масла или специальной жидкости); наличие мягких подвижных трущихся уплотнений (поршневых колец), возможность несанкционированного поворота выходного вала привода (затвора шарового крана) под действием потока транспортируемого газа.

**Техническим недостатком привода** является также то, что рабочий газ, забираемый непосредственно из газопровода, после прохода через привод выбрасывается непосредственно в окружающую среду, что наносит ущерб экологии. Известен пневматический привод со струйным двигателем, содержащий электропневматическое управляющее устройство, струйный двигатель, редуктор, кулисно-винтовой поворотный механизм. Привод, в отличие от предыдущего, не требует второго рабочего тела, не имеет подвижных трущихся уплотнений. Основным его техническим недостатком, как и у предыдущего привода, является то, что выхлоп отработанного газа, также забираемого непосредственно из газопровода, происходит в окружающую среду, что наносит ущерб экологии окружающей среды.

Известен также электрогидравлический привод, содержащий поршневой гидравлический двигатель. Источник гидропитания представляет собой гидропневмоаккумулятор, содержащий две полости: одну, содержащую рабочую жидкость, вторую, содержащую сжатый газ (азот); гидронасос, приводимый в действие электродвигателем; систему управления источником питания и гидродвигателем.

**Техническими недостатками данного привода являются:**

- наличие двух рабочих тел, газа и жидкости;
- наличие подвижных трущихся уплотнений;
- наличие двух полостей с переменным объемом (газовой и гидравлической) и необходимость обеспечения герметичности переменной газовой полости при высоком давлении газа в ней (до 30 МПа);
- сложность системы управления приводом

### Раскрытие сущности изобретения

Технической задачей изобретения является: - создание экологически чистого привода для запорно-регулирующей арматуры газо-, нефте- и продуктопроводов; - расширение диапазона применения приводов как на газонапорных станциях, так и на магистральных газопроводах; - повышение надежности работы привода. Эта техническая задача решается тем, что в электропневматическом приводе, содержащем последовательно соединенные источник питания и исполнительный привод, выходной элемент которого соединен с входным элементом арматуры, источник питания выполнен в виде последовательно соединенных электродвигателя, пневмонасоса и ресивера, выход которого соединен со входом исполнительного привода, который выполнен в виде пневматического привода со струйным двигателем, содержащим последовательно соединенные электропневматическое управляющее устройство, струйный двигатель, механический редуктор с ручным дублером, кулисно-винтовой поворотный механизм, включающий в себя ходовой винт, соединенный с устройством поглощения кинетической энергии подвижных частей привода, кулису, вход которой связан через ходовую гайку с ходовым винтом, а выход - с выходным валом привода.

Эта техническая задача решается также тем, что привод снабжен устройством ограничения максимальной величины движущего момента привода.

Технический результат, достигаемый настоящим изобретением, состоит в следующем. Экологическая чистота привода обеспечивается за счет того, что рабочим телом привода является сжатый воздух. Расширение области применения приводов достигается за счет того, что рабочим телом привода является сжатый воздух, что позволяет применять привода как на магистральных газопроводах, так и в закрытых помещениях, не ухудшая состояния окружающей среды.

Повышение надежности работы электропневматического привода достигается за счет того, что исполнительный привод выполнен в виде пневматического привода со струйным двигателем, который не требует наличия второго рабочего тела (масла или специальной жидкости), не имеет подвижных трущихся уплотнений. Повышение надежности достигается также за счет того, что в восстанавливаемом источнике энергии емкость, содержащая рабочее тело (сжатый воздух), выполнена в виде ресивера (баллона). Повышение надежности электропневматического привода достигается за счет того, что источник питания выполнен в виде последовательно соединенных электродвигателя, пневмонасоса (компрессора) и ресивера, выход которого соединен со входом исполнительного привода, который выполнен в виде пневматического привода со струйным двигателем, содержащим последовательно соединенные электропневматическое управляющее устройство, струйный двигатель, механический редуктор с ручным дублером, кулисно-винтовой поворотный механизм, включающий в себя ходовой винт, соединенный с устройством поглощения кинетической энергии подвижных частей привода, кулису, вход которой через ходовую гайку связан с ходовым винтом, а выход - с выходным валом привода. Изобретение поясняется далее описанием примера осуществления со ссылкой на чертежи, где изображены:

на Фиг.1 - схема электропневматического привода;

на Фиг.2- схема устройства ограничения максимальной величины движущего момента привода.

**Электропневматический привод (Фиг.1)** содержит последовательно соединенные источник пневмопитания 1, электропневматическое управляющее устройство 2, пневматический привод со струйным двигателем 3. Источник питания 1 включает в себя последовательно соединенные электродвигатель 5, пневмонасос 6, ресивер 7, систему управления электродвигателем 8. Электропневматическое устройство управления 2 включает в себя электропневмоклапаны 10 и 11, регуляторы давления газа 12, 14, нормально замкнутые герконы 15, 16, постоянные магниты 17, 18, соединенные с выходным валом привода 19. Пневматический привод со струйным двигателем 3 включает в себя струйный двигатель 30, редуктор 31 с ручным дублером 32, ходовой винт 33, через ходовую гайку 34 соединенный с кулисой 35, устройство

поглощения кинетической энергии подвижных частей привода 36, содержащее упругий элемент 37, при этом ходовой винт 33 соединен через механическую передачу 38 с устройством ограничения движущего момента струйного двигателя 39 (Фиг.1, 2), выполненного в виде золотника 40, помещенного в гильзу 41 с окнами 43, 44, 45, 46, соединенным с входами в струйный двигатель. На Фиг.1 изображены также задающее устройство 40 с «ключом» 41, контактами 42, 43, клеммы внешней электросети 42, 43, 44, 45. Обозначено также давление  $P$  в ресивере 7.

Электропневматический привод работает следующим образом. В исходном положении электродвигатель 5 подключен к клеммам 44, 45, а ресивер 7 заполнен сжатым воздухом до давления  $P$ , и ключ 41 находится в среднем (нейтральном) положении. При повороте ключа на клемму 42 (как показано на Фиг.1) поступает электрический сигнал (напряжение), который подается на обмотку электропневмоклапан 10 и далее через нормально замкнутый геркон 16 на клемму 43.

В результате протекания тока по цепи срабатывает нормально закрытый электропневмоклапан 10 и открывает доступ сжатому воздуху из ресивера 7 через регулятор давления 14 и нормально открытый ограничитель движущего момента струйного двигателя 39 в двигатель 30. Ротор двигателя (не показан) начинает вращаться и через редуктор 31 передает вращение ходовому винту 33 и через ходовую гайку 34 поворачивает кулису 35 и через нее выходной вал привода 19. Одновременно с валом 19 поворачиваются постоянные магниты 17 и 18 (в данном случае - по часовой стрелке). При повороте вала 19 на  $90^\circ$  и посадке кулисы на механический упор магнит 18 подходит к геркону 16 и размыкает его контакты, разрывая электроцепь между клеммами 41 и 43. В результате электропневмоклапан 10 закрывается, прекращая доступ сжатого газа в струйный двигатель 30. При «посадке» кулисы на механический упор (не показан) ротор струйного двигателя и ходовой винт 33 продолжают вращаться по инерции. При этом ходовой винт перемещается в осевом направлении внутри неподвижной ходовой гайки и сжимает упругий элемент 37 до тех пор, пока вся кинетическая энергия подвижных частей не преобразуется в потенциальную энергию упругого элемента 37. Начальная сила поджатия упругого элемента 37 соответствует усилию на оси ходового винта 33, необходимому для создания требуемого движущего момента на выходном валу пневмопривода. Если по каким-либо причинам, например, вследствие нарушения работы регуляторов давления 12 и 14, струйный двигатель начинает развивать движущий момент больше допустимого, происходит дополнительное поджатие упругого элемента 37 и перемещение золотника 40, который перекрывает одно из окон, например, 45, что приводит к уменьшению подачи сжатого воздуха в двигатель 30, и тем самым к уменьшению величины движущего момента двигателя. При работе пневмопривода вследствие расхода газа в течение нескольких секунд происходит падение давления в ресивере 7. При этом система 8 управления электродвигателем 5 (устройство системы в заявку не входит) включает электродвигатель 5, который приводит в действие пневмонасос 6 (мини компрессор), который закачивает сжатый воздух в ресивер в течение времени между рабочими циклами пневмопривода до величины максимального давления, после чего система 8 отключает двигатель 5.

Таким образом, происходит восстановление энергосодержанием источника питания 1. Масса сжатого воздуха в ресивере при полном давлении обеспечивает 3-4-кратную перестановку регулирующего органа арматуры.

1. Электропневматический привод, содержащий последовательно соединенные источник питания и исполнительный привод, выходной элемент которого соединен с входным элементом арматуры, отличающийся тем, что источник питания выполнен в виде последовательно соединенных электродвигателя, пневмонасоса и ресивера, выход которого соединен со входом исполнительного привода, который выполнен в виде пневматического привода со струйным двигателем, содержащим последовательно соединенные электропневматическое управляющее устройство, струйный двигатель, механический редуктор с ручным дублиром, кулисно-винтовой поворотный механизм, включающий в себя ходовой винт, соединенный с устройством поглощения кинетической энергии подвижных частей привода, кулису, вход которой через ходовую гайку связан с ходовым винтом, а выход - с выходным валом привода.

2. Привод по п.1, отличающийся тем, что он снабжен устройством ограничения максимальной величины движущего момента привода.

## Практическая работа № 3

### Исследование работы приводных механизмов асинхронного трехфазного двигателя

Цель работы изучение работы АД с приводными механизмами.

Задание:

1. Внимательно изучите материал по теме.

2. Произведите выбор АД с приводным механизмом, обоснуйте выбор.

Электрический двигатель работает непосредственно с приводным механизмом. Поэтому выбор двигателя (в дальнейшем речь идет об асинхронных двигателях – АД) состоит в сопоставлении его свойств со свойствами приводного механизма и с параметрами окружающей среды. Основная задача: найти наиболее экономичный вариант функционирования системы «двигатель - приводной механизм» [1].

В таблице 1 указаны условия эксплуатации, параметры двигателя и приводного механизма, которые необходимо сопоставить при выборе двигателя.

| Условия эксплуатации                   | Параметры, характеризующие механизм и условия эксплуатации                                                                                 | Параметры двигателя                                                              | Комментарии по выбору двигателя                                                         |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид выполняемой работы                 | Нагрузочная диаграмма, режим работы, момент инерции механизма, механическая характеристика механизма                                       | Номинальная мощность, механическая характеристика, частота вращения              | Выбор типоразмера двигателя                                                             |
| Атмосферные воздействия                | Температура окружающей среды, влажность, атмосферное давление, загазованность, запыленность                                                | Номинальная мощность, степень защиты, покрытие, смазка                           | Уточнение номинальной мощности, выбор климатической модификации, степени защиты, смазки |
| Механические воздействия               | Способ сочленения двигателя с механизмом, механические воздействия со стороны фундамента и со стороны механизма                            | Допустимые нагрузки на подшипники, допустимые нагрузки на вал, вибростойкость    | Проверка механической прочности двигателя                                               |
| Установка                              | Требуемая точность установки, исполнение механизма по способу монтажа                                                                      | Точность выполнения установочных размеров, исполнение по способу монтажа         | Выбор исполнения по способу монтажа и точности установочных размеров                    |
| Подключение к сети                     | Напряжение и частота сети                                                                                                                  | Напряжение и частота сети                                                        | Выбор двигателя по напряжению и частоте сети                                            |
| Влияние на механизм и окружающую среду | Допустимые уровни шума и вибрации механизма, эстетические требования                                                                       | Уровни шума и вибрации двигателя, эстетический уровень                           | Выбор двигателя по уровням шума и вибрации                                              |
| Экономические показатели               | Стоимость отказа, длительность нагружения в год, коэффициент загрузки, стоимость электроэнергии, стоимость компенсации реактивной мощности | Надежность и долговечность, наличие встроенной защиты, КПД, коэффициент мощности | Сравнение вариантов по приведенным затратам                                             |

Двигатель выбирают:

- по номинальной мощности;
- по частоте вращения;
- по модификации;
- по условиям окружающей среды;
- по точности установочных и присоединительных размеров;
- по способу монтажа;
- по допустимой частоте пуска;
- по способу защиты;
- по уровню шума;
- по допустимым нагрузкам на подшипник;
- по основным техническим параметрам.

#### Выбор двигателя по номинальной мощности

Полученные значения мощности увеличивают до ближайшего каталожного значения номинальной мощности АД.

При этом, необходимо учитывать в каком режиме будет работать двигатель. На практике редко полностью совпадают режимы работы двигателя и приводного механизма. В зависимости от режима работы двигателя (S1-S8) его температурное состояние будет различным, а, следовательно, двигатель может допускать большую мощность на валу, например, в режиме S2, чем в режиме S1.

**Пример 1.** Выбрать двигатель для вентилятора, работающего в режиме S1 и имеющего следующие выходные параметры:

Расход воздуха  $Q$ , м³/с . . . . . 5  
 Давление на выходе  $P$ , Па . . . . . 1050  
 КПД . . . . . 0,78  
 Частота вращения  $n$ , об/мин . . . . . 1000

Необходимая мощность двигателя

$$P = \frac{QP}{1000\eta} = \frac{5 \cdot 1050}{1000 \cdot 0,78} = 6,73 \text{ кВт.}$$

Ближайший по мощности двигатель 4A132M6,  $P=7,5$  кВт,  $n=970$  об/мин.

**Пример 2.** Выбрать двигатель для кратковременного режима работы S2 при подъеме груза:

Масса груза  $m$ , кг . . . . . 8000  
 Коэффициент, учитывающий противовес,  $k$  . . . . . 0,5  
 Скорость подъема  $v$ , м/с . . . . . 0,1  
 Высота подъема  $h$ , м . . . . . 6,0  
 КПД подъемника . . . . . 0,8  
 Частота вращения двигателя  $n$ , об/мин . . . . . 1500  
 Время подъема  $t=h/v=60/0,1$ , с . . . . . 600  
 Коэффициент увеличения мощности  $K_p$  . . . . . 1,5

Мощность двигателя

$$P = \frac{mkgv \cdot 10^{-3}}{K_p \eta} = \frac{8000 \cdot 0,5 \cdot 9,8 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 0,8} = 3,27 \text{ кВт.}$$

Ближайший по мощности двигатель 4A100L4 ( $P=4,0$  кВт,  $n=1430$  об/мин).

Для расчета мощности, кВт, и вращающего момента, Н·м, на валу двигателя следует пользоваться формулами:

вращательное движение

$$P = \frac{Mn}{9,55} 10^{-3};$$

$$M = \frac{9,55}{n} P \cdot 10^3;$$

подъем груза

$$P = \frac{kgv}{\eta} 10^{-3};$$

привод вентилятора

$$P = \frac{QP}{\eta} 10^{-3},$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий действие противовеса;  $v$  — скорость подъема груза, м/с;  $Q$  — расход воздуха, м³/с;  $p$  — давление на выходе вентилятора, Па;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с²;  $\eta$  — КПД вентилятора, подъемника;  $m$  — масса, кг.

## Выбор двигателя по модификации

Согласно ГОСТ Р 51689-2000 модификация: «разновидность двигателя, создаваемая на основе двигателя, принятого за базовое исполнение, с целью расширения или специализации сферы его использования».

Двигатель, изготовленный на основе узлов основных (базовых) двигателей имеет необходимые конструктивные отличия по способу монтажа, степени защиты, климатическому исполнению и другими параметрам.

Создание двигателей с различной модификацией позволяет наиболее эффективное его использование в каждом конкретном случае применения. В таблице 2 даны различные варианты приводных механизмов с целью подбора требуемой модификации двигателя.

| Наименование механизмов                                | Кратность момента по отношению к статическому моменту механизма |                   | Характерные режимы работы | Характерная частота вращения, ч⁻¹ |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|                                                        | пускового                                                       | максимального     |                           |                                   |
| Насосы: центробежные, осевые, вакуум-насосы, поршневые | 0,3<br>0,3<br>1—1,5                                             | 1,5<br>1,4<br>2,0 | S1—S3                     | 1—30                              |
| Вентиляторы: центробежные, осевые, дымососы            | 0,3<br>0,5                                                      | 1,1—1,3<br>1,75   | S1                        | 1—6                               |
| Шнеки                                                  | 1—1,5;<br>2—3                                                   | 2—2,5;<br>2,5—3   | S1                        | 1—6                               |
| Манипуляторы, толкатели, кантователи                   | 2,5—3                                                           | 2,5—3             | S1—S5                     | 1—6                               |
| Задвижки                                               | 3—3,5                                                           | 3—3,5             | S1—S3                     | 6—30                              |
| Центрифуги, сепараторы                                 | 2,25                                                            | 2,25              | S1                        | 1—6                               |
| Машины барабанного типа                                | 1,25                                                            | 2,5               | S1—S4                     | 1—6                               |
| Компрессоры: лопаточные, объемные                      | 0,3<br>2—2,5                                                    | 1,5<br>2—2,5      | S1                        | 1—6                               |
| Подъемники                                             | 1,4                                                             | 1,4               | S2, S3, S6                | 30—200                            |
| Дробилки                                               | 1—1,5                                                           | 2,5               | S1, S2                    | 1—6                               |
| Буровые станки                                         | 1—1,5                                                           | 2,5               | S1                        | 1—6                               |
| Пилы                                                   | 1,0                                                             | 1,5               | S1, S3                    | 6—120                             |
| Вибраторы                                              | 2—2,5                                                           | 2—2,5             | S1—S3                     | 1—30                              |

| Наименование механизмов                        | Средняя продолжительность работы в год, ч | Мощность, кВт | Частота вращения, об/мин | Коэффициент загрузки по мощности | Рекомендуемая модификация |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Вибраторы                                      | 3000                                      | 0,1—50        | 3000, 1500, 1000         | 0,3—0,9                          | P                         |
| Кузнечно-прессовые машины (прессы, молоты)     | 500—3000                                  | 0,1—100       | 1500, 1000               | 0,25—0,9                         | C                         |
| Преобразователи энергии                        | 3000—8000                                 | 2—100         | 3000, 1500               | 0,8                              | A, B                      |
| Зачистные, шлифовальные, щеточно-мочные машины | 1500—5000                                 | 0,1—100       | 3000, 1500, 1000         | 0,7—0,9                          | A, B                      |
| Металлорежущие станки (главный привод)         | 1500                                      | 0,1—50        | 3000, 1500, 1000, MC     | 0,3—0,7                          | A, B, C                   |
| Прядильные машины                              | 3000—5000                                 | 0,1—30        | 3000, 1500               | 0,6—0,9                          | P                         |
| Ткацкие станки                                 | 3000—5000                                 | 0,2—30        | 1500, 1000               | 0,6—0,9                          | P                         |
| Питатели, дозаторы                             | 3000—8000                                 | 0,1—50        | 1500, 1000               | 0,7—0,9                          | C, P                      |
| Укладчики, штабелеры                           | 500—8000                                  | 0,1—5         | 1500, 1000, 750          | 0,7—0,9                          | A, C                      |

