

Міністерство світи і науки України  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
фізико-технічний факультет  
кафедра радіоелектронної автоматики

В.Б.Мазуренко

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ  
УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ

Конспект лекцій

Дніпро

2019

Наведено конспект лекцій з курсу «Фізичні основи автоматизованих систем управління та контролю», який розроблено відповідно до освітньо-професійної програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Для студентів фізико-технічного факультету ДНУ, що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на першому рівні вищої освіти.

Укладач: доцент кафедри радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара Мазуренко Валерій Борисович.

## Лекція № 1

**Тема:** Автоматизированные системы управления и контроля. Введение.

**Оглавление**

Основные понятия.....	2
Измерения .....	2
Контроль .....	2
Управление .....	3
Примеры систем автоматического управления и контроля .....	4
Система наполнения бака.....	4
Автоматические двери.....	4
Беспилотный автомобиль .....	7
Система управления промышленным объектом .....	7
Архитектура автоматизированных систем управления и контроля ....	8
Содержание курса .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля.....	11
Уровень курса.....	11

## **Основные понятия**

---

### ***Измерения***

Получение информации о количественных характеристиках свойств объектов и явлений окружающего мира опытным путем (то есть экспериментально) называется ИЗМЕРЕНИЕМ. В отличие от количественной информации, получаемой теоретическим путем, то есть посредством вычислений и расчетов, такая информация называется измерительной.

Полученная тем или иным способом количественная информация о свойствах объектов и явлений окружающего мира преобразуется, передается и представляется в наглядной форме в информационно-измерительных системах или других устройствах отображения и регистрации информации.

### ***Контроль***

Технический контроль – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям

Сущность всякого контроля сводится к осуществлению двух основных этапов:

1. Получение информации о фактическом состоянии некоторого объекта, о признаках и показателях его свойств. Эту информацию можно назвать первичной.

2. Сопоставление первичной информации с заранее установленными требованиями, нормами, критериями, т.е. обнаружение соответствия или несоответствия фактических данных требуемым (ожидаемым). Информацию о рассогласовании (расхождении) фактических и требуемых данных можно называть вторичной.

Объектом, данные о состоянии и (или) свойствах которого подлежат при контроле сопоставлению с установленными требованиями, может быть продукция или процесс.

В ряде случаев граница во времени между первым и вторым этапами контроля неразличима. В таких случаях первый этап может быть выражен нечетко или может практически не наблюдаться. Характерным примером является контроль размера калибром, сводящийся к операции сопоставления фактического и предельно допустимого значений размера.

Далее вторичная информация используется для выработки соответствующих управляющих воздействий на объект, подвергавшийся контролю. В этом смысле всякий контроль всегда активен. Необходимо отметить в связи с этим, что всякий контроль, кроме того, всегда в той или иной степени должен быть профилактическим, поскольку вторичная информация может использоваться для совершенствования разработки, производства и эксплуатации продукции, для повышения ее качества и т.д.

Однако, принятие решений на основе анализа вторичной информации, выработка соответствующих управляющих воздействий уже не является частью контроля. Это следующий этап управления, основанный на результатах контроля - неотъемлемой и существенной части всякого управления. При техническом контроле первичная информация сопоставляется с техническими требованиями, записанными в нормативной документации, с признаками контрольного образца, с данными, зафиксированными при помощи калибра и т.д.

### **Управление**

С древних времен человек хотел использовать предметы и силы природы в своих целях, то есть управлять ими. Множество задач управления в современном мире связано с техническими системами – автомобилями, кораблями, самолетами, станками. Например, нужно поддерживать заданный курс корабля, высоту самолета, частоту вращения двигателя, температуру в холодильнике или в печи. Если эти задачи решаются без участия человека, говорят об автоматическом управлении.

**Управление** – деятельность субъекта по изменению объекта для достижения некоторой цели.

Для управления необходимо выполнять следующие три действия:

1. Получать информацию о состоянии объекта, то есть выполнять *измерения*. Если мы хотим изменить объект, то мы в первую очередь должны знать каков он сейчас, в данный момент. То есть знать текущее состояние объекта: каковы его параметры, его свойства, а если точнее – иметь численные значения физических величин, которые характеризуют данный объект.

2. Принимать решение о необходимости изменения состояния объекта, выбирать способ воздействия на объект и определять характеристики необходимого управляющего воздействия. Решение о необходимости изменения состояния объекта принимается в том случае, если текущее состояние объекта по определенным причинам нас не устраивает. Таким образом, мы выполняем *контроль*: мы сравниваем известное нам измеренное состояние объекта с желаемым, то есть тем состоянием, которое соответствует заданной нами цели.

3. Воздействовать на объект.

Для выполнения указанных функций в состав любой системы управления должны входить:

- датчики,
- управляющая система (решающее устройство),
- исполнительные устройства.

## Примеры систем автоматического управления и контроля

### Система наполнения бака

Рассмотрим простейшую систему автоматического наполнения резервуара с водой (рис. 1). Задача системы управления – поддерживать в заданных пределах (от минимального - **min** до максимального - **max**) количество воды в емкости.

В состав системы входят датчики - два датчика уровня и исполнительное устройство – насос с электродвигателем. Роль решающего устройства играет специальное реле.

Работа реле основана на кондуктометрическом методе определения наличия жидкости, который основан на электрической проводимости жидкостей и возникновении микротока между электродами. Реле имеют переключающие контакты, что позволяет использовать режим наполнения или слива. Принцип работы реле основан на измерении сопротивления жидкости, находящейся между двумя погруженными датчиками. Если измеренное сопротивление оказывается менее величины порога срабатывания, тогда состояние контактов реле меняется.