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения двигателей: А — базового ряда, В — встроенные, Р — с повышенным пусковым моментом, С — с повышенным скольжением, MC — многоскоростные.

|                                                         |               |         |                                    |         |      |
|---------------------------------------------------------|---------------|---------|------------------------------------|---------|------|
| Вентиляторы:<br><br>центробежные,<br>осевые<br>дымососы | 3000          | 0,1—100 | 3000,<br>1500,<br>1000,<br>750, МС | 0,7—0,9 | А    |
| Шнеки                                                   | 1000—<br>1500 | 0,1—300 | 1500,<br>1000                      | 0,7—0,8 | А, Р |
| Манипуляторы, тол-<br>катели, кантователи               | 500—<br>1500  | 0,1—30  | 1500,<br>1000, МС                  | 0,4—0,8 | А, С |
| Задвижки                                                | 500—<br>1000  | 0,1—10  | 1500,<br>1000, МС                  | 0,7—0,8 | А, С |
| Центрифуги, сепара-<br>торы                             | 500—<br>1000  | 0,1—300 | 1500,<br>1000                      | 0,8—0,9 | Р    |
| Машины барабан-<br>ного типа                            | 3000          | 0,1—100 | 1500,<br>1000                      | 0,7—0,9 | А, С |
| Компрессоры:<br><br>лопаточные<br>объемные              | 1500—<br>3000 | 0,1—300 | 3000,<br>1500                      | 0,7—0,9 | А, С |
| Подъемники                                              | 500—1500      | 0,1—50  | 1500,<br>1000,<br>750, МС          | 0,7—0,8 | А, С |
| Дробилки                                                | 1500          | 1—100   | 1500,<br>1000,<br>750              | 0,4—0,9 | А, Р |
| Буровые станки                                          | 3500          | 0,1—30  | 1500,<br>1000, 750                 | 0,4—0,8 | А, С |
| Пилы                                                    | 3000          | 1—20    | 3000,<br>1500,<br>1000, МС         | 0,7—0,9 | А    |

|                                                           |          |          |              |       |
|-----------------------------------------------------------|----------|----------|--------------|-------|
| Кузнечно-прессовые<br>машины (прессы, мо-<br>лоты)        | 2,75—3   | 2,75—3   | S3—S6        | 1—6   |
| Преобразователи энер-<br>гии                              | 0,5      | 1,5      | S1           | 1—6   |
| Зачистные, шлифо-<br>вальные, щеточно-мо-<br>счные машины | 0,5      | 1,5      | S1, S2       | 1—6   |
| Металлорежущие<br>станки (главный при-<br>вод)            | 1,2; 2,0 | 1,5; 2,5 | S1, S3<br>S6 | 1—6   |
| Прядильные машины                                         | 2,2—2,5  | 2,5—2,7  | S1           | 1—30  |
| Ткацкие станки                                            | 2,2—2,5  | 2,5—2,7  | S1           | 1—100 |
| Питатели, дозаторы                                        | 3—3,5    | 3—3,5    | S1—S3        | 1—30  |
| Укладчики, штабеле-<br>ры                                 | 1,5      | 2,5      | S1—S4        | 1—100 |

## Практическая работа № 4

### Исследование элементов релейно-контактной аппаратуры

**Цель работы:** Изучение видов релейно-контактной аппаратуры, устройства и принципа работы ее элементов

#### Задание:

1. Внимательно изучите материал по теме.
2. Ответьте на вопросы:
  - a. Общее назначение элементов релейно-контактной аппаратуры.
  - b. Перечислите электромеханические устройства, применяемые в системах автоматического регулирования.
  - c. Понятие «Электромагнитное реле».
  - d. Опишите назначение, устройство и принцип работы электромагнитного реле.
  - e. Опишите назначение, устройство и принцип работы теплового реле.
  - f. Область применения бесконтактных логических элементов.
  - g. Опишите назначение, устройство и принцип работы электромагнитного реле.
  - h. Причислите логические элементы, используемые в релейно-контактной аппаратуре. i. Опишите как обозначаются на схемах логические элементы и их состояния.

Во многих системах автоматического регулирования и управления систем ТГВ переключение отдельных цепей, их замыкание и размыкание выполняется с помощью электромеханических устройств: реле, контакторов, магнитных пускателей, автоматических воздушных выключателей. Автоматическое управление с применением реле, контакторов, магнитных пускателей, а также различных механических переключающих устройств называют релейно-контактным управлением. Замыкание или размыкание электрических цепей происходит в этом случае механическими контактами, которые приводятся в движение теми или иными способами.

Основу аппаратуры релейно-контактного управления составляют реле и контакторы. Применяются также магнитные пускатели – разновидности контакторов, а также автоматические воздушные выключатели – электромеханические устройства для нечастых включений и отключений электрических цепей и защиты их при коротких замыканиях и длительных перегрузках.

Электромагнитное реле – электромеханическое устройство, замыкающее или размыкающее электрические контакты под воздействием управляющего сигнала. Отечественной промышленностью выпускаются различные типы электромагнитных реле, отличающихся по конструкции, назначению и принципу действия.

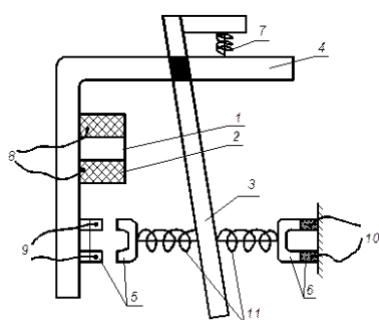


Рисунок 1- Конструкция электромагнитного реле

Электромагнитное реле состоит из сердечника 1 (рисунок 1), катушки 2, якоря 3, кронштейна 4, замыкающих и размыкающих контактов 5 и 6 и возвратной пружины 7. Выводы 8 катушки реле и контактов 9 и 10 подсоединяются к соответствующим цепям управления.

При протекании тока через обмотку 2 сердечник 1 намагничивается и притягивает якорь 3. Механическое движение якоря приводит к замыканию контакта 5 и размыканию контакта 6. В результате происходит замыкание или размыкание электрической цепи.

Контакты реле замыкают или размыкают преимущественно цепи управления, где ток не превышает нескольких ампер.

В зависимости от времени срабатывания контактов различают реле мгновенного действия и реле с выдержкой времени. В реле мгновенного действия контакты замыкаются (или размыкаются) практически сразу после поступления напряжения на катушку реле (или после исчезновения напряжения на катушке).

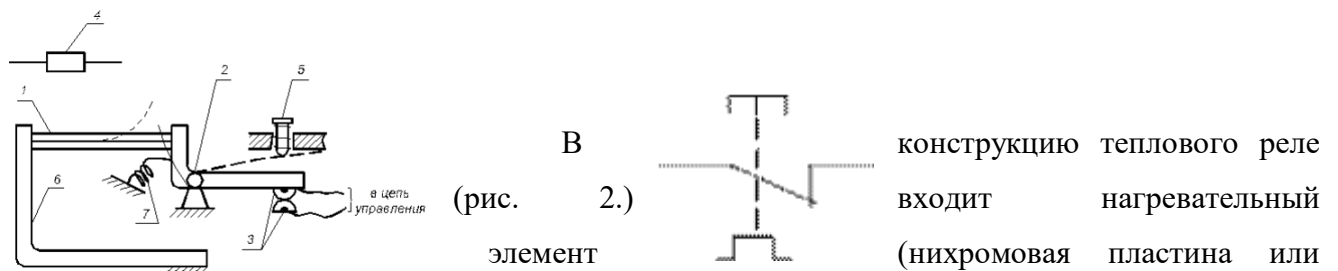
В реле с выдержкой времени контакты замыкаются или размыкаются не сразу после поступления на реле сигнала управления, а с некоторой выдержкой времени. Применение контактов реле с выдержкой времени вызвано практической необходимостью. Реле с выдержкой Электромагнитное реле состоит из сердечника 1 (рис. 1), катушки 2, якоря 3, кронштейна 4, замыкающих и размыкающих контактов 5 и 6 и возвратной пружины 7. Выводы 8 катушки реле и контактов 9 и 10 подсоединяются к соответствующим цепям управления. При протекании тока через обмотку 2 сердечник 1 намагничивается и притягивает якорь 3. Механическое движение якоря приводит к замыканию контакта 5 и размыканию контакта 6. В результате происходит замыкание или размыкание электрической цепи. Контакты реле замыкают или размыкают преимущественно цепи управления, где ток не превышает нескольких ампер. В зависимости от времени срабатывания контактов различают реле мгновенного действия и реле с выдержкой времени. В реле мгновенного действия контакты замыкаются (или размыкаются) практически сразу после поступления напряжения на катушку реле (или после исчезновения напряжения на катушке). В реле с выдержкой времени контакты замыкаются или размыкаются не сразу после поступления на реле сигнала управления, а с некоторой выдержкой времени. Применение контактов реле с выдержкой времени вызвано практической необходимостью. Реле с выдержкой времени используются, например, при автоматическом управлении пуском асинхронных двигателей с фазным ротором в крановых механизмах, конвейерах и других случаях, где требуется создать выдержку времени, необходимую для работы того или иного механизма. Наиболее простым способом выдержка времени (до 10-12 с) при отпуске реле может быть создана, например, введением медной гильзы между обмоткой реле и сердечником.

Выдержку времени можно создать и другими способами, например, вводя часовой механизм в конструкцию реле. Такие реле называются маятниковыми реле времени. В некоторых типах реле времени имеется кулачковый распределительный валик, который приводится во вращение электродвигателем небольшой мощности. При вращении валика кулачковым механизмом замыкаются или размыкаются контакты в определённой последовательности через соответствующие промежутки времени. В таких реле выдержка времени может исчисляться от нескольких секунд до нескольких часов. Примером такой конструкции может быть электрический прибор КЭП-12, применяющийся при автоматизации, например, вентиляционных установок. В отдельных случаях электромагнитные реле могут выполнять функцию защиты электроустановок. Такую функцию выполняют реле максимального тока. Эти реле срабатывают при коротких замыканиях в электрических цепях и настраиваются на ток в обмотке реле, превышающий номинальный в 2-2,5...11 раз.

Для защиты электроустановок при длительных перегрузках применяются реле тепловые. Эти реле, в отличие от электромагнитных, катушек не имеют.

## Рисунок 2-Конструкция теплового реле:

а – схема реле; б – условное обозначение контакта теплового реле в электрических схемах



В (рис. 2.) элемент

конструкцию теплового реле входит нагревательный (нихромовая пластина или отрезок нихромовой проволоки) 4, включаемый в цепь главного тока, биметаллическая пластина 1, представляющая продольный спай инваровой и стальной пластин, защёлка 2, контактная система 3, основание 6. Если в цепи нагревательного элемента ток длительно превышает номинальный на 20-25 %, то происходит нагревание этого элемента, биметаллическая пластина нагревается и за счёт различного коэффициента линейного расширения инвара и стали изгибается, освобождая защёлку. Контакты 3 под действием пружины 7 размыкаются, в результате происходит отключение электроустановки от питающей сети. После остывания нагревательного элемента и биметаллической пластины контакт теплового реле может быть возвращён в исходное рабочее состояние кнопкой возврата 5. Контактор – электромагнитный аппарат, предназначенный для замыкания и размыкания силовых цепей под нагрузкой. Под силовыми цепями, или цепями главного тока, понимаются цепи силовых потребителей. В таких цепях наблюдаются токи порядка десятков – сотен ампер.

Контакторы не имеют принципиальных отличий при сравнении с электромагнитными реле.

Контакторы имеют устройства дугогашения и более массивны по сравнению с электромагнитными реле.

Магнитный пускатель – это контактор с встроенными тепловыми реле, применяется для включения силовых цепей (главными контактами) и цепей управления (вспомогательными контактами), а также для автоматической защиты электрических цепей при длительных перегрузках.

Автоматический воздушный выключатель (автомат) – это электромагнитный аппарат не дистанционного действия со встроенными реле максимального тока или тепловыми реле, применяется для включения и отключения электрических цепей и автоматической защиты их при коротких замыканиях и длительных перегрузках.

Развитие средств автоматического управления производственными процессами и возрастающие требования к устройствам автоматики привели к необходимости применения в них новых приборов и устройств, позволяющих решать задачи автоматического управления на более высоком уровне. К числу таких устройств относятся бесконтактные логические элементы, реализующие те или иные логические функции. Их применение в схемах автоматики вызвано тем, что при автоматическом управлении всевозможными технологическими процессами и машинами

большинство выполняемых операций носит характер логических решений. Единичный простейший логический элемент реализует и простую логическую операцию.

Простейшую логическую функцию выполняют электромагнитные реле при замыкании или размыкании своего контакта. Логическая функция реле поясняется на рисунке 3.

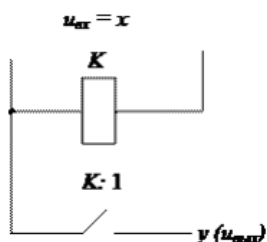


Рисунок 3- Схема, поясняющая логическую функцию

электромагнитного реле

Если на обмотку реле К подаётся управляющее напряжение, которое можно считать входным сигналом  $x$  реле, то реле срабатывает и замыкает контакт К, в результате замыканием контакта вырабатывается сигнал выхода  $y$  в виде управляющего напряжения. Замкнутое состояние контакта реле соответствует простейшей логической операции «Утверждение», называемой также операцией ДА (разрешение на включение). Размыкание контакта соответствует логической операции «Отрицание», или операции НЕ (запрет на включение устройства после размыкания контакта). Логическая операция ДА соответствует условно названному состоянию логической единицы (логическая 1), а логическая операция НЕ соответствует состоянию логического нуля (логический 0). Такие же состояния можно перенести на входной сигнал  $x$  и выходной сигнал  $y$ : наличие сигнала соответствует состоянию логической единицы, отсутствие – состоянию логического нуля (для краткости Если на обмотку реле К подаётся управляющее напряжение, которое можно считать входным сигналом  $x$  реле, то реле срабатывает и замыкает контакт К, в результате замыканием контакта вырабатывается сигнал выхода  $y$  в виде управляющего напряжения. Замкнутое состояние контакта реле соответствует простейшей логической операции «Утверждение», называемой также операцией ДА (разрешение на включение). Размыкание контакта соответствует логической операции «Отрицание», или операции НЕ (запрет на включение устройства после размыкания

контакта).  
**Логическая операция ДА** соответствует условно названному состоянию логической единицы (логическая 1), а **логическая операция НЕ** соответствует состоянию логического нуля (логический 0). Такие же состояния можно перенести на входной сигнал  $x$  и выходной сигнал  $y$ : наличие сигнала соответствует состоянию логической единицы, отсутствие – состоянию логического нуля (для краткости  $x = 0$  или  $x = 1$  ;  $y = 0$  или  $y = 1$  ).

Релейно-контактная аппаратура, длительное время применявшаяся для замыкания и размыкания электрических цепей с помощью механического контакта и выполнения при этом различных логических операций, имеет ряд существенных недостатков: сравнительно низкую надёжность из-за обгорания контактов, большую массу и габариты, невозможность использования

во взрывоопасных и агрессивных средах, значительное потребление энергии. Современные технические средства промышленной электроники позволяют выполнять замыкание и размыкание электрической цепи на бесконтактном принципе. Для этих целей применяются различные полупроводниковые устройства – преимущественно диоды и транзисторы.

Бесконтактные логические элементы, выполненные на основе полупроводниковых устройств, обладают целым рядом преимуществ, важнейшими из которых являются:

**долговечность работы, малые габариты, быстродействие, высокая чувствительность к входным управляющим сигналам, малая чувствительность к условиям внешней среды, отсутствие необходимости в постоянном эксплуатационном уходе, малое потребление энергии, низкая стоимость, технологичность изготовления, высокая надёжность.**

Не вдаваясь в техническую реализацию логических элементов (внутреннюю структуру), можно анализировать их состояние, учитывая при этом, что значение сигнала выхода зависит от сигналов входа в соответствии с той функцией, которую выполняет тот или иной логический элемент. Логические элементы обозначают в соответствии с ГОСТ 2.743-82 упрощённым символом – прямоугольником, добавляя в прямоугольнике те или иные знаки. В соответствии с принятыми обозначениями, логический элемент ДА примет вид, как показано на рисунке 4, а его

$$: x = 1 \text{ , то } y = 1 \text{ ; если } x = 0 \text{ , то } y = 0 \text{ .}$$

состояние выразится такой записью: если

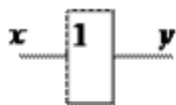


Рис. 4. Условное обозначение логического элемента ДА

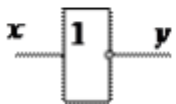


Рис. 5. Условное обозначение логического элемента НЕ

Логический элемент НЕ обозначается в соответствии с рис. 5, а его состояние можно представить записью: если  $x = 1$  , то  $y = 0$  ; если  $x = 0$  , то  $y = 1$  .