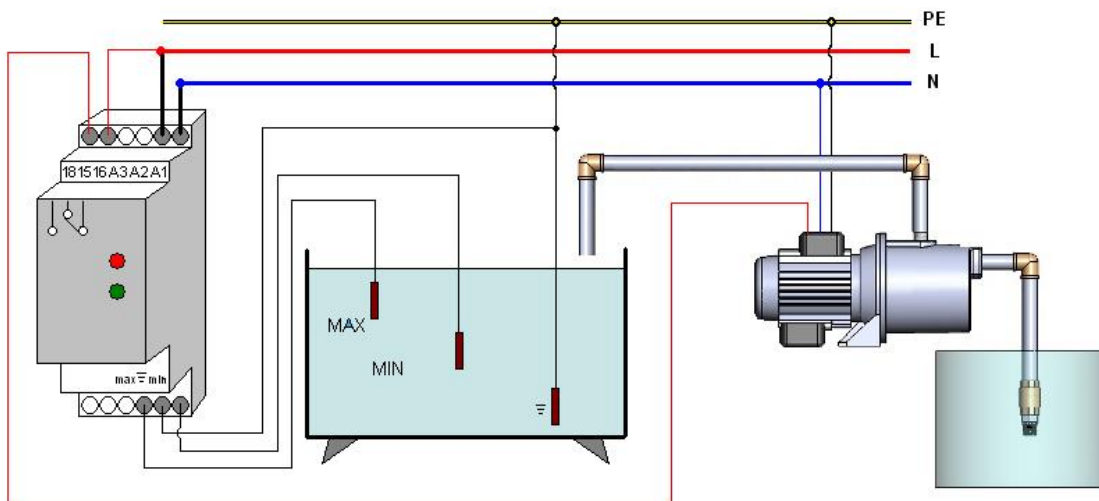


Рис. 1 – Система автоматического наполнения резервуара с водой

### Автоматические двери

В основу работы всех автоматически открываемых дверей заложен принцип перемещения полотна посредством электрического мотора – его смело можно назвать «сердцем» подобных дверных конструкций, которое путем всевозможных механизмов передает свою энергию дверному полотну, заставляя его перемещаться в нужном направлении. Чтобы обеспечить адекватное автоматическое открывание и закрывание дверей, все до единой конструкции оборудуются датчиками, реагирующими на движение. Поймав присутствие человека на подходе к дверям, они подают команду электронному

управляющему устройству, которое в свою очередь запускает электродвигатель, тем самым приводя в движение систему открывания двери. Если датчик в течение определенного времени (обычно оно настраивается индивидуально) не улавливает движений, то он самостоятельно подает команду на закрытие дверного полотна.



Рис. 2 – Исполнительное устройство автоматических дверей.

Практически все автоматические двери стандартной комплектации имеют несколько режимов работы, за соблюдением которых следит все тот же электронный контроллер. В зависимости от времени года или условий эксплуатации дверей, их можно перевести в один из пяти режимов работы.

- Стандартный или основной режим, при котором двери полноценно обеспечивают проход человека с обеих сторон.
- Зимний режим работы – электроника не дает полотнам открываться по полной программе, а притормаживает их на полпути, тем самым снижая выброс теплого воздуха на улицу.
- Режим «закрыто».
- Режим «полностью открыто» – можно сказать, летний вариант.
- Односторонний режим работы, который позволяет регулировать потоки людских масс, устремляя их в определенном направлении через отдельные двери. Таким способом в больших общественных зданиях предотвращают столпотворения.

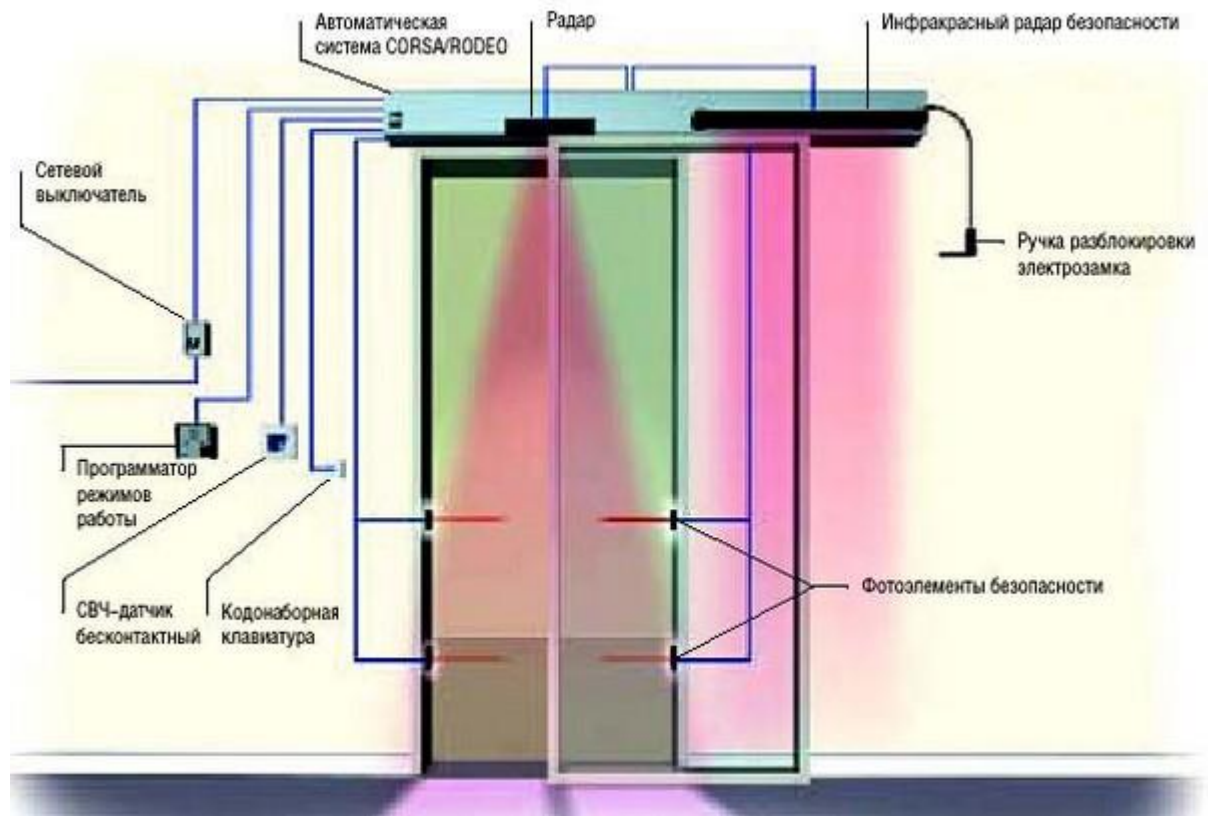


Рис. 3 – Схема расположения элементов автоматических дверей

Кроме всего прочего, практически все автоматические двери имеют настраиваемые функции. Так называемые регулировки, посредством которых устанавливается и время нахождения дверей в открытом состоянии, и расстояние до человека, когда они начинают открываться, и скорость движения дверного полотна, и даже торможение двери в последний момент закрывания – в общем, все необходимое, чтобы обеспечить комфортную эксплуатацию автоматических дверей. Подобные двери не лишены и системы безопасности – как правило, их оборудуют так называемым световым барьером, фотоэлемент которого регистрирует препятствия на пути закрывания створок. Улавливая их, он подает команду на открывание дверных полотен. Человека не стиснет между створками, как это бывает обычно в троллейбусах или городских автобусах, оборудованных складными дверями.



### Беспилотный автомобиль



Рис. 4 – Принцип работы беспилотного автомобиля Toyota Prius в версии Google.

### Система управления промышленным объектом

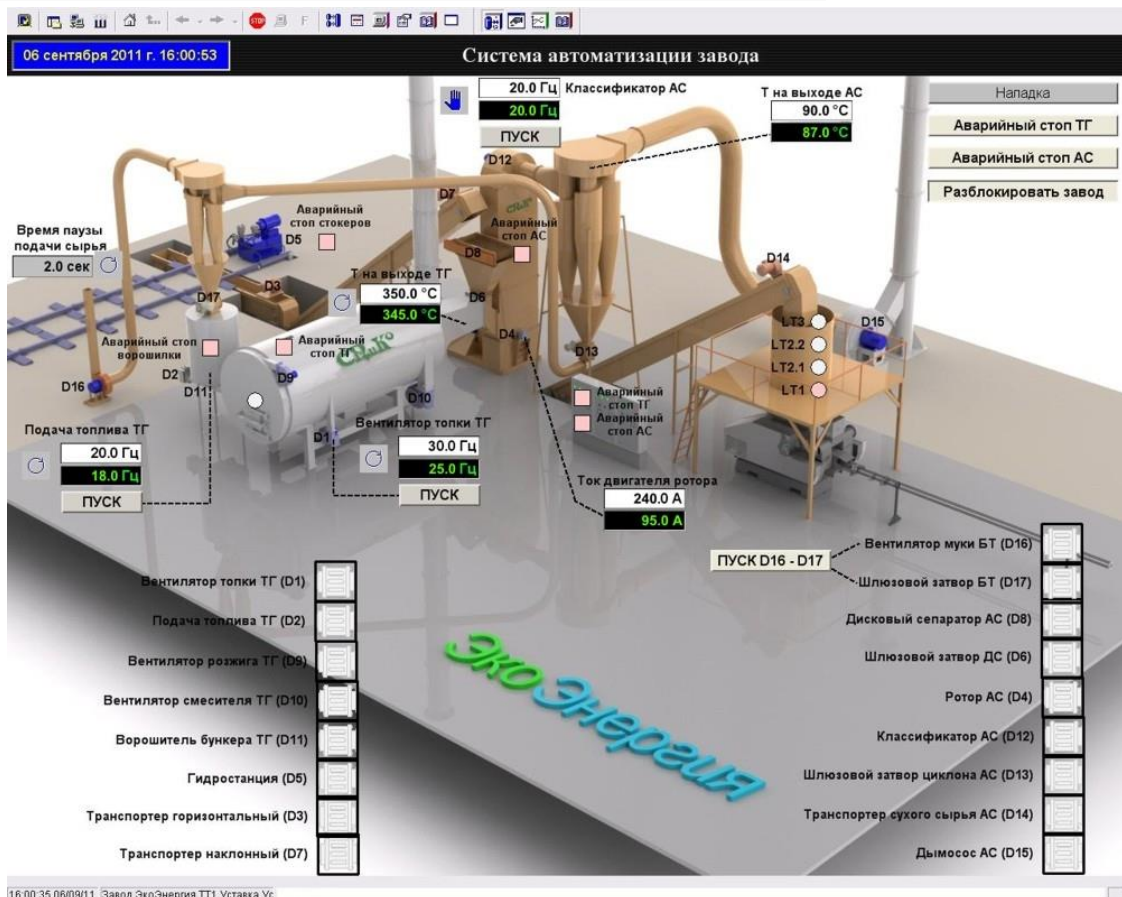


Рис. 5 – Система управления промышленным объектом

## Архитектура автоматизированных систем управления и контроля

Современные автоматизированные системы управления и контроля строятся на основе компьютерно-интегрированных технологий. Можно сказать, что системы, в которых реализуются компьютерно-интегрированные технологии, представляют собой следующее поколение автоматических и автоматизированных измерительных систем, систем управления и контроля, а также АСУ ТП - автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Классическая архитектура управляющей системы воплощена в моносистеме (рис.6) – сосредоточенной системе, которая обеспечивает управление сосредоточенным объектом управления. Сосредоточенными в данном случае можно называть системы, в которых расстояние от датчиков и приводов до компьютера исчисляется метрами или десятками метров.

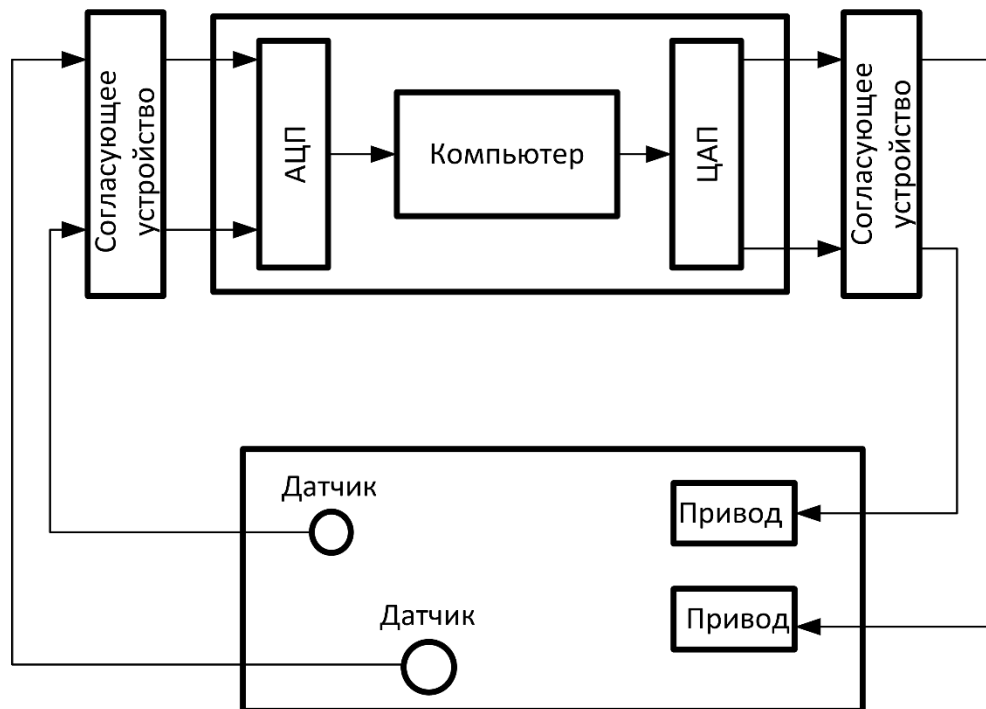


Рис. 6 Сосредоточенная система

Со временем стали развиваться распределенные системы (рис. 7), которые обеспечивают измерение и управление на совокупности объектов. В этом случае расстояния обычно составляют сотни метров и километры, а в некоторых случаях - десятки километров.