Кроме простейших логических элементов, выполняющих функции ДА, НЕ, имеются другие, выполняющие более сложные логические функции. К ним относятся наиболее часто применяющиеся основные логические элементы ИЛИ, ИЛИ – НЕ, И, И – НЕ, ПАМЯТЬ. В этих логических элементах число входов всегда не менее двух. Условные обозначения основных логических элементов приведены в табл. 1.

| Логический элемент | Условное обозначение                                                                                                                                                              | Возможные состояния                                                                                             |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ИЛИ                | <div> <div> <div>x<sub>1</sub></div> <div>x<sub>2</sub></div> </div> <div> <div>1</div> </div> <div>y</div> </div>                                                                | $x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y = 1 \ x_1 = 0 \ x_2 = 1 \ y = 1 \ x_1 = 1 \ x_2 = 1 \ y = 1 \ x_1 = 0 \ x_2 = 0 \ y = 0$ |
| ИЛИ – НЕ           | <div> <div> <div>x<sub>1</sub></div> <div>x<sub>2</sub></div> </div> <div> <div>1</div> </div> <div>y</div> </div>                                                                | $x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y = 0 \ x_1 = 0 \ x_2 = 1 \ y = 0 \ x_1 = 1 \ x_2 = 1 \ y = 0 \ x_1 = 0 \ x_2 = 0 \ y = 1$ |
| И                  | <div> <div> <div>x<sub>1</sub></div> <div>x<sub>2</sub></div> </div> <div> <div>&amp;</div> </div> <div>y</div> </div>                                                            | $x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y = 0 \ x_1 = 0 \ x_2 = 1 \ y = 0 \ x_1 = 1 \ x_2 = 1 \ y = 1 \ x_1 = 0 \ x_2 = 0 \ y = 0$ |
| И – НЕ             | <div> <div> <div>x<sub>1</sub></div> <div>x<sub>2</sub></div> </div> <div> <div>&amp;</div> </div> <div>y</div> </div>                                                            | $x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y = 1 \ x_1 = 0 \ x_2 = 1 \ y = 1 \ x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y = 0 \ x_1 = 0 \ x_2 = 0 \ y = 1$ |
| ПАМЯТЬ             | <div> <div> <div>x<sub>1</sub></div> <div>x<sub>2</sub></div> </div> <div> <div>R</div> <div>T</div> </div> <div> <div>y<sub>1</sub></div> <div>y<sub>2</sub></div> </div> </div> | $x_1 = 1 \ x_2 = 0 \ y_1 = 1 \ y_2 = 0 \ x_1 = 0 \ x_2 = 1 \ y_1 = 0 \ y_2 = 1$                                 |

В соответствии с табл. 1 в логическом элементе ИЛИ при наличии сигнала логической 1 хотя бы на одном из входов – на выходе – сигнал принимает значение логической 1. Если

входные сигналы равны логическому нулю, то сигнал на выходе элемента ИЛИ равен логическому нулю. Такие логические операции соответствуют логическому сложению.

**Логический элемент ИЛИ – НЕ** выполняет операцию логического сложения с отрицанием результата.

**Логический элемент И** выполняет функцию логического умножения: при наличии сигнала логической 1 на всех входах – на выходе – устанавливается сигнал логической 1, если хотя бы на одном из входов сигнал принимает значение логического 0 – на выходе – также устанавливается сигнал логического 0.

**Логический элемент И – НЕ** выполняет функцию логического умножения с отрицанием результата.

В логическом элементе **ПАМЯТЬ** (в простейшем исполнении) имеется два входа и два отдельных выхода –  $y_1$ ,  $y_2$ . По условиям работы этого элемента нельзя подавать сигнал логической 1 одновременно на оба входа: если на входе  $x_1$  имеется сигнал, равный логической 1, то на входе  $x_2$  – сигнал логического 0, при этом на выходе  $y_1$  элемента устанавливается сигнал логической 1, на выходе  $y_2$  – сигнал логического 0. Если на входе  $x_1$  сигнал логической единицы заменить сигналом логического нуля, то значения выходных сигналов не изменятся, т. е. действие входного сигнала, ранее имевшего значение логической единицы, элементом **ПАМЯТЬ** «запомнилось». Изменить значение выходных сигналов возможно, если на вход  $x_2$  подать сигнал логической 1.

Логические элементы ИЛИ – НЕ, И – НЕ являются базовыми, поскольку на их основе можно выполнять различные логические операции за счёт соединения их в определённой последовательности.

Отечественная промышленность выпускает широкий ассортимент различных логических элементов в микросхемном исполнении. Обычно несколько однотипных логических элементов помещаются в один миниатюрный корпус, имеющий несколько внешних выводов.

Логические элементы применяются как в относительно простых схемах управления, так и в сложных схемах цифровой автоматики с «жёсткой» программой. «Жёсткая» программа управления определяется системой внешних соединений между отдельными логическими элементами, в результате программа управления не может быть изменена без перепайки внешних соединений.

## Практическая работа № 5

### Изучение устройства и принципа действия пневматического регулятора

**Цель работы:** Изучение назначения, устройства и принципа работы пневматического регулятора

**Задание:**

1. Внимательно изучите материал по теме.
2. Ответьте на вопросы:
  - a. Назначение пневматического регулятора.
  - b. Параметры, вырабатываемы пневматическим регулятором в ходе работы.
  - c. Начертите структурную схему и опишите принцип работы пневматического регулятора.
  - d. Перечислите общие элементы, на которых строится пневморегулятор.
  - e. Начертите структурную схему позиционного регулятора ПР1.5 и опишите его принцип действия.
  - f. Опишите, как производится монтаж воздушных регуляторов.



Пневматический регулятор — это пневматический прибор для управления технологическим процессом, который основан на принципе пневматического регулирования.

Регулятор вырабатывает выходной сигнал, который используется для выбора положения конечного элемента управления в попытке поддерживать переменную процесса на заданном значении или около него. Если переменная процесса отклоняется от заданного значения, то регулятор вырабатывает корректирующий выходной сигнал, который служит для ограничения величины отклонения и возвращения переменной процесса в устойчивое состояние или к заданному значению.

Пневматический регулятор может быть частью почти любой системы автоматического регулирования, которая занимается контролем и корректировкой технологических процессов, таких как: измерение и регулирование давления, уровня или температуры.

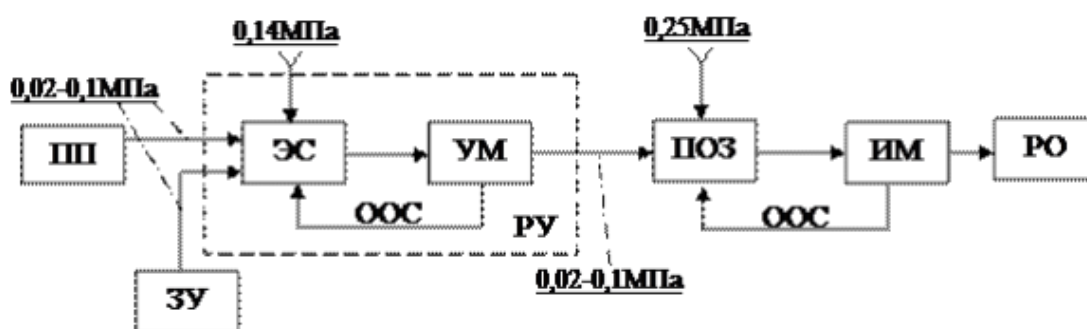


Схема 1-Структурная схема пневматического регулятора

ПП – первичный преобразователь;

ЗУ – задающее устройство;

РУ – регулирующее устройство;

ЭС – элемент сравнения;

УМ – усилитель мощности;

ПОЗ – позиционер;

ООС – отрицательная обратная связь.

Для передачи сигнала между блоками регулятора используется унифицированный пневматический сигнал. В качестве ЗУ используются редуктор или ручной регулятор давления, с

помощью которого можно замыкать или размыкать мощные пневмолинии. Математические операции, необходимые для воспроизведения законов регулирования осуществляется с помощью пневматического усилителя и элемента сравнения, хваченных обратной связью положительной или отрицательной.

ИМ характеризуется простотой конструкции, низкой стоимостью, достаточно высокой мощностью, быстродействием. Он представляет собой усилительное звено, поэтому ИМ не изменяет тип закона регулирования, который был сформулирован на РУ.

Для обеспечения максимальной дальности передачи сигнала и большой его мощности, рядом с ИМ устанавливается ПОЗ, который является практически усилителем мощности. Чтобы не было потерь в точности передачи командного сигнала, вводится отрицательная обратная связь по положению выходного элемента ИМ. Сигнал с ПОЗ усиливается по мощности за счет увеличения питания или за счет большего расхода воздуха.

### Принцип работы устройства

В том случае, если в процессе эксплуатации происходит резкое повышение выходного давления, совершается следующее:

- Высокое давление, возникающее в средней камере, воздействует на мембрану,
- находящуюся под ней, вследствие чего она прогибается, оказывая давление на пружину.
- Клапан, который находится параллельно пружине, реагирует на это действие и отсекает выход в воздушном регуляторе от входа. Это происходит потому, что на шток больше не оказывается воздействие мембраной. Клапан закрывается под действием усилия пружины и давления в камере.
- После того, как мембрана выгибается, она не воздействует на шток и происходит открытие отверстия в жестком центре, через которое происходит сброс сжатого воздуха до тех пор, пока давление на выходе не станет равняться указанному значению.

Элементы, на которых строится пневморегулятор, в большинстве своем рассмотрены в элементарных пневматических преобразователях:

- постоянный дроссель; ➤ переменный дроссель; ➤ проточная или глухая камеры.

Элементы пневматических устройств предназначены для выполнения различных операций с пневматическими сигналами, однако номенклатура операций ограничена. Поэтому в подавляющем большинстве устройств пневматические сигналы предварительно преобразуют в силу и перемещение, а после этой операции снова в пневматический сигнал (РВХ ® F ® Д1 ® Р).

В качестве примера рассмотрим позиционный регулятор ПР1.5 (см. Схема 2)

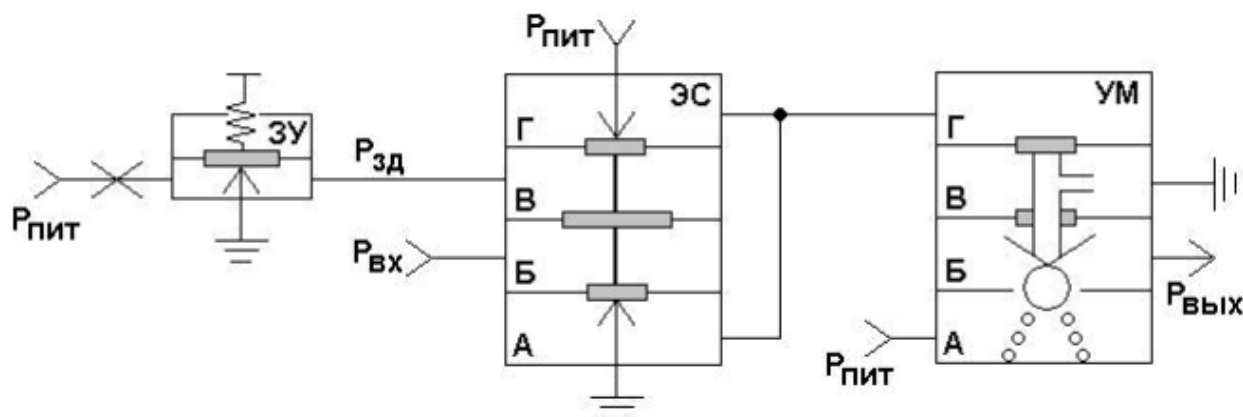


Схема 2- Позиционный регулятор ПР1.5

ЭС двухвходовый состоит из четырех камер: Б и В – глухие и А и Б - проточные.

Регулятор реализует 2-х позиционный закон регулирования. На выходе регулятора возможно только два значения 0 (0,02 МПа) или max (0,1 МПа). Регулятор обрабатывает каждое воздействие, которое необходимо преобразовать в давление. Этот регулятор не имеет настраиваемой зоны возврата, т.к. гистерезис постоянен и обусловлен конструктивными особенностями. Алгоритм работы регулятора следующий:

$$DP = P_{3Д} - P_{ВХ}$$

$$P_{ВЫХ} = \begin{cases} P_{АТМ}, & P_{ВН} > P_{3Д} \\ P_{ПИТ}, & P_{ВН} < P_{3Д} \end{cases}$$

Предназначен ЭС для сравнения двух входных сигналов. На выходе формируется дискретный сигнал (0 или 1). Двухвходовое реле с подпором состоит из четырех камер и блока (3 мембраны, связанные между собой штоком), а также 2 дросселей типа сопло-заслонка. Площадь средней мембраны больше площади крайних. Давление в камерах создает усилие, действующее вдоль оси штока. Если результирующее усилие направлено вертикально, то мембранный блок закрывает подачу давления питания.

Усилитель мощности используется на больших пневмотрассах через каждые 300 м.

Усилитель имеет 3 секции, связанные в мембранный блок, который состоит из 2 мембран, равной площади и клапана, обеспечивающего сопротивление потоку воздуха из камеры А в камеру Б и из камеры Б в камеру В. Поскольку площади мембран равны, то давления на входе и выходе усилителя в момент равновесия будут равны.

### **Как устанавливаются воздушные регуляторы давления?**

Регулятор давления воздуха можно использовать не только как самостоятельный элемент, но и в комплексе со встроенными воздушными фильтрами. Такие приборы называются фильтрами-регуляторами. В зависимости от сферы использования, а также преследуемых целей, регулятор давления воздуха может устанавливаться и работать самостоятельно в магистралях или входить в комплекс целого набора пневматических приборов.

В зависимости от характеристик пневмосети, а также количества потребителей, установка регуляторов происходит следующим образом:

- Магистральная подготовка воздуха. Если в пневмосети запитан один потребитель или несколько с одинаковыми требованиями к давлению, установка прибора производится централизованно на выходе компрессора. Мощность устройства и производительность регулятора должна покрывать потребности всех потребителей.
- Местная подготовка воздуха. В случае, если к пневмосети подключено несколько потребителей с разными требованиями в отношении входящего давления, установка регулятора производится непосредственно перед каждым из них.

## Практическая работа № 6

### Изучение аппаратных и программных средств систем управления логическими контроллерами и сопрягаемыми с ними средствами автоматизации

#### Цель работы:

#### Задание:

Внимательно изучите материал по теме.

- a. Ответьте на вопросы:
- b. Понятие «Контроллер»
- c. Опишите примеры контроллеров для систем САУ.
- d. На чем основывается выбор оптимального для конкретной задачи контроллера.
- e. Перечислите тенденции развития контроллеров.
- f. Опишите типы ПЛК.
- g. Что включает в себя процессорный модуль?
- h. Понятие «Архитектура».
- i. Перечислите основные характеристики микропроцессора.
- j. Что определяет емкость памяти?
- k. Что используется в качестве ПЗУ
- l. Что используют в качестве ОЗУ современные микропроцессоры? m. Сколько составляет циклов записи информации во флэш-память? n. Что определяет емкость памяти ПЛК?
- o. Перечислите задачи выполняемые процессорным модулем ПЛК.

#### Контроллеры для систем автоматизации

Слово "контроллер" произошло от английского "control" (управление), а не от русского "контроль" (учет, проверка). Контроллером в системах автоматизации называют устройство, выполняющее управление физическими процессами по записанному в него алгоритму, с использованием информации, получаемой от датчиков и выводимой в исполнительные устройства.

Первые контроллеры появились на рубеже 60-х и 70-х годов в автомобильной промышленности, где использовались для автоматизации сборочных линий. В то время компьютеры стоили чрезвычайно дорого, поэтому контроллеры строились на жесткой логике (программировались аппаратно), что было гораздо дешевле. Однако перенастройка с одной технологической линии на другую требовала фактически изготовления нового контроллера. Поэтому появились контроллеры, алгоритм работы которых мог быть изменен несколько проще - с помощью схемы соединений реле. Такие контроллеры получили название программируемых логических контроллеров (ПЛК), и этот термин сохранился до настоящего времени. Везде ниже термины "контроллер" и "ПЛК" мы будем употреблять как синонимы.

Немного позже появились ПЛК, которые можно было программировать на машинно-ориентированном языке, что было проще конструктивно, но требовало участия специально обученного программиста для внесения даже незначительных изменений в алгоритм управления. С этого момента началась борьба за упрощение процесса программирования ПЛК, которая привела сначала к созданию языков высокого уровня, затем - специализированных языков визуального программирования, похожих на язык релейной логики. В настоящее время этот процесс завершился созданием международного стандарта IEC (МЭК) 1131-3 [Bertocco], который позже был переименован в МЭК 61131-3 [IEC]. Стандарт МЭК 61131-3 поддерживает пять языков технологического

программирования (см. раздел "Программное обеспечение"), что исключает необходимость привлечения профессиональных программистов при построении систем с контроллерами, оставляя для них решение нестандартных задач.

В связи с тем, что способ программирования является наиболее существенным классифицирующим признаком контроллера, понятие "ПЛК" все реже используется для обозначения управляющих контроллеров, которые не поддерживают технологические языки программирования.

С появлением мощных и дешевых микроконтроллеров в 1972 г. рынок ПЛК начал расти экспоненциально и за период с 1978 по 1990 год увеличился с 80 млн. долл. до 1 млрд. долл. и к 2002 г. составил 1,4 млрд. долл. [Webb]. В настоящее время мировой рынок ПЛК продолжает расти, хотя и гораздо меньшими темпами. Однако последнее замечание не относится к России, где события изменяются очень быстро в связи с возрождением экономики, появлением сильных отечественных производителей и системных интеграторов [Ицкович], а также огромными инвестициями международных корпораций в Российскую экономику.

ПЛК используются практически во всех сферах человеческой деятельности для автоматизации технологических процессов, в системах противоаварийной защиты и сигнализации, в станках с ЧПУ, для управления дорожным движением, в системах жизнеобеспечения зданий, для сбора и архивирования данных, в системах охраны, в медицинском оборудовании, для управления роботами, в системах связи, при постановке физического эксперимента, для управления космическими кораблями, для автоматизации испытаний продукции и т. д. Тем не менее, до сих пор остается много отраслей экономики, куда контроллерная автоматизация только начинает проникать.

Согласно последнему опросу по Интернет, проведенному журналом Control Engineering совместно с Reed Research, большая часть опрошенных использует ПЛК в задачах управления станками. На втором месте - задачи, связанные с управлением технологическими процессами, далее идет управление перемещениями и задачи диагностики. Чаще всего контроллеры используют для решения собственных задач (54%), реже для производства оборудования для продажи (25%), или для того и другого (17%).

Контроллеры используются не только как автономные средства локального управления технологическим установками, но и в составе широкомасштабных систем автоматизированного управления целыми предприятиями.

В настоящее время на Российском рынке преобладают контроллеры иностранных фирм: Siemens, Mitsubishi, ABB, Schneider Electric, GE Fanuc, однако с течением времени увеличивается доля рынка, занятая отечественной продукцией Российских фирм (НИЛ АП, Текон, Фаствел, ДЭП, Овен, Элемер, Эмикон и др.), что соответствует общемировой тенденции, когда в большинстве стран отечественные фирмы занимают большую долю рынка, чем иностранные. Это объясняется следующими факторами:

благодаря использованию западных технологических линий и материалов качество изготовления Российских контроллеров часто превосходит зарубежное качество в связи с более высоким уровнем подготовки Российских специалистов;

Российские фирмы обеспечивают более квалифицированную техническую поддержку и русскоязычную документацию;

большую роль играет срок поставки и территориальная близость производителя к потребителю;

соответствие отечественных разработок Российским стандартам, чего часто нельзя сказать об импортных контроллерах; лучшее знание Российского рынка отечественными производителями. Широкому распространению ПЛК в большой степени способствует рост компьютерной грамотности населения, спецкурсы в ВУЗах, множество курсов повышения квалификации, проводимых ведущими системными интеграторами.