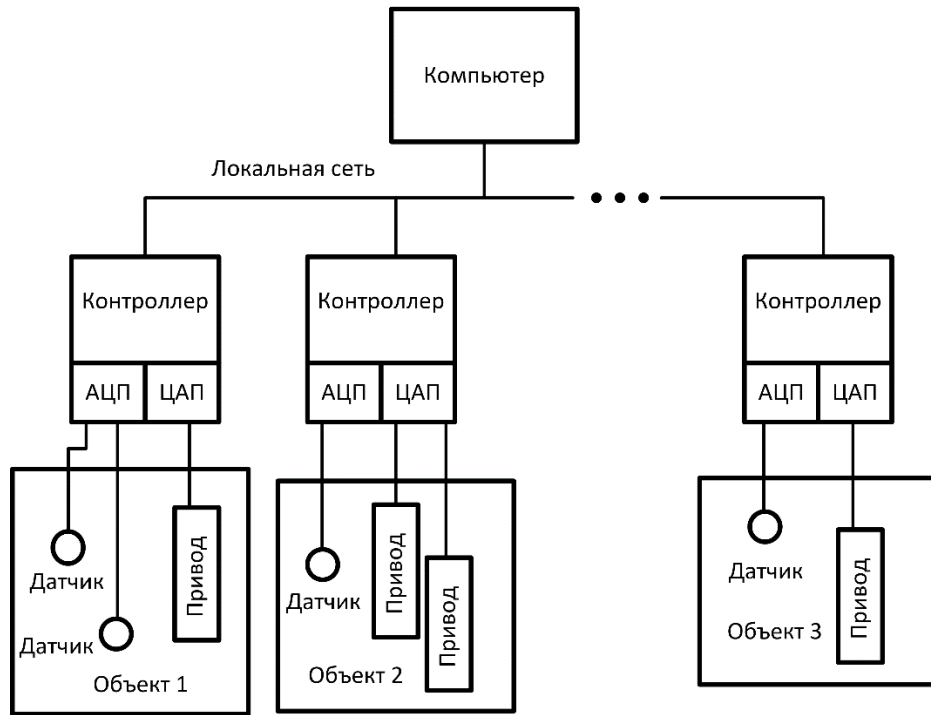


Рис.7 Распределенная система

Класс решаемых при помощи компьютерно-интегрированных технологий постоянно расширяется. В последнее время все более широкое применение находят глобально распределенные системы - системы в которых объекты контроля отстоят на значительные расстояния - расстояния, которые уже не ограничены какими-либо пределами. Такие системы строятся по схеме, представленной на следующем рисунке. Они, в основном, являются измерительными.

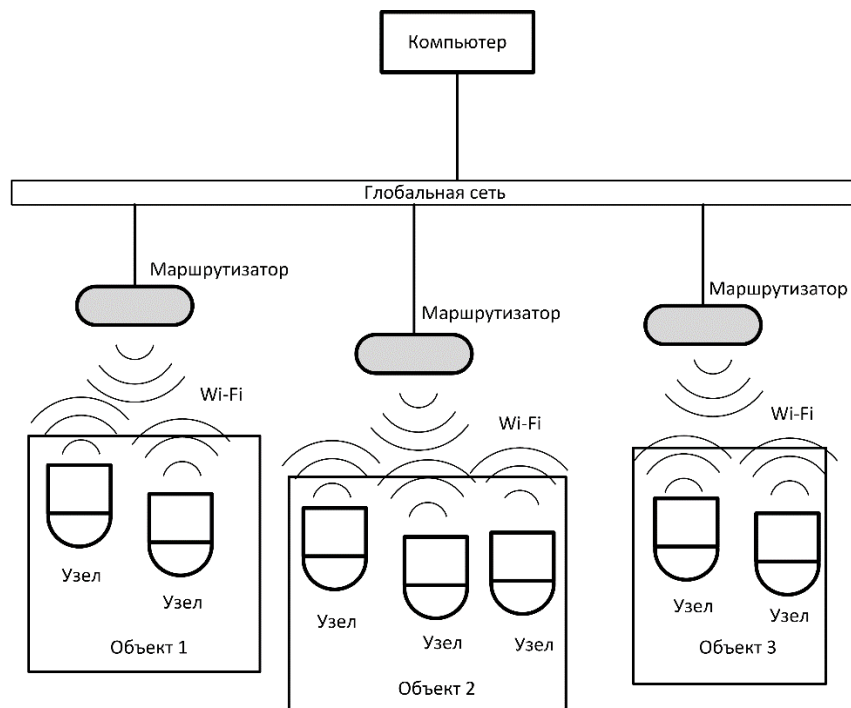


Рис. 8 Глобально распределенная система

Как можно видеть, системы, реализующие компьютерно-интегрированные технологии, в основном строятся с применением таких аппаратных средств:

- компьютер и/или контроллер,
- аналогово-цифровой преобразователь (АЦП),
- цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП),
- датчики (или "узлы"),
- исполнительные устройства (или привода),
- локальная сеть,
- глобальная сеть.

### **Содержание курса**

---

В данном курсе " Фізичні основи автоматизованих систем управління та контролю" будут рассмотрены датчики, исполнительные устройства, аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, а также физические основы их функционирования.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

1. Что такое измерение?
2. Что такое контроль?
3. Что такое управление?
4. В чем отличие измерения и контроля?
5. Как связан контроль с измерением и управлением?
6. При проведении технического контроля какая информация называется первичной?
7. При проведении технического контроля какая информация называется вторичной?
8. Какие действия необходимы для осуществления управления?
9. Какие составляющие части должна включать в себя любая система управления?
10. Опишите работу простейшей системы наполнения резервуара водой.
11. Какие датчики входят в состав автоматических дверей?
12. Что является исполнительным механизмом автоматических дверей?
13. Что является решающим устройством автоматических дверей?
14. Представьте на рисунке функциональную схему сосредоточенной управляющей системы.
15. Представьте на рисунке функциональную схему распределенной управляющей системы.
16. Представьте на рисунке функциональную схему глобально распределенной измерительной системы.
17. Перечислите основные аппаратные средства компьютеризированных систем управления и контроля.