### **Программируемые логические контроллеры**

Жесткие ограничения на стоимость и огромное разнообразие целей автоматизации привели к невозможности создания универсального ПЛК, как это случилось с офисными компьютерами. Область автоматизации выдвигает множество задач, в соответствии с которыми развивается и рынок, содержащий сотни непохожих друг на друга контроллеров, различающихся десятками параметров. Каждый производитель выпускает несколько типов ПЛК разной мощности и стоимости, чтобы увеличить прибыль за счет сегментирования рынка.

Выбор оптимального для конкретной задачи контроллера основывается обычно на соответствии функциональных характеристик контроллера решаемой задаче при условии минимальной его стоимости. Учитываются также другие важные характеристики (температурный диапазон, надежность, бренд изготовителя, наличие разрешений Ростехнадзора, сертификатов и т. п.).

Несмотря на огромное разнообразие контроллеров, в их развитии заметны следующие общие тенденции:

- уменьшение габаритов;
- расширение функциональных возможностей;
- увеличение количества поддерживаемых интерфейсов и сетей;
- использование идеологии "открытых систем";
- использование языков программирования стандарта МЭК 61131-3;
- снижение цены.

Еще одной тенденцией является появление в контроллерах признаков компьютера (наличие мыши, клавиатуры, монитора, ОС Windows, возможности подключения жесткого диска), а в компьютерах - признаков контроллера (расширенный температурный диапазон, электронный диск, защита от пыли и влаги, крепление на DIN-рейку, наличие сторожевого таймера, увеличенное количество коммуникационных портов, использование ОС жесткого реального времени, функции самотестирования и диагностики, контроль целостности прикладной программы). Появились компьютеры в конструктивах для жестких условий эксплуатации. Аппаратные различия между компьютером и контроллером постепенно исчезают. Основными отличительными признаками контроллера остаются его назначение и наличие технологического языка программирования.

### **Типы ПЛК**

Для классификации огромного разнообразия существующих в настоящее время контроллеров рассмотрим их существенные различия.

Основным показателем ПЛК является количество каналов ввода-вывода. *По этому признаку ПЛК делятся на следующие группы:*

- нано-ПЛК (менее 16 каналов);
- микро-ПЛК (более 16, до 100 каналов);
- средние (более 100, до 500 каналов);
- большие (более 500 каналов).

*По расположению модулей ввода-вывода ПЛК бывают:*

моноблочными, - в которых устройство ввода-вывода не может быть удалено из контроллера или заменено на другое. Конструктивно контроллер представляет собой единое целое с устройствами ввода-вывода (например, одноплатный контроллер). Моноблочный контроллер может иметь, например, 16 каналов дискретного ввода и 8 каналов релейного вывода;

модульные - состоящие из общей корзины (шасси), в которой располагаются модуль центрального процессора и сменные модули ввода-вывода. Состав модулей выбирается пользователем в зависимости от решаемой задачи. Типовое количество слотов для сменных модулей - от 8 до 32;

распределенные (с удаленными модулями ввода-вывода) - в которых модули ввода - вывода выполнены в отдельных корпусах, соединяются с модулем контроллера по сети (обычно на основе интерфейса RS-485) и могут быть расположены на расстоянии до 1,2 км от процессорного модуля.

Часто перечисленные конструктивные типы контроллеров комбинируются, например, моноблочный контроллер может иметь несколько съемных плат; моноблочный и модульный контроллеры могут быть дополнены удаленными модулями ввода-вывода, чтобы увеличить общее количество каналов.

Многие контроллеры имеют набор сменных процессорных плат разной производительности. Это позволяет расширить круг потенциальных пользователей системы без изменения ее конструктива.

*По конструктивному исполнению и способу крепления контроллеры делятся на:*

- панельные (для монтажа на панель или дверцу шкафа);
- для монтажа на DIN-рейку внутри шкафа;
- для крепления на стене;
- стоечные - для монтажа в стойке;
- бескорпусные (обычно одноплатные) для применения в специализированных конструктивах производителей оборудования (ОЕМ - "Original Equipment Manufacturer").

*По области применения контроллеры делятся на следующие типы:*

- универсальные общепромышленные;
- для управления роботами;
- для управления позиционированием и перемещением;
- коммуникационные;
- ПИД-контроллеры;
- специализированные.

*По способу программирования контроллеры бывают:*

- программируемые с лицевой панели контроллера;
- программируемые переносным программатором;
- программируемые с помощью дисплея, мыши и клавиатуры;
- программируемые с помощью персонального компьютера.

*Контроллеры могут программироваться на следующих языках:*

- на классических алгоритмических языках (C, C#, Visual Basic);
- на языках МЭК 61131-3.

Контроллеры могут содержать в своем составе модули ввода-вывода или не содержать их.

Примерами контроллеров без модулей ввода-вывода являются коммуникационные контроллеры, которые выполняют функцию межсетевого шлюза, или контроллеры, получающие данные от контроллеров нижнего уровня иерархии АСУ ТП.

## **Архитектура**

Архитектурой контроллера называют набор его основных компонентов и связей между ними. Типовой состав ПЛК включает центральный процессор, память, сетевые интерфейсы и устройства ввода-вывода (рис. 6.1). Иногда эта конфигурация дополняется устройством для программирования и пультом оператора, устройствами индикации, реже - принтером, клавиатурой, мышью или трекболом.

Процессорный модуль включает в себя микропроцессор (центральное процессорное устройство - ЦПУ), запоминающие устройства, часы реального времени и сторожевой таймер. Термины "микропроцессор" и "процессор" в настоящее время стали синонимами, поскольку все вновь выпускаемые процессоры выполняются в виде СБИС, т.е. являются микропроцессорами.

Основными характеристиками микропроцессора являются разрядность (в ПЛК используются 8-ми, 16-ти и 32-разрядные микропроцессоры), тактовая частота, архитектура, наличие операций с плавающей точкой, типы поддерживаемых портов ввода-вывода, температурный диапазон работоспособности и потребляемая мощность.

Производительность микропроцессоров с одной и той же архитектурой пропорциональна тактовой частоте. Большинство контроллеров используют микропроцессоры с сокращенным набором команд (RISC - Reduced Instruction Set Computing), в которых используется небольшое количество команд одинаковой длины и большое количество регистров. Сокращенный набор команд позволяет строить более эффективные компиляторы и конвейер процессора, способный за каждый такт выдавать результат исполнения очередной команды [Корнеев].

Для контроллеров, выполняющих интенсивную математическую обработку данных, важно наличие математического сопроцессора (вспомогательного процессора, выполняющего операции с плавающей точкой) или сигнальных процессоров, в которых операции типа  $Y=A*B+X$  выполняются за один такт. Сигнальные процессоры позволяют ускорить выполнение операций свертки или быстрого преобразования Фурье.

Емкость памяти определяет количество переменных (тегов), которые могут быть обработаны в процессе функционирования ПЛК. В микропроцессорах время доступа к памяти является одним из существенных факторов, ограничивающих быстродействие. Поэтому память делят на несколько уровней иерархии, в зависимости от частоты использования, хранящихся в ней данных и быстродействия. Иерархия памяти относится к существенным характеристиками архитектуры процессора, поскольку она позволяет снизить отрицательное влияние медленной памяти на быстродействие микропроцессора. Основными типами памяти является постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и набор регистров. Регистры являются самыми быстродействующими элементами памяти, поскольку они используются арифметико-логическим устройством (АЛУ) для исполнения элементарных команд процессора. ПЗУ используют для хранения редко изменяемой информации, такой, как операционная система, драйверы устройств, загрузчик, исполняемый модуль программы пользователя. ОЗУ используется для хранения данных, которые многократно изменяются в процессе работы контроллера, например, значения тегов, результаты промежуточных вычислений, диагностическая информация, массивы, выводимые на графики, данные для отображения на дисплее.

### **Процессорный модуль**

Процессорный модуль ПЛК выполняет следующие задачи: собирает данные из модулей ввода в память и отправляет данные из памяти в модули вывода; выполняет обмен данными с устройством для программирования контроллера; выдает метки часов реального времени; осуществляет обмен данными с промышленной сетью; реализует стек протоколов промышленной сети (для этой цели могут использоваться вспомогательные коммуникационные

процессоры); выполняет начальную загрузку и исполнение операционной системы; исполняет загрузочный модуль пользовательской программы системы автоматизации; управляет актами обмена с памятью.

Одной из тенденций в развитии ПЛК является использование процессорных модулей разной мощности для одного конструктива контроллера. Это позволяет получить серию контроллеров разной мощности и тем самым покрыть больший сегмент рынка, а также выполнить модернизацию (upgrade) контроллеров, купленных потребителями, путем замены всего одного модуля.

*К основным характеристикам процессорного модуля относятся:*

тип операционной системы (Windows CE, Linux, DOS, OS-9, QNX и др.);

наличие исполнительнй среды для стандартной системы программирования на языках МЭК 61131-3;

типы поддерживаемых интерфейсов (RS-232, RS-422, RS-485, CAN, USB, Ethernet и др.);

типы поддерживаемых сетей (Modbus RTU, Modbus TCP, Ethernet, Profibus, CANopen,

DeviceNet и др.);

возможность подключения устройств индикации или интерфейса оператора

(светодиодного или ЖКИ индикатора, клавиатуры, мыши, дисплея с интерфейсами VGA, DVI или CMOS, LVDS, трекбола и др.);

разрядность (8, 16, 32 или 64 бита);

тактовая частота микропроцессора и памяти;

время выполнения команд;

объем, иерархия и типы памяти (ОЗУ, кэш, ПЗУ - флэш, съемная флэш и др.);

типы встроенных функций (ПИД-регулятор, счетчики, ШИМ, алгоритмы

позиционирования и управления движением и др.);

бренд производителя (Intel, AMD, Atmel, Motorola, RealLab! и др.).

Быстродействие процессорного модуля ПЛК обычно оценивают по времени выполнения логических команд, поскольку они наиболее распространены при реализации алгоритмов управления.

Огромное разнообразие задач, возлагаемых на ПЛК, и сильная зависимость цены от мощности контроллера явились причиной большого разнообразия используемых микропроцессоров, от простых и дешевых 8-разрядных Atmel и Microchip до самых высокопроизводительных микропроцессоров серии Intel Pentium, включая двухъядерные и четырехъядерные процессоры.

Восьмиразрядные микропроцессоры пользуются большим успехом в автономных ПИД-контроллерах и микро-ПЛК для несложного алгоритмического управления станками, теплицами, небольшими технологическими аппаратами, в качестве межсетевых шлюзов. Их достоинством является высокая надежность, связанная с предельной простотой программного обеспечения.

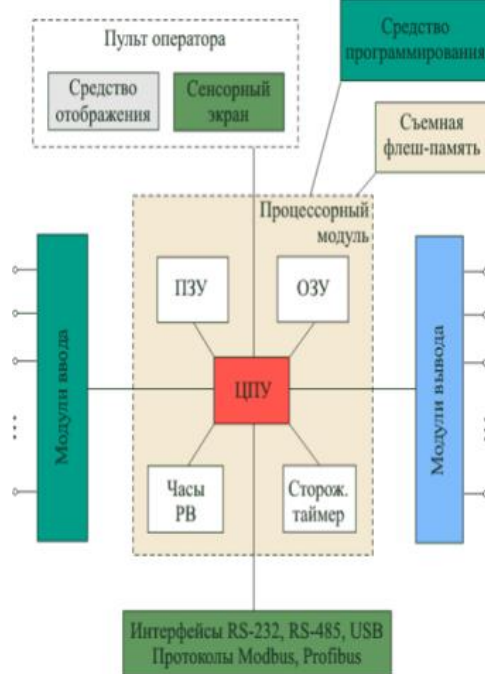
Обычно микропроцессоры, используемые в ПЛК, на несколько поколений отстают от процессоров офисных персональных компьютеров (ПК) в связи с относительно малым объемом рынка ПЛК, который не обеспечивает окупаемость разработки нового контроллера за период смены поколений микропроцессоров.

### **Источник питания**

Стандартными напряжениями питания ПЛК являются напряжения 12 В, 24 и 48 В.

Источником электрической энергии обычно является промышленная сеть 220В, 50 Гц. В случае распределенных систем автоматизации источник питания может быть расположен вдали от ПЛК, поэтому напряжение на клеммах ПЛК или модулей ввода-вывода может сильно отличаться от напряжения источника питания вследствие падения напряжения на сопротивлении кабеля. Для

решения этой проблемы модуль удаленного ввода стабилизатором обеспечивает нормальное диапазоне напряжений от Низкое напряжение контроллеры от транспортных средств или В ПЛК иногда часов реального времени функционировать при сохранении информации в перерывов питания.



каждый ПЛК или каждый снабжаются встроенным напряжением, который их функционирование в 10 до 30 В. питания позволяет питать аккумуляторов бортовых сетей переносных аккумуляторов. используют батарею для питания (которые должны выключенном ПЛК) и для ПЗУ на время аварийных

Рисунок 1 -Архитектура ПЛК

В качестве ПЗУ (или ROM - "Read Only Memory") обычно используется электрически стираемая перепрограммируемая память (EEPROM - "Electrically Erasable Programmable ROM". Разновидностью EEPROM является флэш-память, принцип действия которой основан на хранении заряда в конденсаторе, образованном плавающим затвором и подложкой МОП- транзистора. Особенностью флэш-памяти является ее энергонезависимость, т.е. сохраняемость данных при выключенном питании. Стирание и перезапись во флэш-памяти выполняется не отдельными ячейками, а большими блоками, поэтому она получила название, происходящее от английского "flash" - "высышка». Недостатком всех ПЗУ является низкое быстродействие.

Количество циклов записи информации во флэш-память ограничено и составляет несколько десятков тысяч раз. По конструктивному исполнению и интерфейсам флэш-память подразделяется на Compact Flash (CF), Memory Stick, Secure Digital (SD), MultiMediaCard (MMC), RS-MMC, SmartMedia Card (SMC), USB-flash. Флэш-память может быть впаяна в печатную плату или быть съемной.

В качестве ОЗУ современные микропроцессоры используют статическую память (SRAM - Static Random Access Memory) и динамическую (DRAM - "Dynamic Random Access Memory"), SDRAM ("Synchronous DRAM").

SRAM выполняется на триггерах, информация в которых сохраняется неограниченно долго при наличии питания. В динамической памяти информация хранится на конденсаторах и поэтому DRAM требует периодической регенерации (перезарядки конденсаторов). К недостаткам триггерной памяти относится ее высокая стоимость, связанная с низкой плотностью компоновки триггеров на кристалле, и малое отношение емкости к цене. Достоинством является высокое быстродействие, достигающее гигагерц, в то время как память на конденсаторах не может работать на частотах выше сотен герц. Оба типа памяти (DRAM и SRAM) не могут сохранять информацию при отключении питания ПЛК. Поэтому некоторые типы ПЛК используют батарейное питание памяти для сохранения работоспособности системы автоматизации после кратковременного прерывания питания.

Моноблочные и модульные контроллеры используют, как правило, параллельную шину для обмена данными с модулями ввода-вывода, что позволяет на порядок повысить быстродействие их опроса по сравнению с последовательной шиной. Параллельные шины могут быть стандартными (ISA, PC/104, PCI, CompactPCI, VME, CXM) или частнофирменными. Последовательная шина

контроллера (на основе интерфейса RS-485) используется для подключения к нему удаленных (распределенных) модулей ввода-вывода.

Программирование контроллеров малой мощности выполняется с помощью кнопок расположенных на лицевой панели или с помощью переносного пульта для программирования. В качестве пульта в последнее время используется компьютер формата "ноутбук". Программирование мощных контроллеров выполняется с помощью персонального компьютера, на котором устанавливается специальное программное обеспечение, например CoDeSys или ISaGRAF (см. раздел "Программное обеспечение"), выполняющее трансляцию технологического языка стандарта МЭК 61131-3 в исполняемый код процессора, который загружается в ПЗУ ПЛК, например, через порт Ethernet.

Сторожевой таймер (Watchdog Timer - WDT) представляет собой счетчик, который считает импульсы тактового генератора и в нормальном режиме периодически сбрасывается (перезапускается) работающим процессором. Если процессор "зависает", то сигналы сброса не поступают в счетчик, он продолжает считать и при достижении некоторого порога вырабатывает сигнал "Сброс" для перезапуска "зависшего" процессора.

Часы реального времени (РВ) представляют собой кварцевые часы, которые питаются от батарейки и поэтому продолжают идти при выключенном ПЛК. Часы РВ используются, например, для управления уличным освещением в зависимости от времени суток, в системах охраны объектов и других случаях, когда необходима привязка данных или событий к астрономическому времени.

## Практическая работа № 7

### Изучение основ управления шаговым двигателем, управление углом поворота вала, скоростью, направлением

Цель работы: изучить виды, устройство, назначение, принцип работы и основы управления шаговым двигателем.

Задание:

Внимательно изучите материал по теме.

Ответьте на вопросы:

- a. Что такое шаговый двигатель?
- b. Устройство и принцип работы.
- c. Типы шаговых двигателей.
- d. Подключение шагового двигателя.
- e. Управление шаговым двигателем.

Шаговый двигатель представляет собой электрическую машину, предназначенную для преобразования электрической энергии сети в механическую энергию. Конструктивно состоит из обмоток статора и магнитомягкого или магнитотвердого ротора. Отличительной особенностью шагового двигателя является дискретное вращение, при котором заданному числу импульсов соответствует определенное число совершаемых шагов. Наибольшее применение такие устройства получили в станках с ЧПУ, робототехнике, устройствах хранения и считывания информации.

В отличие от других типов машин шаговый двигатель совершает вращение не непрерывно, а шагами, от чего и происходит название устройства. Каждый такой шаг составляет лишь часть от его полного оборота. Количество необходимых шагов для полного вращения вала будет отличаться, в зависимости от схемы соединения, марки двигателя и способа управления.

#### Преимущества и недостатки шагового двигателя

*К преимуществам эксплуатации шагового двигателя можно отнести:*

- В шаговых электродвигателях угол поворота соответствует числу поданных электрических сигналов, при этом, после остановки вращения сохраняется полный момент и фиксация;
- Точное позиционирование – обеспечивает 3 – 5% от установленного шага, которая не накапливается от шага к шагу;
- Обеспечивает высокую скорость старта, реверса, остановки;
- Отличается высокой надежностью за счет отсутствия трущихся компонентов для токосъема, в отличие от коллекторных двигателей;
- Для позиционирования шаговому двигателю не требуется обратной связи;
- Может выдавать низкие обороты для непосредственно подведенной нагрузки без каких-либо редукторов;
- Сравнительно меньшая стоимость относительно тех же [сервоприводов](#);
- Обеспечивается широкий диапазон управления скоростью оборотов вала за счет изменения частоты электрических импульсов.