### *Уровень курса*

1. Основные понятия: измерение, контроль, управление и их содержание.
2. Архитектура сосредоточенной компьютерно-интегрированной системы.
3. Архитектура распределенной компьютерно-интегрированной системы.

## Лекція № 2

**Тема:** Первичные преобразователи и датчики: термины и определения.  
Классификация датчиков.

**Оглавление**

Объект .....	3
Физическая величина.....	3
Преобразователи .....	4
Датчики .....	5
Измерительные устройства, приборы, системы .....	6
Характеристики средств измерительной техники .....	7
Классификация датчиков, основные требования к ним.....	8
Параметрические датчики.....	10
Омические (резистивные) датчики .....	11
Индуктивные датчики .....	11
Емкостные датчики.....	11
Датчики – генераторы.....	11
Индукционные датчики.....	12
Термоэлектрические преобразователи (термопары).....	12
Пьезоэлектрические датчики .....	12
Приложение 1 .....	13
Контрольные вопросы по теме .....	17
Уровень модуля.....	17
Уровень курса.....	18

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Рекомендации по Межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения

3. ДСТУ 3651.0-97 ОСНОВНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ. Основні положення, назви та позначення.
4. ДСТУ 3651.1-97 ПОХІДНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ ТА ПОЗАСИСТЕМНІ ОДИНИЦІ. Основні поняття, назви та позначення.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»  
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>

## Объект

---

**Объект** – это явление или часть внешнего или внутреннего мира, которые наблюдает или может наблюдать человек в данный момент.

**Материальный объект** – это предмет материального исследования, сведения о котором нужны исследователю.

**Объект измерения или контроля** – это материальный объект или процесс, совокупность свойств которого определяет содержание ожидаемой информации. Объект измерения или контроля характеризуется измеряемыми физическими величинами или зависимостями между ними.

## Физическая величина

---

Окружающая нас реальность представлена объектами, свойствами и явлениями материального и духовного мира. Объектом материального мира, например, является пространство, а его свойством — протяженность. Последняя может характеризоваться различными способами. Общепринятой характеристикой (мерой) пространственной протяженности служит *длина*. Однако протяженность реального физического пространства является сложным свойством, которое не может характеризоваться только длиной. Для полного описания пространства рассматривается его протяженность по нескольким направлениям (координатам) или дополнительно используются такие меры, как *угол*, *площадь*, *объем*. Это связано с тем, что пространство является многомерным.

Любые события и явления в реальном мире происходят не мгновенно, а имеют некоторую длительность. Это свойство окружающего нас мира качественно отличается от пространственной протяженности. Его также можно характеризовать по-разному, но общепринятой мерой здесь является *время*.

Свойство тел сохранять при отсутствии внешних воздействий состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инертностью. Мерой инертности служит *масса*.

Свойство тел, состоящее в том, что они нагреты до некоторого состояния, качественно отличается от предыдущего. Оно могло бы характеризоваться средней скоростью теплового движения молекул, но распространение получила другая мера нагретости тел, называемая термодинамической *температурой*.

Общепринятые или установленные законодательным путем характеристики (меры) различных свойств, общие в качественном отношении для многих физических объектов (физических систем, их состояний и происходящих в них процессов), но в количественном отношении индивидуальные для них, называются *физическими величинами*. Кроме



вышеперечисленных длины, времени, массы и температуры к ним относятся *плоский и телесный угол, скорость, ускорение, сила и давление, мощность и энергия, яркость, освещенность, сила электрического тока, напряженность электрического поля* и многие другие.

Объектами измерений являются физические величины (ФВ). **Физическая величина** трактуется как одно из свойств физического объекта, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

## Преобразователи

В литературе достаточно широко используются термины «измерительное преобразование», «измерительный преобразователь», «датчик», «чувствительный элемент», «сенсор», «измерительный прибор», «средство измерений», а их определения – самые разнообразные. Например:

**Преобразователями** называют устройства, которые преобразуют одни физические величины, один вид энергии, один вид информации в другую физическую величину, в другой вид энергии или в другой вид информации. В широком смысле преобразователь – это, например, устройство, преобразующее давление в электрический сигнал (датчик давления), напряжение одного уровня в напряжение другого (трансформатор), электрическое напряжение во вращение вала (электродвигатель), энергию в движение (самолет, автомобиль) и т.д. Даже живой организм – это тоже своеобразный преобразователь.

**Измерительное преобразование** – это преобразование входного измерительного сигнала в функционально связанный с ним выходной сигнал.

**Измерительный преобразователь (ИП)** – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

ИП или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений. По характеру преобразования различают *аналоговые, цифро-аналоговые, аналого-цифровые* преобразователи. По месту в измерительной цепи различают *первичные и промежуточные преобразователи*. Выделяют также *масштабные и передающие преобразователи*.

**Первичный измерительный преобразователь** – измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая

физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы).

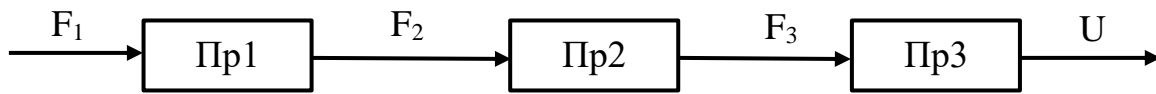


Рис. 1 Функциональная схема датчика: Пр1, Пр2, Пр3 – преобразователи (Пр1 – первичный преобразователь);  $F_1$  – входная физическая величина;  $F_2, F_3$  – промежуточные физические величины;  $U$  – выходной электрический сигнал

**Чувствительный элемент** – конструктивный элемент или прибор, воспринимающий измеряемую физическую величину. Чувствительный элемент является первичным измерительным преобразователем в измерительной цепи и осуществляет преобразование входного сигнала (измеряемой величины) в величину, удобную для последующей информационной обработки.

В различных областях техники чувствительный элемент называют сенсором, детектором, датчиком, приемником, зондом или измерительной головкой.