К недостаткам применения шагового двигателя относятся:

- Может возникать резонансный эффект и проскальзывание шагового агрегата;
- Существует вероятность утраты контроля из-за отсутствия обратной связи;
- Количество расходуемой электроэнергии не зависит от наличия или отсутствия нагрузки;
- Сложности управления из-за особенности схемы

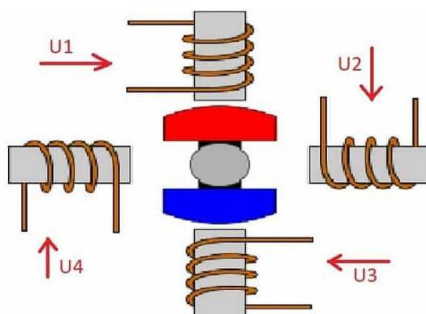


Рис. 1. Принцип действия шагового двигателя

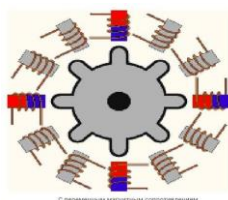
На рисунке 1 изображены 4 обмотки, которые относятся к статору двигателя, а их расположение устроено так, что они находятся под углом  $90^\circ$  относительно друг друга. Из чего следует, что такая машина характеризуется размером шага в  $90^\circ$ .

В момент подачи напряжения  $U_1$  в первую обмотку происходит перемещение ротора на те же  $90^\circ$ . В случае поочередной подачи напряжения  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $U_4$  в соответствующие обмотки, вал продолжит вращение до завершения полного круга. После чего цикл повторяется снова. Для изменения направления вращения достаточно изменить очередность подачи импульсов в соответствующие обмотки.

Для обеспечения различных параметров работы важна как величина шага, на который будет смещаться вал, так и момент, прилагаемый для перемещения. Вариации данных параметров достигаются за счет конструкции самого ротора, способа подключения и конструкции обмоток.

Вращаемый элемент обеспечивает магнитное взаимодействие с электромагнитным полем статора. Поэтому его конструкция и технические особенности напрямую определяют режим работы и параметры вращения шагового агрегата. Чтобы на практике определить тип шагового мотора, при обесточенной сети необходимо провернуть вал, если ощущаете сопротивление, то это свидетельствует о наличии магнита, в противном случае, это конструкция без магнитного сопротивления.

Реактивный шаговый двигатель не оснащается магнитом на роторе, а выполняется из магнитомягких сплавов, как правило, его набирают из пластин для уменьшения потерь на индукцию. Конструкция в поперечном разрезе напоминает шестерню с зубцами. Полюса статорных обмоток запитываются противоположными парами и создают магнитную силу для перемещения ротора, который двигается от попеременного протекания электрического тока в обмоточных парах.

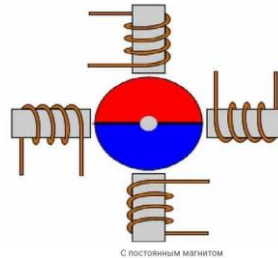


С переменным магнитным сопротивлением

Весомым плюсом такой конструкции шагового привода является отсутствие стопорящего момента, образуемого полем по отношению к арматуре. По факту это тот же [синхронный двигатель](#), в котором поворот ротора идет в соответствии с полем статора. Недостатком является снижение величины вращающего момента. Шаг для реактивного двигателя колеблется от  $5$  до  $15^\circ$ .

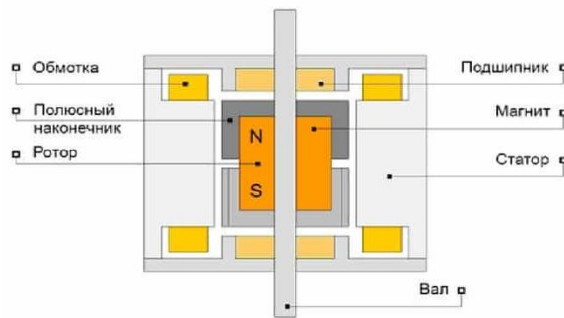
## С постоянными магнитами

В этом случае подвижный элемент шагового двигателя собирается из постоянного магнита, в котором может быть два и большее количество полюсов. Вращение ротора обеспечивается притяжением или отталкиванием магнитных полюсов электрическим полем при подаче напряжения в соответствующие обмотки. Для этой конструкции угловой шаг составляет  $45-90^\circ$ .



## Гибридные

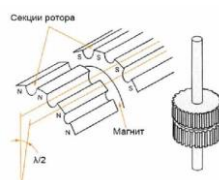
Был разработан с целью объединения лучших качеств двух предыдущих моделей, за счет чего агрегат обладает меньшим углом и шагом. Его ротор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита, который намагничен по продольной оси. Конструктивно это выглядит как два круглых полюса, на поверхности которых расположены зубцы ротора из магнитомягкого материала. Такое решение позволило обеспечить отличный удерживающий и крутящий момент.



Устройство гибридного шагового двигателя

Преимущества гибридного шагового двигателя заключаются в его высокой точности, плавности и скорости перемещения, малым шагом – от  $0,9$  до  $5^\circ$ . Их применяют для высокоточных станков ЧПУ, компьютерных и офисных приборах и современной робототехнике. Единственным недостатком считается относительно высокая стоимость.

Для примера разберем вариант гибридных ШД на 200 шагов позиционирования вала. Соответственно каждый из цилиндров будет иметь по 50 зубцов, один из них является положительным полюсом, второй отрицательным. При этом каждый положительный зубец расположен напротив паза в отрицательном цилиндре и наоборот. Конструктивно это выглядит так:



Расположение пазов гибридного ШД

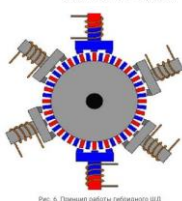


Рис. 6. Принцип работы гибридного ШД

Из-за чего на валу шагового двигателя получается 100 перемежающихся полюсов с отличной полярностью. Статор также имеет зубцы, как показано на рисунке 6 ниже, кроме промежутков между его компонентами.

За счет такой конструкции можно достичь смещения того же южного полюса относительно статора в 50 различных позиций. За счет отличия положения в полупозиции между северным и южным полюсом достигается возможность перемещения в 100 позициях, а смещение фаз на четверть деления предоставляет возможность увеличить количество шагов за счет последовательного возбуждения еще вдвое, то есть до 200 шагов углового вала за 1 оборот.

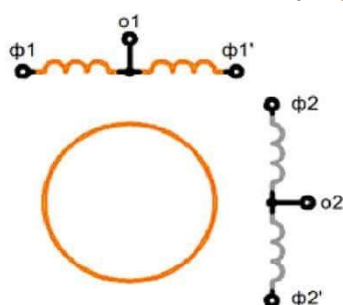
Обратите внимание на рисунок 6, принцип работы такого шагового двигателя заключается в том, что при попарной подаче тока в противоположные обмотки происходит подтягивание разноименных полюсов ротора, расположенных за зубьями статора и отталкивание одноименных, идущих перед ними по ходу вращения.

### По виду обмоток

На практике шаговый двигатель представляет собой многофазный мотор. Плавность работы в котором напрямую зависит от количества обмоток – чем их больше, тем плавнее происходит вращение, но и выше стоимость. При этом крутящий момент от числа фаз не увеличивается, хотя для нормальной работы их минимальное число на статоре электродвигателя должно составлять хотя бы две. Количество фаз не определяет числа обмоток, так двухфазный шаговый двигатель может иметь четыре и более обмотки.

### Униполярный

Униполярный шаговый двигатель отличается тем, что в схеме подключения обмотки имеется ответвление от средней точки. Благодаря чему легко меняются магнитные полюса. Недостатком такой конструкции является использование только одной половины доступных витков, из-за чего достигается меньший вращающий момент. Поэтому они отличаются большими габаритами.



Униполярный ШД

Для использования всей мощности катушки средний вывод оставляют не подключенным. Рассмотрите конструкции униполярных агрегатов, они могут содержать 5 и 6 выводов. Их количество будет зависеть от того, выводится срединный провод отдельно от каждой обмотки двигателя или они соединяются вместе.

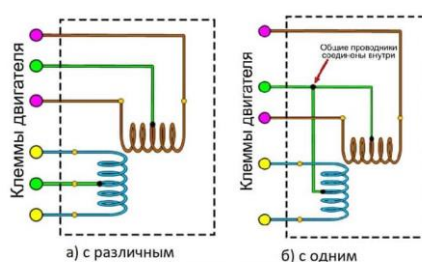
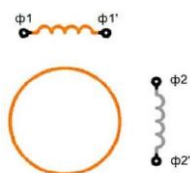


Схема а) с различными, б) с одним выводом

### Биполярный

Биполярный шаговый двигатель подключается к контроллеру через 4 вывода. При этом обмотки могут соединяться внутри как последовательно, так и параллельно. Рассмотрите пример его работы на рисунке.



Биполярный шаговый двигатель

В конструктивной схеме такого двигателя вы видите с одной обмоткой возбуждения в каждой фазе. Из-за этого смена направления тока требует использовать в электронной схеме специальные драйверы (электронные чипы, предназначенные для управления). Добиться подобного эффекта можно при помощи включения H-моста. В сравнении с предыдущим, биполярное устройство обеспечивает тот же момент при гораздо меньших габаритах.

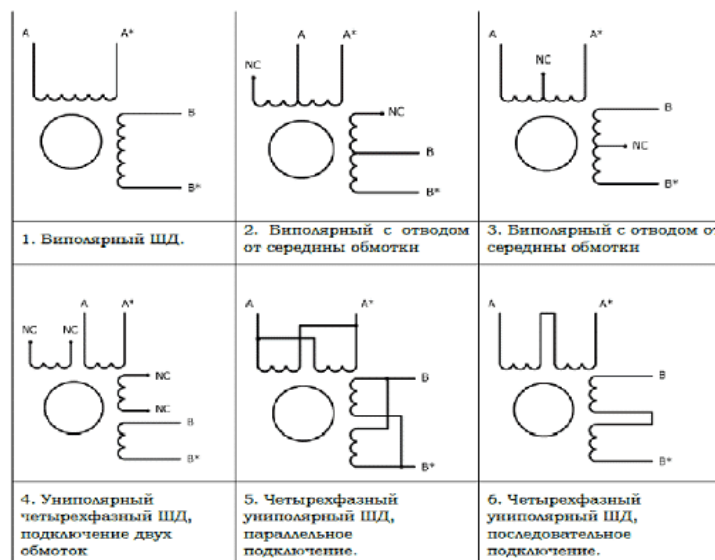
## Подключение шагового двигателя

Чтобы запитать обмотки, потребуется устройство способное выдать управляющий импульс или серию импульсов в определенной последовательности. В качестве таких блоков выступают полупроводниковые приборы для подключения шагового двигателя, микропроцессорные драйвера. В которых имеется набор выходных клемм, каждая из них определяет способ питания и режим работы.

В зависимости от схемы подключения должны применяться те или другие выводы шагового агрегата. При различных вариантах подведения тех или иных клемм к выходному сигналу постоянного тока получается определенная скорость вращения, шаг или микрошаг линейного перемещения в плоскости. Так как для одних задач нужна низкая частота, а для других высокая, один и тот же двигатель может задавать параметр за счет драйвера.

### Типичные схемы подключения ШД

В зависимости того, какое количество выводов представлено на конкретном шаговом двигателе: 4, 6 или 8 выводов, будет отличаться и возможность использования той или иной схемы их подключения. Посмотрите на рисунки, здесь показаны типичные варианты подключения шагового механизма:



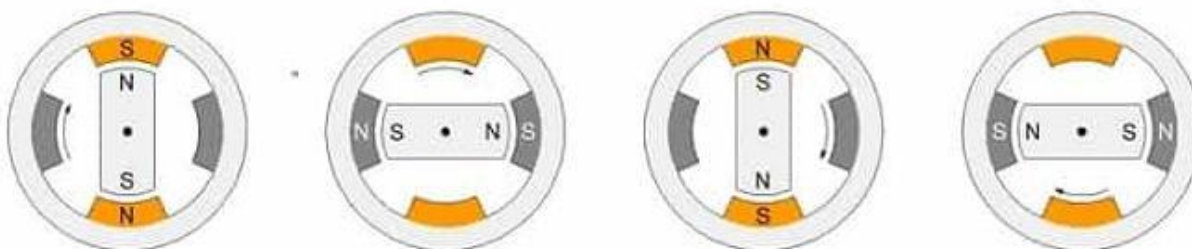
Схемы подключения различных типов шаговых двигателей

При условии запитки основных полюсов шаговой машины от одного и того же драйвера, по данным схемам можно отметить следующие отличительные особенности работы:

- Выводы однозначно подводятся к соответствующим клеммам устройства. При последовательном соединении обмоток увеличивает индуктивность обмоток, но понижает ток.
- Обеспечивает паспортное значение электрических характеристик. При параллельной схеме увеличивается ток и снижается индуктивность.
- При подключении по одной фазе на обмотку снижется момент на низких оборотах и уменьшает величину токов.
- При подключении осуществляет все электрические и динамические характеристики согласно паспорта, номинальный токи. Значительно упрощается схема управления.
- Выдает куда больший момент и применяется для больших частот вращения;
- Как и предыдущая предназначена для увеличения момента, но применяется для низких частот вращения.

Выполнение операций шаговым агрегатом может осуществляться несколькими методами. Каждый из которых отличается способом подачи сигналов на пары полюсов. Всего выделяют три метода активации обмоток.

**Волновой** – в таком режиме происходит возбуждение только одной обмотки, к которой и притягиваются роторные полюса. При этом шаговый двигатель не способен вытягивать большую нагрузки, так как выдает лишь половину момента.



**Волновое управление**

**Полношаговый** – в таком режиме происходит одновременная коммутация фаз, то есть, возбуждаются сразу обе. Из-за чего обеспечивается максимальный момент, в случае параллельного соединения или последовательного включения обмоток будет создаваться максимальное напряжение или ток.



**Полношаговое управление**

## Практическая работа № 8

### Изучение основ управления асинхронным двигателем с помощью частотного преобразователя

Цель работы: изучение основ управления асинхронным двигателем с помощью частотного преобразователя, их достоинств и недостатков.

Задание:

1. Внимательно изучите материал по теме.
2. Ответьте на вопросы:
  - a. Опишите принцип работы частотного преобразователя.
  - b. Опишите, как производится регулирование пускового тока при помощи частотного преобразователя.
  - c. Напишите формулу определения номинального тока трехфазного электродвигателя переменного тока.
  - d. Напишите формулу расчета величины пускового тока.
  - e. Напишите формулу вычисления величины скольжения.
  - f. Опишите как производится регулировка скорости вращения ротора при помощи частотного преобразователя.
  - g. Перечислите достоинства применения частотных преобразователей с широтно-импульсной модуляцией в качестве дополнительного оборудования к асинхронному электродвигателю.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором на сегодняшний день является наиболее массовым и надёжным устройством для приводов самых разнообразных машин и механизмов. Но и у него есть свои минусы.

Основные недостатки асинхронного двигателя:

- невозможность регулирования скорости вращения ротора
- большой пусковой ток (превышает номинальный в 5-7 раз)

При использовании исключительно механических устройств регулирования перечисленные недостатки приводят к заметным энергетическим потерям и к механическим нагрузкам, что снижает срок службы оборудования.

Многочисленные исследования в этой области привели к тому, что эти проблемы стало возможно решать не механическим, а электронным способом – при помощи частотного преобразователя с широтно-импульсным управлением (ЧПСИМ).

#### Принцип работы частотного преобразователя

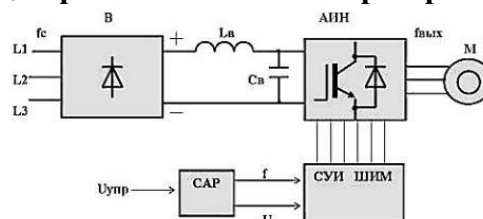


Рисунок 1- Схема частотного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией

Частотный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя В, автономного инвертора, системы управления ШИМ, системы автоматического регулирования, дросселя L В и конденсатора фильтра СВ.

Первым делом сетевое напряжение выпрямляется диодным выпрямителем (мостом), а затем сглаживается и фильтруется с помощью конденсатора фильтра. После этого в инверторе за счет высокочастотного широтно-импульсного управления производится регулирование выходной частоты  $f_{\text{вых}}$  и выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . На выходе преобразователя частоты наблюдаются прямоугольные импульсы, однако за счет индуктивности обмоток статора асинхронного электродвигателя они интегрируются и переходят в синусоидальное напряжение.

## Регулирование пускового тока при помощи частотного преобразователя

Высокие пусковые токи электродвигателей – нежелательное явление, так как они могут стать причиной падения напряжения оборудования. Вследствие этого при подключении и наладке двигателей переменного тока обычно стоит задача придать пусковым токам наименьшее значение, а также увеличить плавность пуска двигателя за счет использования специального вспомогательного оборудования.

Частотные преобразователи считаются одной из наиболее действенных категорий приборов, позволяющих облегчить запуск электродвигателей. Наиболее ценным признает с их особенностью поддерживать пусковой ток двигателей переменного тока в течении продолжительного периода времени.

Чтобы подобрать подходящий к асинхронному электродвигателю частотный преобразователь, следует произвести расчет его пускового тока. Это можно сделать следующим образом.

Величина пускового тока рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{пуск}} = I_n \cdot K_{\text{пуск}}$$

где  $I_n$  – номинальная величина тока

$K_{\text{пуск}}$  – кратность постоянного тока к номинальному значению (указывается в технической документации к электродвигателю). Определение номинального тока трехфазного электродвигателя переменного тока выполняется согласно формуле:

где  $P_n$  – номинальная мощность двигателя,

$$I_n = \frac{1000 \cdot P_n}{U_n \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{\eta_n}}$$

$U_n$  – номинальное напряжение,

$\eta_n$  – номинальный коэффициент полезного действия,

$\cos \varphi$  – номинальный коэффициент мощности электромотора. Все эти данные также можно найти в технической документации к двигателю. Зная пусковой ток электродвигателя, можно правильно подобрать частотный преобразователь. Желательно, чтобы ток частотного преобразователя был больше тока возможных перегрузок, а его мощность следует выбирать на 10–15% выше мощности двигателя.