### **Датчики**

Датчик является обязательным элементом измерительных приборов, систем контроля и регулирования и т.п. Без датчиков невозможны ни измерение, ни контроль, ни регулирование.

**Датчик** – это преобразователь измеряемой (контролируемой) физической величины в величину, удобную для дальнейшего преобразования или измерения.

Понятие датчик имеет целый ряд различных определений. Разные специалисты зачастую по-разному трактуют это понятие. Тем не менее, это абсолютно не мешает применять датчики для проведения самых различных измерений. Важно понимать, что такие различия существуют. Ниже приведены некоторые примеры отличающихся подходов к тому, что же называть датчиком.

Под датчиком чаще всего понимают конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он "дает" информацию). Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы.

Датчиком иногда называют средство измерений, представляющее собой конструктивно завершённое устройство, размещаемое в процессе измерения непосредственно в зоне исследуемого объекта, которое выполняет функцию

измерительного преобразователя. В таком датчике имеется сразу несколько преобразователей. Многие современные датчики обладают автономными источниками питания, имеют цифровой выход или даже оснащены устройством беспроводной связи, что позволяет им передавать информацию об объекте непосредственно в сеть.

В английском языке слово «sensor» означает «сенсор», «датчик», «чувствительный элемент».

В технической терминологии понятия сенсор, датчик, чувствительный элемент, первичный измерительный преобразователь, детектор, приемник достаточно близки и на практике зачастую заменяют друг друга.

Для построения датчиков используется значительное (более 500) количество физических эффектов (принципов). Некоторые из них приведены в приложении 1. Развитие, совершенствование датчиков в значительной степени определяется достижениями в области физики, химии, физической химии, механики, радиотехники и других наук. Особое место в развитии датчиков занимают достижения и возможности современных технологий.

Принципы действия датчиков могут быть самыми разнообразными в зависимости от физической природы измеряемой величины, ее абсолютного значения, требуемой точности преобразования и т.п. Однако в подавляющем большинстве случаев преобразование входных физических величин в соответствующие выходные сигналы связано с преобразованием энергии, в том числе преобразованием энергии одного вида в другой. Любой датчик является преобразователем энергии. Вне зависимости от типа измеряемой величины всегда происходит передача энергии от исследуемого объекта к датчику. Работа датчика – это особый случай передачи информации, а любая передача информации связана с передачей энергии.

### **Измерительные устройства, приборы, системы**

---

**Измерительный прибор** – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

По способу индикации значений измеряемой величины измерительные приборы разделяют на *показывающие* и *регистрирующие*. По действию измерительные приборы разделяют на *интегрирующие* и *суммирующие*. Различают также *приборы прямого действия* и *приборы сравнения, аналоговые* и *цифровые приборы, самопишущие* и *печатающие приборы*

**Измерительная система (ИС)** – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или

нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на *измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы* и др. Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют *гибкой измерительной системой* (ГИС).

Примеры:

1 Измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде физических величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов.

2 Радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга

**Измерительная цепь** – совокупность элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода. Измерительную цепь измерительной системы называют измерительным каналом.

**Измерительное устройство** – часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и имеющая обособленную конструкцию и назначение.

Измерительные устройства, приборы, системы в целом относятся к **средствам измерительной техники** (СИТ).

### **Характеристики средств измерительной техники**

---

**Градуировочная характеристика средства измерения** – зависимость между значениями величин на входе и выходе средства измерений, полученная экспериментально. Градуированная характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы

**Смещение нуля** – показание средства измерений, отличное от нуля, при входном сигнале, равном нулю. Различают *смещение механического нуля*, наблюдаемое как отклонение указателя от нуля шкалы приборов с механическими указателями, и *смещение электрического нуля*, наблюдаемое как существование выходного сигнала при нулевом входном сигнале приборов.

**Дрейф показаний средства измерений** – изменение показаний средства измерений во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов.

**Чувствительность средства измерений** – свойство средства измерений, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины.

Различают *абсолютную* и *относительную чувствительность*. *Абсолютную* чувствительность определяют по формуле  $S = \Delta l / \Delta x$ , *относительную чувствительность* - по формуле  $S_0 = \Delta l / (\Delta x / x)$ , где  $\Delta l$  - изменение сигнала на выходе,  $x$  - измеряемая величина,  $\Delta x$  - изменение измеряемой величины.

**Порог чувствительности средства измерений** – характеристика средства измерений в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством. Например, если самое незначительное изменение массы, которое вызывает перемещение стрелки весов, составляет 10 мг, то порог чувствительности весов равен 10 мг.

**Зона нечувствительности средства измерений** – диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают выходного сигнала средства измерений. Иногда зону называют мертвой. Она наблюдается вблизи некоторых радионавигационных систем или измерительных установок. Например, зона нечувствительности у судовой радиолокационной установки, зависящая от размеров судна и высоты антенны радиолокационной установки над судовыми надстройками

**Разрешение средства измерений** – характеристика средства измерений, выражаемая наименьшим интервалом времени между отдельными импульсами или наименьшим расстоянием между объектами, которые фиксируются прибором раздельно. Исходя из указанного определения различают временное разрешение и пространственное разрешение

### **Классификация датчиков, основные требования к ним**

---

Автоматизация различных технологических процессов, эффективное управление различными агрегатами, машинами, механизмами требуют многочисленных измерений разнообразных физических величин.

**Датчик** – это элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину (температуру, давление, частоту, силу света, электрическое напряжение, ток и т.д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы. Или проще, датчик – это устройство, преобразующее входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования.

Используемые датчики весьма разнообразны и могут быть классифицированы по различным признакам:

**В зависимости от вида входной (измеряемой) величины** различают: датчики механических перемещений (линейных и угловых), пневматические, электрические, расходомеры, датчики скорости, ускорения, усилия, температуры, давления и др.

В настоящее время существует приблизительно следующее распределение доли измерений различных физических величин в промышленности: температура – 50%, расход (массовый и объемный) – 15%, давление – 10%, уровень – 5%, количество (масса, объем) – 5%, время – 4%, электрические и магнитные величины – менее 4%.

**По виду выходной величины, в которую преобразуется входная величина**, различают *неэлектрические* и *электрические*: датчики постоянного тока (ЭДС или напряжения), датчики амплитуды переменного тока (ЭДС или напряжения), датчики частоты переменного тока (ЭДС или напряжения), датчики сопротивления (активного, индуктивного или емкостного) и др.