## Регулировка скорости вращения ротора при помощи частотного преобразователя

Чтобы обеспечить нормальную работу асинхронного двигателя, надо привести скорости вращения магнитного поля статора и ротора к близким значениям. Разность скоростей вращения магнитного поля статора и ротора асинхронного электродвигателя характеризует величина

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_2},$$

скольжения

где  $n_1$  – синхронная скорость вращения поля, об/мин;

$n_2$  – скорость вращения ротора, об/мин.

В свою очередь, величина скольжения определяется моментом вращения двигателя. В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором момент можно изменить с помощью частотных преобразователей. Принцип частотного способа регулировки скорости асинхронного двигателя состоит в том, что, изменяя частоту питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

где  $n$  – частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

$f$  – промышленная частота, Гц;

$$n = \frac{60f}{p}$$

$p$  – число пар полюсов.

при неизменном  $p$  регулировать угловую скорость магнитного поля статора, что в свою очередь, позволяет изменять скорость вращения ротора. Данный способ является одним из самых перспективных при регулировании асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При частотном регулировании минимальны потери скольжения и, как правило, весьма незначительны и потери мощности. Таким образом, применение частотных преобразователей с широтно-

импульсной модуляцией в качестве дополнительного оборудования к асинхронному электродвигателю дает возможность эффективно устранять основные недостатки, связанные с его работой, а именно осуществляется:

- плавный пуск электродвигателя, что приводит к уменьшению его износа;
- экономия электроэнергии при переменной нагрузке;
- регулирование скорости вращения;
- управляемое торможение и автоматический перезапуск при отсутствии сетевого напряжения.

Однако следует отметить, что для частотных преобразователей характерны наличие помех для высокочувствительного оборудования и относительно высокая стоимость.

## Практическая работа № 9

### Исследование работы асинхронного трехфазного двигателя

**Цель работы:** изучение основ работы асинхронного трехфазного двигателя.

**Задание:**

Внимательно изучите материал по теме.

Ответьте на вопросы:

- a. Понятие асинхронного электродвигателя.
- b. Устройство и назначение узлов асинхронного электродвигателя.
- c. Опишите принцип работы асинхронного электродвигателя.
- d. Устройство, назначение узлов и принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
- e. Концепция вращающегося магнитного поля.
- f. Скольжение асинхронного двигателя.
- g. Скорость вращения ротора.
- h. Подключение асинхронного двигателя.
- i. Подключение трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети с помощью фазосдвигающего элемента.
- j. Управление асинхронным двигателем.
- k. Плавный пуск асинхронного электродвигателя.
- l. Частотное управление асинхронным электродвигателем.
- m. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором (устройство, назначение узлов, пуск и принцип работы).

**Трехфазный асинхронный электродвигатель** - это асинхронный электродвигатель, который имеет трехфазную обмотку статора.

### Конструкция асинхронного электродвигателя

Трехфазный асинхронный электродвигатель, как и любой электродвигатель, состоит из двух основных частей - статора и ротора. Статор - неподвижная часть, ротор - вращающаяся часть. Ротор размещается внутри статора. Между ротором и статором имеется небольшое расстояние, называемое воздушным зазором, обычно 0,5-2 мм.



Статор



Ротор

Рисунок 1 -Статор асинхронного двигателя    Рисунок 2- Ротор асинхронного двигателя

Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Сердечник статора собирается из тонколистовой технической стали толщиной обычно 0,5 мм, покрытой изоляционным лаком. Шихтованная конструкция сердечника способствует значительному снижению вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. Обмотки статора располагаются в пазах сердечника.



Рисунок 3 -Корпус и сердечник статора асинхронного двигателя



Рисунок 4- Конструкция шихтованного сердечника асинхронного электродвигателя

Ротор состоит из сердечника с короткозамкнутой обмоткой и вала. Сердечник ротора тоже имеет шихтованную конструкцию. При этом листы ротора не покрыты лаком, так как ток имеет небольшую частоту и оксидной пленки достаточно для ограничения вихревых токов.

### ***Принцип работы. Вращающееся магнитное поле***

Принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя основан на способности трехфазной обмотки при включении ее в сеть трехфазного тока создавать вращающееся магнитное поле. Вращающееся магнитное поле - это основная концепция электрических двигателей и генераторов.



Рисунок 5- Вращающееся магнитное поле асинхронного электродвигателя

Частота вращения этого поля, или синхронная частота вращения прямо пропорциональна частоте переменного тока  $f_1$  и обратно пропорциональна числу пар полюсов  $p$  трехфазной обмотки.

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$$

где  $n_1$  – частота вращения магнитного поля статора, об/мин,  
 $f_1$  – частота переменного тока, Гц,  
 $p$  – число пар полюсов

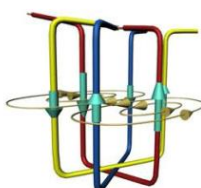
### ***Концепция вращающегося магнитного поля***

Чтобы понять феномен вращающегося магнитного поля лучше, рассмотрим упрощенную трехфазную обмотку с тремя витками. Ток, текущий по проводнику создает магнитное поле вокруг него. На рисунке ниже показано поле, создаваемое трехфазным переменным током в конкретный момент времени.



Рис. 6 Магнитное поле прямого проводника с постоянным током

Рис. 7 Магнитное поле, составляющие



создаваемое обмоткой

переменного тока будут изменяться

### ***Действие вращающегося магнитного поля на замкнутый виток***

Теперь разместим замкнутый проводник внутри вращающегося магнитного поля. По закону электромагнитной индукции изменяющееся магнитное поле приведет к возникновению электродвижущей силы (ЭДС) в проводнике. В свою очередь ЭДС вызовет ток в проводнике.

Таким образом, в магнитном поле будет находиться замкнутый проводник с током, на который согласно закону Ампера ( $F = BIL\sin\alpha$ , где  $F$  – сила Ампера (сила, с которой проводники отталкиваются или притягиваются),  $B$  – магнитная индукция,  $I$  – сила тока,  $L$  – длина проводника,  $\alpha$  – угол между направлением тока и направлением магнитной индукции) будет действовать сила, в результате чего контур начнет вращаться.

### ***Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором***

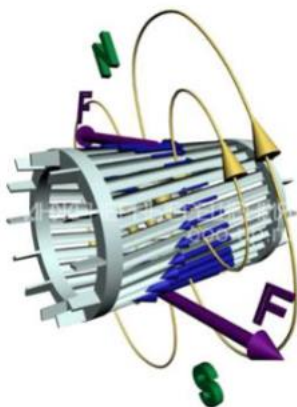
Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором - это асинхронный электродвигатель, у которого ротор выполнен с короткозамкнутой обмоткой в виде беличьей клетки.

### ***Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя***

По этому принципу также работает асинхронный электродвигатель. Вместо рамки с током внутри асинхронного двигателя находится короткозамкнутый ротор по конструкции напоминающий беличье колесо. Короткозамкнутый ротор состоит из стержней, накоротко замкнутых с торцов кольцами.



Рисунок 6 -Короткозамкнутый ротор "беличья клетка" наиболее широко используемый в асинхронных электродвигателях (показан без вала и сердечника)



Трехфазный переменный ток, проходя по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле. Таким образом, также как было описано ранее, в стержнях ротора будет индуцироваться ток, в результате чего ротор начнет вращаться. На рисунке ниже Вы можете заметить различие между индуцируемыми токами в стержнях. Это происходит из-за того, что величина изменения магнитного поля отличается в разных парах стержней, из-за их разного расположения относительно поля. Изменение тока в стержнях будет изменяться со временем. Вы также можете заметить, что стержни ротора наклонены относительно оси вращения. Это делается для того чтобы уменьшить высшие гармоники ЭДС и избавиться от пульсации момента. Если стержни были бы направлены вдоль оси вращения, то в них возникало бы пульсирующее магнитное поле из-за того, что магнитное сопротивление обмотки значительно выше магнитного сопротивления зубцов статора.

### ***Скольжение асинхронного двигателя. Скорость вращения ротора***

Отличительный признак асинхронного двигателя состоит в том, что частота вращения ротора  $n_2$  меньше синхронной частоты вращения магнитного поля статора  $n_1$ .

Объясняется это тем, что ЭДС в стержнях обмотки ротора индуцируется только при неравенстве частот вращения  $n_2 < n_1$ . Частота вращения поля статора относительно ротора определяется частотой скольжения  $n_s = n_1 - n_2$ . Отставание ротора от вращающегося поля статора характеризуется относительной величиной  $s$ , называемой скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

где  $s$  – скольжение асинхронного электродвигателя,

$n_1$  – частота вращения магнитного поля статора, об/мин,

$n_2$  – частота вращения ротора, об/мин.

Рассмотрим случай, когда частота вращения ротора будет совпадать с частотой вращения магнитного поля статора. В таком случае относительное магнитное поле ротора будет постоянным, таким образом в стержнях ротора не будет создаваться ЭДС, а, следовательно, и ток. Это значит, что сила, действующая на ротор будет равна нулю. Таким образом ротор будет замедляться. После чего на стержни ротора опять будет действовать переменное магнитное поле, таким образом будет расти индуцируемый ток и сила. В реальности же ротор асинхронного электродвигателя никогда не достигнет скорости вращения магнитного поля статора. Ротор будет вращаться с некоторой скоростью которая немного меньше синхронной скорости.

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в диапазоне от 0 до 1, т. е. 0—100%. Если  $s \sim 0$ , то это соответствует режиму холостого хода, когда ротор двигателя практически не испытывает противодействующего момента; если  $s=1$  — режиму короткого замыкания, при котором ротор двигателя неподвижен ( $n_2 = 0$ ). Скольжение зависит от механической нагрузки на валу двигателя и с ее ростом увеличивается.

Скольжение, соответствующее номинальной нагрузке двигателя, называется номинальным скольжением. Для асинхронных двигателей малой и средней мощности номинальное скольжение изменяется в пределах от 8% до 2%.

### **Преобразование энергии**

*Асинхронный двигатель* преобразует электрическую энергию, подаваемую на обмотки статора, в механическую (вращение вала ротора). Но входная и выходная мощность не равны друг другу так как во время преобразования происходят потери энергии: на трение, нагрев, вихревые токи и потери на гистерезисе. Это энергия рассеивается как тепло. Поэтому асинхронный электродвигатель имеет вентилятор для охлаждения.

## Практическая работа № 10

### Исследования приборов для измерения температуры

**Цель работы:** изучение основных понятий, шкал и методов измерения температуры.

#### Задание:

Внимательно изучите материал по теме.

Ответьте на вопросы:

- Опишите понятие «Температура»
- Перечислите шкалы для измерения температуры.
- Опишите методы, используемые для измерения температуры.
- Перечислите группы термометров.
- Перечислите основные метрологические характеристики механических контактных термометров.
- Перечислите группы приборов, для измерения температуры основываясь на их построении в зависимости от физических свойств.

Одним из параметров, наиболее часто подлежащих контролю и регулированию для корректного протекания технологического процесса, является температура. Температурой называется статистическая величина, характеризующая тепловое состояние тела и пропорциональной средней кинематической энергии молекул тела. За единицу температуры принимают кельвин (К). Температура может быть также представлена в градусах Цельсия (°C). Нуль шкалы Кельвина равен абсолютному нулю, поэтому все температуры по этой шкале положительные. Связь между температурами  $t$  по Цельсию и  $T$  по Кельвину определяется следующим уравнением:

$$t = T - 273,16.$$

Измерить температуру непосредственно, как, например, линейные размеры, невозможно.

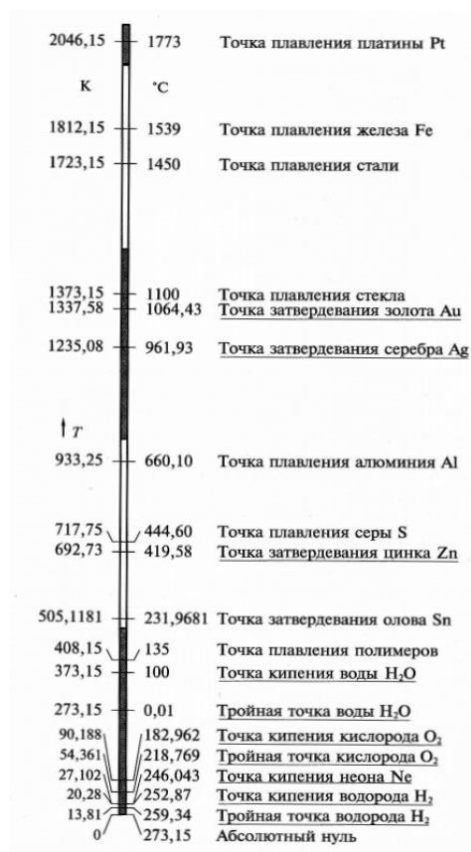
Поэтому температуру определяют косвенно — по изменению физических свойств различных тел, получивших название термометрических.

Измерение температуры связано с преобразованием сигнала измерительной информации (температуры) в какое-либо свойство, связанное с температурой.

#### Рисунок 1. Международная Температурная шкала (МТШ-90) с реперными точками (подчеркнуты)

Для практических целей, связанных с измерением температуры, принята Международная температурная шкала (МТШ-90) (рис. 2.89), которая является обязательной для всех метрологических органов. Она основывается на ряде воспроизводимых состояний равновесия (реперных точек) некоторых веществ, которым присвоены определенные значения температуры.

Для измерения температуры наибольшее распространение получили следующие методы, основанные:



- на тепловом расширении жидких, газообразных и твердых тел (термомеханический эффект);
- изменении давления внутри замкнутого объема при изменении температуры (манометрические);
- изменении электрического сопротивления тел при изменении температуры (терморезисторы);
- термоэлектрическом эффекте;
- использовании электромагнитного излучения нагретых тел.

Приборы, предназначенные для измерения температуры, называются термометрами. Они подразделяются на две большие группы: контактные и бесконтактные.

| <b>Контактное измерение температуры</b>                                                                                                                                                                                                                      |                                 |                       |                          |               |                                                                                                                   |                                                                       |                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Термометры расширения нашли широкое распространение в практике контактных измерений температуры. Основные типы механических контактных термометров, их метрологические характеристики, преимущества, недостатки и область применения представлены в табл. 1. |                                 |                       |                          |               |                                                                                                                   |                                                                       |                                                           |
| Таблица 1. Основные метрологические характеристики механических контактных термометров                                                                                                                                                                       |                                 |                       |                          |               |                                                                                                                   |                                                                       |                                                           |
| Наименование прибора                                                                                                                                                                                                                                         | Тип прибора                     | Пределы измерений, °C | Погрешность измерения, % | Инерционность | Преимущества                                                                                                      | Недостатки                                                            | Область применения                                        |
| <b>Металлические термометры расширения</b>                                                                                                                                                                                                                   | Дилатометрические               | 0...1000              | ±5                       | Большая       | Дешевые, надежные, малое время срабатывания; очень большие перестановочные усилия                                 | Малая точность, высокая инерционность                                 | Температурные выключатели                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                              | Биметаллические                 | 0...500               | ±5                       | »             | Дешевые, надежные; большие перестановочные усилия                                                                 | Низкая точность                                                       | Оценочный контроль температуры, температурные выключатели |
| <b>Жидкостные термометры</b>                                                                                                                                                                                                                                 | Жидкостные стеклянные           | -55...+600            | ±1                       | »             | Очень дешевые                                                                                                     | Малая механическая прочность, нет дистанционности                     | Лабораторные термометры, бытовые термометры               |
|                                                                                                                                                                                                                                                              | Жидкостные манометрические      | -30...+600            | ±1                       | »             | Дешевые, надежные, не требуют внешних источников энергии; дистанционность до 50 м, большие перестановочные усилия | Температура соединительного капилляра влияет на показания прибора     | Промышленные термометры, термореле                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                              | Конденсационные манометрические | 0...400               | ±1                       | Малая         | То же                                                                                                             | Нелинейная статическая характеристика                                 | То же                                                     |
| <b>Газовые термометры</b>                                                                                                                                                                                                                                    | С газовым заполнением           |                       |                          |               | Принцип измерения соответствует определению термодинамической температуры                                         | Малая механическая прочность, большая трудоемкость процесса измерения | Поверочные (калибровочные) работы                         |

Существует широкий перечень промышленных приборов для измерения температуры, отличающихся по принципу функционирования и способу отображения измеряемого параметра. Часть таких приборов служит для визуального контроля параметров температуры измеряемой среды, другие входят в состав контрольно-измерительных систем в качестве датчиков. Стеклянные термометры с использованием эффекта расширения жидкостей при нагревании (спирт, ртуть, толуол) используются для визуального контроля показателей температуры. Для контроля значений температур в диапазоне от -160 °C до +600 °C служат термометры манометрические. Для мониторинга пространственного распределения температуры (на поверхности объекта) применяются тепловизоры. С целью измерения сверхвысоких значений температур (2500 °C и выше) в системах контроля используются пирометры.

В системах, применяемых для дистанционного контроля (управления), используют в качестве сенсоров термопары, электронные термометры и термопреобразователи. Они все имеют приемлемую точность, а также широкий диапазон пределов измерения. Полезная информация на выходе таких датчиков температуры представлена в виде электросигнала, удобного для последующей обработки и отображения.

### ***Общая классификация приборов для измерения температуры***

Одним из параметров, наиболее часто подлежащих контролю и регулированию для корректного протекания технологического процесса, является температура. Приборы для измерения температуры разделяются в зависимости от физических свойств, положенных в основу их построения, на следующие группы:

- **термометры расширения:** предназначены для измерения температур в диапазоне от -190 до +500 градусов Цельсия. Принцип действия термометров расширения основан на свойстве тел под действием температуры изменять объем, а, следовательно, и линейные размеры. Термометры расширения разделяются на жидкостные стеклянные и механические (дилатометрические и биметаллические);

- **манометрические термометры:** предназначены для измерения температуры в диапазоне от -160 до +600 градусов Цельсия. Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления жидкости, газа или пара, помещенных в замкнутом объеме, при нагревании или охлаждении этих веществ;

- **электрические термометры сопротивления** применяются для измерения температур в диапазоне от -200 до +650 градусов Цельсия. Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве проводников изменять электрическое сопротивление в зависимости от температуры;

- **термоэлектрические преобразователи (термопары)** используются при измерения температуры от 0 до +1800 градусов Цельсия. Принцип действия термопар основан на свойстве разнородных металлов и сплавов образовывать в спаях термо электродвижущую силу, зависящую от температуры спаев;

- **пирометры излучения** применяются для измерения температуры в диапазоне от +100 до 2500 градусов Цельсия. Пирометры излучения работают по принципу измерения излучаемой нагретыми телами энергии, изменяющейся в зависимости от температуры этих тел.

## Практическая работа 11

### Снятие характеристик при измерении температуры с помощью термопреобразователя сопротивления

**Цель работы:** приобретение навыков работы с термометрами сопротивления, а также овладение техникой математической обработки данных, необходимой для расчета их статических характеристик.