Большинство датчиков являются электрическими. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений:

- электрические величины удобно передавать на расстояние, причем передача осуществляется с высокой скоростью;
- электрические величины универсальны в том смысле, что любые другие величины могут быть преобразованы в электрические и наоборот;
- они точно преобразуются в цифровой код и позволяют достигнуть высокой точности, чувствительности и быстродействия средств измерений.

**По принципу действия датчики** можно разделить на два класса: *генераторные* и *параметрические* (датчики-модуляторы). Генераторные датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины в электрический сигнал.

Параметрические датчики входную величину преобразуют в изменение какого-либо электрического параметра (R, L или C) датчика.

По принципу действия датчики также можно разделить на омические, реостатные, фотоэлектрические (оптико-электронные), индуктивные, емкостные и др.

#### **Различают три класса датчиков:**

- аналоговые датчики, т. е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины;
- цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово;
- бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: "включено/выключено" (иначе говоря, 0 или 1); получили широкое распространение благодаря своей простоте.

Классификация датчиков	Измеряемые величины																										
	Перемещение	Положение	Скорость	Ускорение	Сила	Нагрузка	Растяжение	Крутящий момент	Лин. и круг. преобразования	Вибрация	Поток	Температура	Давление	Вакуум	Относительная влажность	Атомный контур	Газовая концентрация	Состояние крови, pH	Оптические поля	ИК излучения	Магнитные поля	Акустические поля	Аудиополя и шум	Рентгенография	Не разрушающий контроль	Измерения угловой скорости	Счетчики Гейгера-Мюллера
Емкостные	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Индуктивные	●	●	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Электромагнитные	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Резистивные	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Тензодатчики	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Датчики деформации	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Терморезисторы	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Термисторы	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Магниторезисторы и датчики Холла	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Датчики на химич. полевых транзисторах	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Волноводные датчики	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Пьезодатчики	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Преобразователи Доплера	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Полимерные датчики	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Датчики на ПАВ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Туннельные преобразователи	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Термодинамические датчики	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ионизирующие датчики	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Фотонные преобразователи	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Оптоэлектронные (физ) преобразователи	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Оптоэлектронные (хим) преобразователи	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

**Требования, предъявляемые к датчикам:**

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- стабильность характеристик во времени;
- высокая чувствительность;
- малые размеры и масса;
- отсутствие обратного воздействия на контролируемый процесс и на контролируемый параметр;
- работа при различных условиях эксплуатации;
- различные варианты монтажа.

**Параметрические датчики**

Параметрические датчики (датчики-модуляторы) входную величину X преобразуют в изменение какого-либо электрического параметра (R, L или C) датчика. Передать на расстояние изменение перечисленных параметров датчика без энергонесущего сигнала (напряжения или тока) невозможно. Выявить изменение соответствующего параметра датчика только и можно по реакции датчика на ток или напряжение, поскольку перечисленные параметры и характеризуют эту реакцию. Поэтому параметрические датчики требуют применения специальных измерительных цепей с питанием постоянным или переменным током.

### **Омические (резистивные) датчики**

Омические (резистивные) датчики – принцип действия основан на изменении их активного сопротивления при изменении длины  $l$ , площади сечения  $S$  или удельного сопротивления  $\rho$ :

$$R = \rho l / S$$

Кроме того, используется зависимость величины активного сопротивления от контактного давления и освещённости фотоэлементов. В соответствии с этим омические датчики делят на: *контактные, потенциометрические (реостатные), тензорезисторные, терморезисторные, фоторезисторные.*

### **Индуктивные датчики**

Индуктивные датчики служат для бесконтактного получения информации о перемещениях рабочих органов машин, механизмов, роботов и т.п. и преобразования этой информации в электрический сигнал.

Принцип действия индуктивного датчика основан на изменении индуктивности обмотки на магнитопроводе в зависимости от положения отдельных элементов магнитопровода (якоря, сердечника и др.). В таких датчиках линейное или угловое перемещение  $X$  (входная величина) преобразуется в изменение индуктивности ( $L$ ) датчика. Применяются для измерения угловых и линейных перемещений, деформаций, контроля размеров и т.д.

### **Емкостные датчики**

Принцип действия емкостных датчиков основан на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними.

### **Датчики – генераторы**

---

Генераторные датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины  $X$  в электрический сигнал. Такие датчики преобразуют энергию источника входной (измеряемой) величины сразу в электрический сигнал, т.е. они являются как бы генераторами электроэнергии (откуда и название таких датчиков - они генерируют электрический сигнал).

Дополнительные источники электроэнергии для работы таких датчиков принципиально не требуются (тем не менее дополнительная электроэнергия может потребоваться для усиления выходного сигнала датчика, его преобразования в другие виды сигналов и других целей). Генераторными являются термоэлектрические, пьезоэлектрические, индукционные, фотоэлектрические и многие другие типы датчиков.



### ***Индукционные датчики***

Индукционные датчики преобразуют измеряемую неэлектрическую величину в ЭДС индукции. Принцип действия датчиков основан на законе электромагнитной индукции. К этим датчикам относятся тахогенераторы постоянного и переменного тока, представляющие собой небольшие электромашинные генераторы, у которых выходное напряжение пропорционально угловой скорости вращения вала генератора. Тахогенераторы используются как датчики угловой скорости.

### ***Термоэлектрические преобразователи (термопары)***

Принцип действия термопар основан на термоэлектрическом эффекте, который состоит в том, что при наличии разности температур мест соединений (спаев) двух разнородных металлов или полупроводников в контуре возникает электродвижущая сила, называемая термоэлектродвижущей (сокращенно термо-ЭДС). В определенном интервале температур можно считать, что термо-ЭДС прямо пропорциональна разности температур  $\Delta T = T_1 - T_0$  между спаями на концах термопары.

### ***Пьезоэлектрические датчики***

Действие пьезоэлектрических датчиков основано на использовании пьезоэлектрического эффекта (пьезоэффекта), заключающегося в том, что при сжатии или растяжении некоторых кристаллов на их гранях появляется электрический заряд, величина которого пропорциональна действующей силе.