**Задание:**

1. Внимательно изучите материал по теме.
2. Ответьте на вопросы:
  - a. Какие материалы используются в качестве проводника в датчиках температуры.
  - b. На чем основан принцип измерения температуры.
  - c. Перечислите металлические РДТ.
  - d. Опишите принцип работы металлических РДТ.
  - e. Что является мерой чувствительности металлического РДТ.
  - f. Понятие и виды интерполяционных функций.
  - g.

### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

#### ***Металлические резистивные датчики температуры (РДТ)***

В основе принципа измерения температуры с помощью резистивных датчиков температуры лежит зависимость электрического сопротивления (проводимости) ЧЭ датчиков от температуры. В качестве материалов для изготовления ЧЭ резистивных датчиков температуры используются металлы, их сплавы, а также полупроводники.

**Полупроводниковые РДТ** называются **термисторами**. Готовые средства измерения температуры на основе металлических РДТ называются термометрами сопротивления (ТС) или термопреобразователями сопротивления.

К преимуществам металлических РДТ перед остальными датчиками температуры следует отнести высокую линейность преобразования, широкий диапазон измеряемых температур (- 200°C...+600°C), высокую долговременную стабильность и точность (особенно для платиновых РДТ – платиновых термометров сопротивления). В соответствии с принятой в 1989 г. Международной температурной шкалой 1990 г. (МТШ-90) температура в диапазоне от минус 259,3467°C (тройная точка водорода) до плюс 961,78°C (точка затвердевания серебра) определяется с помощью эталонного платинового термометра сопротивления [3]. Точность эталонных платиновых термометров сопротивления может достигать 0,0001°C.

В промышленных целях применяются никелевые, медные и платиновые рабочие термометры сопротивления, точность которых не превышает 0,1°C.

#### ***Принцип работы и классификация металлических РДТ***

В соответствии с правилом Матиссена удельное сопротивление металлов зависит от абсолютной температуры, концентрации примесей, дефектов кристаллической решетки, и деформации, причем влияние перечисленных факторов носит аддитивный характер:

$$\rho_{\text{total}} = \rho_t + \rho_i + \rho_d,$$

где  $\rho_{\text{total}}$  – суммарное удельное сопротивление;

$\rho_t$  – удельное сопротивление проводника;

$\rho_i$  - вклад в удельное сопротивление, обусловленный примесными компонентами и дефектами кристаллической решетки;

$\rho_d$  - вклад в удельное сопротивление, обусловленный деформацией кристаллической решетки.

Слагаемые  $\rho_i$  и  $\rho_d$  являются неконтролируемыми, поскольку их изменение может возникнуть в результате процессов окисления, загрязнения, роста зерен (для  $\rho_i$ ), а также механических деформаций, быстрых температурных изменений (для  $\rho_d$ ). По этой причине требуемая точность металлического РДТ определяет ограничения на тип и качество применяемого металла, конструктивное исполнение самого датчика, диапазон рабочих температур, а также на условия эксплуатации (в том числе условия транспортировки и хранения).

Самыми распространенными металлами для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) РДТ являются медь, никель и платина. Медь в качестве материала ЧЭ (чувствительного элемента) применяется потому, что зависимость ее сопротивления от температуры линейна с очень высокой точностью. Однако химическая активность меди не позволяет применять ее при температурах выше +180°C. Кроме того, из-за малого удельного сопротивления, при прочих равных условиях, приходится использовать более длинные проводники, что может приводить к недопустимо большим габаритам датчика. Интерес к никелю обусловлен его высокой чувствительностью к температуре. В интервале температур 0...+100°C его сопротивление увеличивается в 1,67 раза, тогда как у платины – в 1,385 раза. Однако его химическая активность, в частности способность к окислению, может приводить к изменению электрических свойств. Поэтому применение никеля обычно ограничивается температурами ниже +250 °C.

Платина, являясь наиболее химически инертным металлом, применяется для изготовления высокоточных ЧЭ РДТ, работающих в широком температурном диапазоне. В соответствии с Международной Температурной Шкалой 1990 г. (МТШ-90) температура в диапазоне от точки равновесия водорода (-259,3467°C) до точки затвердевания серебра (961,78°C) определяется с помощью платинового термометра сопротивления (ПТС), отградуированного в установленных группах реперных точек.

Существует следующая классификация средств измерения температуры на основе металлических РДТ:

рабочие термометры сопротивления (ТС):

медные (ТСМ), никелевые (ТСН), платиновые (ТСП);

вторичные эталоны – платиновые термометры сопротивления (ПТС 1, 2...-го разрядов);

первичные эталоны – платиновые термометры сопротивления (ПТС нулевого разряда).

### ***Чувствительность металлических РДТ***

Мерой чувствительности металлического РДТ, является температурный коэффициент  $\alpha$ , определяемый по формуле:

$$\alpha = \frac{R(100^{\circ}\text{C}) - R(0^{\circ}\text{C})}{R(0^{\circ}\text{C}) \times 100^{\circ}\text{C}}$$

где  $R(100^{\circ}\text{C})$  – сопротивление РДТ при температуре 100°C;

$R(0^{\circ}\text{C})$  – сопротивление РДТ при температуре 0°C. Единица измерения  $\alpha$  – Ом/Ом-1/°C-1.

Значение коэффициента  $\alpha$  зависит от конкретного металла, его чистоты и механической свободы.

В Таблице 1 приведены ориентировочные значения  $\alpha$  для металлов РДТ разных типов.

Металл  $-\alpha$ ,  $10^{-3}\text{Ом}/\text{Ом}^{-1}/^{\circ}\text{C}^{-1}$

Платина для ПТС 3,925 и выше

Платина для рабочих платиновых -ТС 3,850; 3,910

Медь для медных -ТС 4,260; 4,280

Никель для никелевых -ТС 6,170

Кроме температурного коэффициента  $\alpha$  существует еще несколько величин, характеризующих чувствительность металлических РДТ (Таблица 2).

Таблица 2

| Величина                                                        | Название                                                                              | Единицы измерения            | Тип датчика   |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|
| $S = \frac{dR(T)}{dT}$                                          | Чувствительность                                                                      | $\text{Ом}/^{\circ}\text{C}$ | Рабочие ТС    |
| $W_{100} = \frac{R(100^{\circ}\text{C})}{R(0^{\circ}\text{C})}$ | Относительное сопротивление при $0^{\circ}\text{C}$                                   | -                            | Рабочие ТС    |
| $W_{tp} = \frac{R(T_{tp}) *}{R(0,01^{\circ}\text{C})}$          | Относительное сопротивление при температуре, соответствующей реперной точке ** МТШ-90 | -                            | Эталонные ПТС |

\* - реперная точка–точка, используемая в качестве эталонного значения при градуировке и поверке средства измерения;

\*\*  $0,01^{\circ}\text{C}$  – температура тройной точки воды. Является одной из реперных точек МТШ-90.

### **Интерполяционные функции**

Металлические РДТ демонстрируют хорошую линейность зависимости сопротивления их ЧЭ от температуры. Тем не менее, линейное приближение может привести к ошибкам в несколько градусов и даже десяткам градусов, если производить измерения в широком диапазоне температур.

Вид интерполяционных функций, отражающих зависимость сопротивления металлических РДТ от температуры, определяется требуемой точностью измерений, но не наоборот. Следует обратить внимание на то, что точность аппроксимации (приближение — научный метод, состоящий в замене одних объектов другими, в каком-то смысле близкими к исходным, но более простыми) искомой зависимости не является определяющим фактором в улучшении точности измерения температуры.

Зависимость сопротивления ТС от температуры называется статической характеристикой ТС. В общем случае каждый ТС обладает своей индивидуальной статической характеристикой. В промышленных целях, где требуется взаимозаменяемость используемых ТС и измерительных приборов, работающих с данными ТС, введены номинальные статические характеристики (НСХ). НСХ подразумевает некую общую для всех ТС данного класса статическую характеристику, отклонения от которой для индивидуального ТС нормированы в соответствующих стандартах (МЭК 751, ГОСТ 6651-94, DIN43760, и т.д.).

Коэффициенты А, В, и С могут быть найдены индивидуально для каждого датчика. Для этого необходимо провести измерения сопротивлений датчика при известных температурах, а затем оценить коэффициенты функции (3) с помощью регрессионного анализа. Существует альтернативный метод нахождения коэффициентов функции Каллендара -Ван Дюзена, который называется методом Каллендара -Ван Дюзена. Суть метода заключается в измерении сопротивлений датчиков при четырех известных температурах:

– $R_0 = R(^0C)$  (температура замерзания воды);

– $R_{100} = R(100^0C)$  (температура кипения воды);

– $R_{max} = R(T_{max})$  (максимальная рабочая температура);

– $R_{min} = R(T_{min})$  (минимальная рабочая температура).

Далее вычисляются три коэффициента, отвечающие за линейный, квадратичный, и кубичный слагаемые функции Каллендара -Ван Дюзена:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} ;$$

$$\sigma = \frac{T_{max} - \frac{R_{max} - R_0}{\alpha R_0}}{\left( \frac{T_{max}}{100} - 1 \right) \left( \frac{T_{max}}{100} \right)}$$

## Практическая работа № 12

### Снятие характеристик при измерении температуры с помощью термопреобразователя сопротивления

**Цель работы:** приобретение навыков работы с термометрами сопротивления, с помощью термопреобразователя сопротивления.

**Задание:**

1. Внимательно изучите материал по теме.
  2. Ответьте на вопросы:
    - a. Принцип работы термопреобразователей.
    - b. Опишите как происходит изменение сопротивления в зависимости от температуры для широко используемых материалов первичных преобразователей.
    - c. Перечислите общие характеристики ТС.
    - d. Что является чувствительным элементом и где он находится.
    - e. Назовите материал, используемый для оболочки первичного преобразователя. f.
- Опишите факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики ТС.

В основе работы термопреобразователей сопротивления (ТС) лежит тот принцип, что электрическое сопротивление металла возрастает при увеличении температуры явление известно как «термическое сопротивление». Таким образом, измерение температуры можно осуществить, измеряя сопротивление элемента ТС. Датчики ТС выполняются из резистивного материала с прикрепленными к нему выводами и обычно помещаются в защитную оболочку. В качестве резистивного материала может использоваться платина, медь или никель, на сегодняшний день чаще всего используется платина, благодаря высокой точности, превосходной повторяемости и исключительной линейности таких первичных преобразователей в широком диапазоне, а также благодаря тому, что они демонстрируют большое изменение сопротивления на один градус изменения температуры. См. рисунок 1.

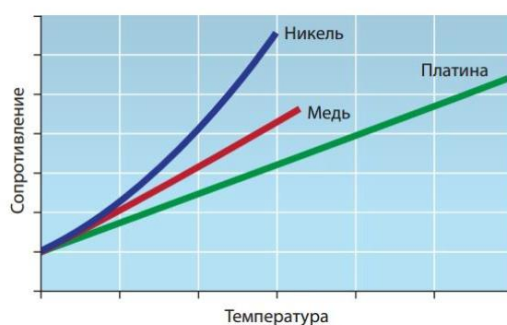


Рисунок 1 -Изменение сопротивления в зависимости от температуры для широко используемых материалов первичных преобразователей

Два наиболее широко распространенных вида термопреобразователей сопротивления, это проволочные и тонкопленочные. Проволочные ТС изготавливаются либо путем намотки резистивной проволоки на керамический сердечник, либо в виде спирально навитой проволоки, заключенной в керамическую оболочку - поэтому они и получили название «проволочные». Для изготовления тонкопленочных термопреобразователей сопротивления, тонкое резистивное покрытие наносится на плоскую (обычно прямоугольную) керамическую подложку.

Медь и никель, как правило, используются в тех промышленных системах, где требования менее жесткие, ввиду их ограниченной точности и линейности, а также сравнительно узких диапазонов температур.

Никелевые элементы имеют ограниченный диапазон температур, потому что изменение сопротивления на градус изменения температуры становится сильно нелинейным при температуре выше 300°C. Использование никелевых ТС с течением лет сократилось из-за ограничений их рабочих характеристик, а также потому, что стоимость платиновых ТС в настоящее время не выше. Сопротивление меди имеет очень линейную зависимость от температуры, но поскольку медь окисляется при умеренных температурах, ее не следует использовать при температурах выше 150 °C. Медные ТС широко используются при измерении температуры обмоток электродвигателей, генераторов и турбин. Медные ТС с сопротивлением 10 Ом были очень популярны в течение многих лет, но сейчас они уступают место 100-омным и даже 1000-омным моделям, дающим большее разрешение и тем самым обеспечивающим более точное измерение. Популярность платиновых ТС растет для решения таких задач. Ввиду того факта, что первичный преобразователь невозможно заменить, не разбирая электродвигатель, многие поставщики и пользователи отдадут предпочтение ТС с двумя чувствительными элементами, а некоторые используют тонкопленочные ТС из-за их большей устойчивости к вибрации и, следовательно, более длительного срока службы.

### Общие характеристики ТС

Промышленные первичные преобразователи редко, если вообще когда-либо, используются таким образом, что они ничем не защищены от воздействия окружающей среды. Они заключаются в металлические трубки или оболочки, которые завариваются наглухо на одном конце, и имеют провода выводов, которые выходят из второго, загерметизированного конца. См. рисунок 1а и рисунок 1б.



Рисунок 1а-Лазерная сварка оболочки первичного преобразователя



Рисунок 1б - Герметизация задней стороны корпуса первичного преобразователя

### Чувствительный элемент

Чувствительный элемент находится на конце первичного преобразователя температуры, на который воздействует температура технологического процесса. Чувствительный элемент реагирует на температуру, генерируя поддающееся измерению изменение сопротивления или сигнал напряжения, который возрастает с увеличением температуры. Измерительные преобразователи могут иметь один или два элемента в одной оболочке первичного преобразователя. Сдвоенные элементы обеспечивают резервированное измерение, что может оказаться полезным для режима горячего резервирования, контроля дрейфа показаний с помощью методики сравнения, или для формирования входных сигналов на два независимых контроллера или две системы (систему управления или систему защиты). См. рисунок 1.1а.

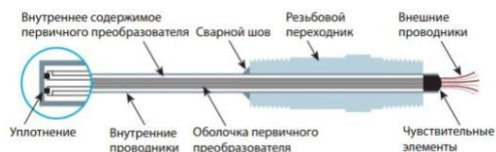
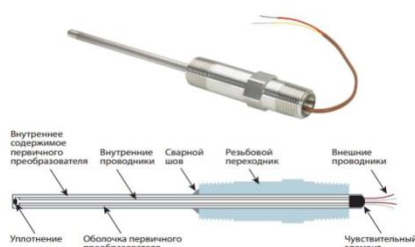


Рисунок 1.1.а. ТС с 2-мя чувствительными элементами

## Оболочка первичных преобразователей

Оболочка первичного преобразователя выполняется из металла, обычно из нержавеющей стали (в некоторых высокотемпературных системах используются сплавы Hastelloy или Inconel), и как правило содержит 2, 4, 6 или 8 проводников, соединяющих чувствительный элемент(ы) с проводами выводов. Одиночная термопара требует двух выводов, а термопаре с 2 ЧЭ требуется четыре вывода. Одиночный ТС может иметь два, три или четыре вывода, а двоянный ТС может иметь четыре, шесть или восемь выводов. Оболочка первичного преобразователя защищает элементы и проводники от влаги и коррозионных и/или абразивных условий технологического процесса и помогает экранировать сигнал от электрических шумов. Чтобы изолировать проводники друг от друга и от оболочки, оболочка заполняется уплотняемым, тонко измельченным изолирующим материалом, обычно оксидом магния ( $MgO$ ) или оксидом алюминия ( $Al_2O_3$ ), который окружает чувствительный элемент и проводники. См. рисунок 1.2а –(Общие характеристики первичного преобразователя температуры)

Диаметры оболочки первичного преобразователя могут быть разными; чаще всего встречаются размеры 6 мм (1/4 дюйма) и 3 мм (1/8 дюйма). Первичные преобразователи меньшего диаметра имеют большее быстродействие, потому что имеют меньшую массу и меньше изолирующего материала. Первичные преобразователи с меньшими диаметрами также обеспечивают более точное измерение благодаря меньшей погрешности, обусловленной теплопроводностью оболочки.



Однако во многих промышленных системах используются защитные гильзы для установки, добавляющие значительную массу к общей массе узла, чем несколько уменьшают положительный эффект обоих этих факторов. Защитная гильза устанавливается в технологическую линию с герметичным уплотнением и имеет внутреннюю полость, в которую помещается первичный преобразователь. Это позволяет легко извлекать первичный преобразователь для калибровки или замены.

## Факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики Сопротивление - значения альфа

Элементы ТС характеризуются их температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который также называют коэффициентом альфа. Для платиновых элементов эти значения регламентирует стандарт IEC 60751-2008.

Альфа - это температурный коэффициент для конкретного материала и состава. Медные и платиновые элементы имеют разные коэффициенты альфа, и у самих платиновых элементов коэффициенты тоже могут быть разными, в зависимости от чистоты платины и состава сплава. Значения альфа определяют взаимозаменяемость первичных преобразователей. Разные элементы ТС характеризуются их температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который также называют коэффициентом альфа. Для платиновых элементов эти значения регламентирует стандарт IEC 60751-2008.

Альфа - это температурный коэффициент для конкретного материала и состава. Медные и платиновые элементы имеют разные коэффициенты альфа, и у самих платиновых элементов коэффициенты тоже могут быть разными, в зависимости от чистоты платины и состава сплава. Значения альфа определяют взаимозаменяемость первичных преобразователей. Разные первичные преобразователи с одним и тем же коэффициентом альфа гарантируют, что зависимость сопротивления от

температуры останется неизменной в пределах указанной точности. При замене первичного преобразователя пользователь должен позаботиться о том, чтобы новый первичный преобразователь был изготовлен из такого же материала с таким же сопротивлением и коэффициентом альфа, например, Pt100: используется  $\alpha = 0,00385$ .

Значение коэффициента альфа определяется выражением для коэффициента альфа:  $\alpha = (R_{100} - R_0) \div 100 R_0$  где  $R_0$  - сопротивление первичного преобразователя при температуре  $0^\circ\text{C}$ , а  $R_{100}$  - сопротивление первичного преобразователя при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Платиновые ТС имеют значения альфа в диапазоне от 0,00375 до 0,003927. Наибольшее значение альфа указывает на наивысшую степень чистоты платины, и такая частота предписывается Международной температурной шкалой 1990 г. (ITS-90) для эталонных (лабораторного класса) платиновых термопреобразователей сопротивления. При практическом применении в промышленности не существует никаких технических преимуществ одного коэффициента альфа перед другим. Платина с коэффициентом 0,00385 наиболее широко используется и является стандартным вариантом, доступным в виде серийных изделий по всему миру. Выпускаются различные виды первичных преобразователей из этого металла, включая проволоочные и тонкопленочные элементы с сопротивлениями от 100 до 1000 Ом. В большинстве случаев все, что нужно знать пользователю о коэффициенте альфа, это то, что он должен быть надлежащим образом согласован при замене ТС или подключении их к контрольно-измерительным приборам.

### **Быстродействие первичного преобразователя**

Быстродействие первичного преобразователя - это время, которое требуется, чтобы сигнал на выходе первичного преобразователя изменился на определенный процент при ступенчатом изменении температуры при определенном наборе условий. Заметим, что существуют разные стандарты на испытания с целью определения быстродействия, которые приводят к результатам, варьирующимся в широких пределах. Сравнивать быстродействие первичных преобразователей можно только в том случае, если испытания первичных преобразователей проводятся по одному стандарту при одинаковых условиях. Но любые изменения в таких условиях, например, плотность рабочей среды, температура или расход, дадут другие результаты. Например, быстродействие будет намного меньшим в газе, чем в быстро текущей жидкости. Быстродействие обычно указывают в секундах в виде значения «t», а рядом указывают уровень сигнала в процентах, при котором это время регистрируется. Например,  $t(0,5)$  означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 50%, а  $t(0,9)$  означает быстродействие для уровня ступенчатого изменения 90%

## Практическая работа 15

### Снятие статических характеристик и изучение принципа работы датчика температуры: бесконтактный пирометр

**Цель работы:** изучение принципа действия, конструкции и методики проведения измерений инфракрасным пирометром.

**Задание:**

1. Внимательно изучите материал по теме.
2. Выполните измерения и заполните таблицу 3.

#### Изучение принципа действия инфракрасного пирометра

Пирометр – бесконтактный термометр, действие которого основано на измерении теплового излучения. Серийно выпускаемые технические пирометры применяются для измерения температур в диапазоне от – 50 до 3000 °С. Пирометры обладают следующими преимуществами по сравнению с приборами, измеряющими температуру контактными методами:

- имеют принципиально неограниченный верхний температурный предел измерения;
- обеспечивают возможность измерения температур излучателей, находящихся на большом расстоянии от пирометра;
- не искажают температурное поле объекта измерения;
- применяются для измерения температур газовых потоков при больших скоростях. Однако контактные методы измерения позволяют обеспечить более высокую точность измерения, чем бесконтактные методы. Все тела излучают электромагнитные волны различной длины  $\lambda$  или частоты  $\nu$ . Электромагнитное излучение, возбуждаемое тепловым движением молекул, называют тепловым излучением. Тепловое излучение имеет место при температурах до 4000 °С как результат колебательного или вращательного движения молекул. При более высоких

температурах излучение вызывается в основном процессами диссоциации и ионизации. Величины и постоянные, применяемые в пирометрии, приведены в таблице 1. Абсолютно черным телом (АЧТ) называется тело, поглощающее все падающее на него излучение.

Таблица 1.

Пирометрические величины и постоянные

| Величина или постоянная                                            | Обозначение              | Определение                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Энергия излучения, Дж                                              | $W$                      | Энергия излучения, эквивалентная работе в 1 Дж                                                                                                           |
| Поток излучения, Вт                                                | $\Phi = dW/dt$           | Поток излучения, эквивалентный мощности в 1 Вт                                                                                                           |
| Энергетическая сила света, Вт/ср                                   | $I = d\Phi/d\Omega$      | Энергетическая сила света, создающая в телесном угле 1 ср поток лучения 1 Вт                                                                             |
| Энергетическая яркость, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)                    | $B = dI/d\Omega$         | Энергетическая яркость тела, перпендикулярно поверхности которого (площадью 1 м <sup>2</sup> ) испускается свет энергетической силой 1 Вт/ср             |
| Спектральная энергетическая яркость, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)       | $B_\lambda = B/d\lambda$ | Спектральная энергетическая яркость тела, при которой в диапазоне длин волн 1 м равномерно распределена энергетическая яркость 1 Вт/(м <sup>2</sup> ·ср) |
| Постоянная Планка, Дж·с                                            | $h$                      | $6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж·с                                                                                                                             |
| Постоянная Больцмана, Дж/К                                         | $k$                      | $1,38054 \cdot 10^{-23}$ Дж/К                                                                                                                            |
| Скорость света в вакууме, км/с                                     | $c$                      | $2,997925 \cdot 10^8$ м/с<br>(300 000 км/с)                                                                                                              |
| Первая постоянная излучения, Вт·м <sup>2</sup>                     | $C_1 = 2 \pi h c$        | $3,7415 \cdot 10^{-1}$ Вт·м <sup>2</sup>                                                                                                                 |
| Вторая постоянная излучения, м·К                                   | $C_2 = hc/k$             | $1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К                                                                                                                              |
| Постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> ) | $\sigma$                 | $5,6697 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )                                                                                              |

Серым телом называют тело, коэффициент поглощения которого не равен 1, но не зависит от длины волны и температуры.

О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем больше энергии оно излучает. Тепловые лучи испускаются всеми нагретыми физическими телами, которые при температурах около 500–600 °С начинают испускать излучение, видимое человеческим глазом, причем яркость свечения нагретых тел быстро возрастает с повышением температуры.

Видимое человеческим глазом электромагнитное излучение, называемое светом, представляет собою лишь весьма узкий диапазон спектра шириной 0,35 мкм с длинами волн от 0,40 до 0,75 мкм.

Невидимые лучи с большей длиной волны (более 0,75 мкм) относятся к **инфракрасному участку** спектра излучения, охватывающему диапазон от 0,75 до 400 мкм, который делится на несколько поддиапазонов (таблица 2), за которым инфракрасный участок спектра постепенно переходит в диапазон радиоволн. Невидимые лучи с меньшей длиной волны (менее 0,40 мкм) относятся к ультрафиолетовому участку спектра излучения.

Таблица 2  
Поддиапазоны инфракрасного спектра

| Длина волн (мкм) | Название диапазона                     |
|------------------|----------------------------------------|
| 0,76–1,5         | Ближнее инфракрасное излучение         |
| 1,5–5,5          | Коротковолновое инфракрасное излучение |
| 5,6–25           | Длинноволновое инфракрасное излучение  |
| 25–100           | Дальнее инфракрасное излучение         |

Для измерения температуры используют в основном диапазон инфракрасных и видимых лучей, для этого разработаны пирометры следующих типов:

- пирометр частичного излучения (ПЧИ) (квазимонохроматический пирометр) – измеряет энергию в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;

- пирометр спектрального отношения (ПСО) – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра;

- пирометр суммарного (полного) излучения (ПСИ) – измеряется полная энергия излучения.

В зависимости от типа пирометра различаются яркостная, цветовая и радиационная температуры, по которым проводится измерение температуры.

**Яркостной** температурой реального тела  $T_{\lambda}$  называют температуру, при которой плотность потока спектрального излучения абсолютно черного тела равна плотности потока спектрального излучения реального тела для той же длины волны (или узкого интервала спектра) при действительной температуре  $T_d$ .

**Цветовой** температурой реального тела  $T_c$  называют температуру, при которой отношения

плотностей потоков излучения абсолютно черного тела для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равно отношению плотностей потоков излучений реального тела для тех же длин волн при действительной температуре  $T_d$ .

**Радиационной** температурой реального тела  $T_r$  называют температуру, при которой полная мощность абсолютно черного тела равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре  $T_d$ .

Развитием методики использования бесконтактных средств измерения является **тепловидение**.

Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, -- методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабонагретых объектов.

Приборы, работающие в этом направлении называются **тепловизорами** (термографами). **Тепловизоры** относятся к оптико-электронным приборам пассивного типа, работающим в инфракрасном диапазоне спектра излучения.

Принцип действия: радиометрическое измерение температуры с пространственным разрешением и преобразованием температурного поля в тепловизионное изображение с цветовым контрастом, позволяющее измерять градиенты температуры, температуру тела, объекта, среды.

На экране тепловизора видны значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения тепловизора, отображенные согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

При проведении измерений температуры инфракрасным пирометром вводятся следующие понятия:

- поле зрения прибора – измеряемый диаметр объекта, с поверхности которого прибор принимает энергию инфракрасного излучения;
- измеряемый диаметр объекта – величина определяется показателем визирования и зависит от расстояния до инфракрасного термометра. Измеряемый диаметр объекта равен произведению показателя визирования на расстояние до объекта;
- минимальный измеряемый диаметр – наименьший диаметр объекта, который может быть измерен при данном фокусном расстоянии и размере приемника. При приближении к объекту вплотную измеряемый диаметр увеличивается до размеров входного зрачка прибора.

Измеренная пирометром температура будет неверна, если размер объекта меньше поля зрения, были измерить, не заполнил все поле зрения прибора, прибор принимает излучение от других объектов, которое оказывает влияние на точность проводимого измерения (рисунок 3).

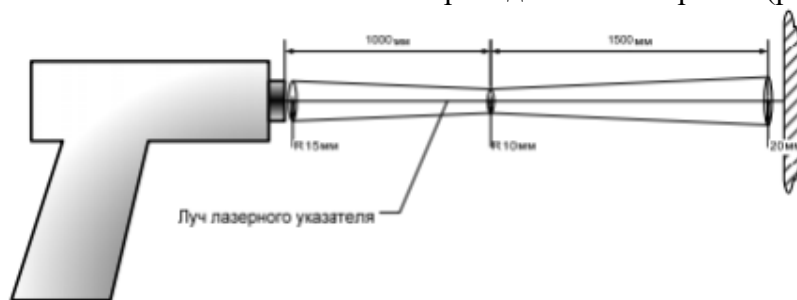


Рисунок 3-Поле зрения инфракрасного термометра

### Порядок выполнения работы

Лабораторная установка (рисунок 4) состоит из поверхности 1 со встроенными точечными источниками температуры с нанесенной координатной сеткой, измерительных приборов, инфракрасного термометра 2 и контактного термоэлектрического термометра 3 для измерения

температуры плоских поверхностей.

В данной лабораторной работе необходимо провести два измерения температуры. **Первое** – инфракрасным термометром, **второе** – измерить температуру в этой же точке поверхности контактным термоэлектрическим термометром. Полученные данные занести в таблицу 3

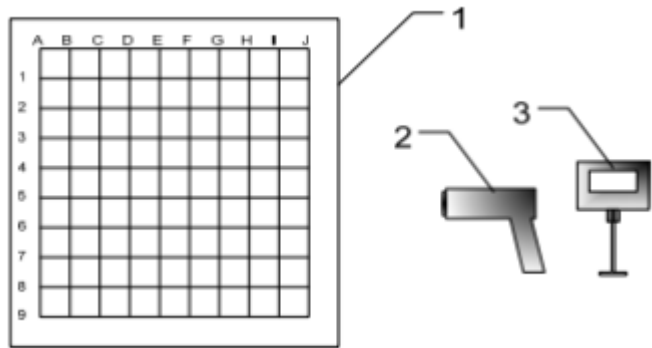


Рисунок 4- Схема лабораторной установки

Произвести обработку полученных данных и определить абсолютную погрешность измерения температуры ( $\Delta t$ ):

где  $t_{кт}$  и  $t_{ик}$  – температуры, измеренные контактным и инфракрасным термометром, °C.

Полученные при поверке значения абсолютной погрешности сравниваются с величиной

$$\Delta_d = \frac{t_{вп} - K}{100},$$

допускаемой погрешности:

где  $t_{вп}$  – верхний предел измерения инфракрасным термометром по паспорту, °C;

K – класс точности инфракрасного термометра по паспорту.

Таблица 3.  
Таблица измерений

| №<br>п/п | Измерения                |                          | Погрешность прибора |             |
|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------|
|          | контактного              | ИК                       | абсолютная          | допускаемая |
|          | $t_{кт}, ^\circ\text{C}$ | $t_{ик}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t$          | $\Delta_d$  |
|          |                          |                          |                     |             |
|          |                          |                          |                     |             |
|          |                          |                          |                     |             |

## Практическая работа 16

### Изучение принципа работы датчика температуры: термопара

**Термопарой**, или термоэлектрическим преобразователем, называют устройство для измерения температуры, основой работы которого является термоэлектрический эффект.

В бытовых целях используются в различных приборах, в самых простых и технически сложных: от утюгов, паяльников, холодильников до автомобилей и отопительных котлов. Благодаря большому диапазону измеряемых температур (от  $-250^{\circ}\text{C}$  до  $+2500^{\circ}\text{C}$ ) широкое применение термопары нашли в промышленности, коммунальном хозяйстве, науке и медицине. Также термоэлектрические преобразователи работают как часть систем автоматики и управления, снимая и передавая данные об изменениях температуры. Такие датчики отличаются надежностью, невысокой стоимостью, необходимой точностью и низкой инертностью.

Работа термопары основана на свойстве изменения термо-ЭДС (термоэлектродвижущей силы) от повышения или уменьшения температуры. Точность показаний зависит от типа конструкции, соблюдения технологических требований, схемы подключения проводников.

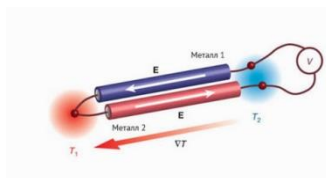
Конструкция термоэлектрического преобразователя обусловлена тепловой инерцией и чувствительностью используемых элементов, условиями применения: диапазоном температур, агрессивностью и агрегатным состоянием среды, необходимостью использовать защиту.

#### Принцип работы термопары

Принцип действия термопары - термоэлектрический эффект, или эффект Зеебека.

Явление это было открыто ученым в 1821 году и состоит в следующем:

В замкнутой цепи из двух разнородных проводников возникает электродвижущая сила (термо-ЭДС), если места их соединения, или спай, поддерживать при разной температуре. Эффект не возникает в случае использования однородных материалов, а также при одинаковых температурах спаев. Величина термоэлектродвижущей силы зависит от материала проводников и разницы температур контактов, направление тока в контуре - от того, температура какого спая выше.



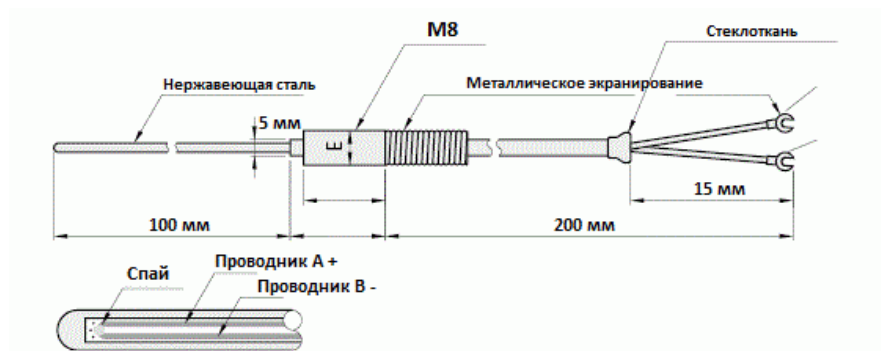
На практике в термопаре используют проводники из разных сплавов, они также называются термоэлектродами. Один спай, «горячий», выполняют сваркой или скручиванием и помещают в среду с измеряемой температурой; другой, «холодный», замыкается на контакты измерительного прибора или соединяется с устройством автоматического управления. В современных сложных термопарах

используются цифровые преобразователи сигнала.

Термо-ЭДС возникает за счет разницы потенциалов между соединениями проводников при интенсивном нагреве или охлаждении горячего спаи. Напряжение на холодном спае пропорционально зависит от температуры на горячем. При этом температура на холодном должна быть постоянной, иначе возникает большая погрешность измерений. Для высокой точности холодный контакт помещается в специальные камеры, где температура поддерживается на одном уровне.

Как датчики температур термоэлектрические преобразователи применяют в автоматизированных системах управления. В газовом оборудовании (котлы, плиты, колонки) с помощью термопар осуществляют термоконтроль. По данным термопар срабатывает аварийное отключение приборов, если превышена допустимая температура.

От назначения термопары зависит ее конструкция и материалы проводников: различные комбинации металлов предназначены для различных сред и диапазонов температур.



Рабочие элементы для защиты от воздействия внешних факторов могут помещаться в колбу, или чехол: например, защитный материал для термопары в газовом котле - нержавеющая или обычная сталь. При температурах до 1000-1100°C применяют жаростойкие сплавы, при более высоких — фарфор, тугоплавкие сплавы. Для измерений в особых условиях среды, к примеру, при высоком давлении, требуется герметичность термопары.

Если среда измерения не оказывает вредного влияния на проводники, защиту не используют. Бескорпусный вариант с незакрытым местом соединения двух проводников отличается низкой инертностью и практически мгновенным измерением температуры.

В зависимости от количества мест измерения термопары могут быть одноточечные и многоточечные. Соответственно, длина рабочей части термопары колеблется от 120 мм до 20000 мм. Потребность во многих точках измерения (до нескольких десятков) возникает, в частности, в химической и нефтехимической промышленности для тех емкостей, где перерабатываются жидкости (реакторов, баков, колонн фракционирования).

### Классификация термопар

Принцип действия термопары основан на возникновении разности потенциалов в проводниках, поэтому металлы термоэлектродов должны отличаться по химическим и физическим характеристикам. Для применения в термопарах используются различные сплавы цветных и благородных металлов.

Благородные металлы позволяют существенно повысить точность измерений, сказывается меньшая термоэлектрическая неоднородность и стойкость к окислению. Они используются для измерений до 1900°C, при более высоких температурах необходимы специальные жаростойкие сплавы. Неблагородные металлы применяются до 1400°C.

Все материалы проводников обладают различной плавкостью, стойкостью к окислению, диапазоном рабочих температур. Именно в указанном производителем интервале температур возможна качественная работа устройства и точные данные измерений.

Для классификации групп термопар по российскому ГОСТу используют три кириллические буквы, международная классификация подразумевает обозначение одной буквой латиницы: например, нихросил-нисловая термопара имеет обозначение ТНН, или N; платинородий-платинородиевая — ТПР, тип В.

Другая классификация термопар учитывает типы спаев, которые могут быть использованы:

- одноэлементные и двухэлементные;
- изолированные и соединенные с корпусом;
- заземленные и незаземленные.

Инерционность термопары снижается при заземлении на корпус, а это увеличивает быстродействие и точность измерений. Также для уменьшения инерционности в некоторых устройствах спай оставляют снаружи защитного корпуса.