## Приложение 1

**Физические эффекты, используемые для построения датчиков**

<i>N n/n</i>	<i>Название эффекта</i>	<i>Краткое содержание эффекта</i>
1	Акустический парамагнитный резонанс	Резонансное поглощение энергии ультразвуковой волны определенной частоты при ее прохождении сквозь парамагнитный кристалл, который находится в постоянном магнитном поле
2	Вентильный фотоэффект	Возникновение электродвижущей силы в системе, которая включает контакт двух разных полупроводников или полупроводника и металла, при поглощении оптического излучения
3	Вихревые токи (токи Фуко)	Возникновение замкнутых электрических токов в массивном электропроводнике при изменении интенсивности магнитного потока, который пересекает его
4	Гальваноупругий магнитный эффект	Изменение электрического сопротивления ферромагнетика, размещенного в магнитном поле, при воздействии одностороннего упругого напряжения растяжением или сжатием
5	Действие магнитного поля на контур с электрическим током	Вращение рамки с током под действием вращательного момента, который возникает при размещении рамки в однородном магнитном поле
6	Электротепловой эффект	Изменение температуры пьезоэлектрического кристалла под воздействием электрического ПОЛЯ
7	Электростатическая индукция	Возникновение на поверхности проводника или диэлектрика одинаковых и противоположных по знаку зарядов под действием внешнего электрического ПОЛЯ
8	Электромагнитная индукция	Возникновение электродвижущей силы индукции в электропроводящем контуре при изменении во времени магнитного потока через ограниченную контуром поверхность
9	Эффект Зеебека	В электрической цепи из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют разные температуры, возникает электродвижущая сила
10	Эффект Томсона	В проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры, выделяется или поглощается теплота (кроме выделения джоулевой теплоты)
11	Эффект Пельтье	При протекании электрического тока через контакт разнородных металлов в нем выделяется или поглощается теплота
12	Эффект Холла	Между боковыми гранями пластины из металлического проводника или полупроводника, вдоль которого протекает электрический ток, при действии перпендикулярного магнитного ПОЛЯ возникает разность потенциалов
13	Электрострикция	Деформация диэлектрика под воздействием внешнего электрического поля, пропорциональная квадрату напряженности поля
14	Эффект Фарадея	Вращение плоскости поляризации линейно поляризуемого света, который распространяется в изотропном веществе вдоль постоянного магнитного поля, в котором находится это вещество
15	Эффект Нерста	Возникновение продольного градиента температуры в проводнике с током, который находится в магнитном поле

16	Эффект Нерста-Эттингсхаузена	Возникновение электрического поля в твердом проводнике при наличии градиента температуры и перпендикулярного к нему магнитного поля
17	Эффект Риги-Ледюка	Возникновение вторичной разности температур в проводнике с перепадом температуры, размещенном в магнитном поле перпендикулярно к тепловому потоку
18	Закон Кулона	Взаимодействие двух заряженных тел с силой, пропорциональной произведению их зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними
19	Закон всемирного тяготения	Действие на тело, которое находится в произвольной точке гравитационного поля, создаваемого массой тела, силы гравитации, которая зависит от массы этого тела, и напряженности гравитационного поля
20	Закон Ампера	Возникновение механической силы, которая действует на проводник с током, при перемещении проводника во внешнем магнитном поле
21	Закон Ома	Возникновение в проводнике электрического тока, плотность которого пропорциональна напряженности поля
22	Закон Био-Савара-Лапласа	При протекании по электропроводнику электрического тока вокруг него в пространстве возникает магнитное поле
23	Обратный пьезоэлектрический эффект	В анизотропных кристаллических диэлектриках под действием электрического поля возникает механическая деформация
24	Закон Джоуля-Ленца	В электропроводнике выделяется тепловая энергия, количество которой пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени протекания тока
25	Закон Фарадея	Количество вещества, которое выделяется или разлагается на электроде при электролизе, пропорционально количеству электричества (произведению силы тока на время электролиза), которое прошло через поверхность контакта электрода с раствором
26	Зависимость Нерста равновесного потенциала электрода от концентрации вещества	Равновесный потенциал металлического электрода в растворе неорганического вещества пропорционален газовой постоянной, температуре и логарифму концентрации вещества и обратно пропорционален заряду иона и константе Фарадея
27	Зависимость электропроводности жидкого вещества от ее концентрации	Электропроводность жидкого вещества в определенном объеме пропорциональна площади электрода и удельной электропроводности вещества и обратно пропорциональна длине электрода
28	Зависимость температуры плавления твердого тела от внешнего давления	Изменение температуры плавления кристаллических веществ при увеличении внешнего давления. Если удельный объем жидкой фазы больше, чем твердой, то температура плавления увеличивается
29	Зависимость электрического сопротивления твердого тела от давления	Изменение электрического сопротивления твердого тела при изменении внешнего давления в области высоких температур. В большинстве веществ электрическое сопротивление уменьшается с увеличением давления

30	Зависимость показателя преломления газов от плотности	Увеличение показателя преломления газа с увеличением его плотности. Зависимость является квадратичной
31	Зависимость показателя преломления газов от давления	Увеличение показателя преломления газа при увеличении его давления. Зависимость в широком диапазоне изменений давления описывается полиномом некоторой степени
32	Зависимость модуля упругости металлов от температуры	Уменьшение модуля упругости металлов с увеличением температуры
33	Зависимость границы текучести металлов и сплавов от температуры	Уменьшение границы текучести металлов и сплавов с ростом температуры. Зависимость является близкой к экспоненциальной
34	Зависимость плотности металлов от температуры при переходе через точку плавления	Скачкообразное уменьшение плотности металлов с увеличением температуры вблизи температуры плавления
35	Звуколюми-несценция	Свечение жидкости под действием интенсивной акустической волны (при акустической кавитации)
36	Ионизация газа под действием электрического поля	Под действием сильного электрического поля атомы и молекулы газа превращаются в положительные и отрицательные ионы и свободные электроны
37	Ионизация газа рентгеновским излучением	Возникновение положительных и отрицательных ионов и свободных электронов в газе под действием электромагнитного излучения рентгеновского диапазона
38	Катодолюминесценция	Излучение света, который возникает при возбуждении люминофора электронным пучком
39	Магниторезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления твердых проводников под действием магнитного поля
40	Магнитострикция	Изменение формы и размеров тела при его намагничивании
41	Магнитный гистерезис	Неоднозначная зависимость намагниченности ферромагнитного тела от напряженности внешнего магнитного поля. При циклическом изменении напряженности поля кривая изменения намагниченности имеет вид петли магнитного гистерезиса
42	Намагничивание тел	Возникновение или изменение намагниченности вещества при действии на него внешнего магнитного поля. Диамагнетики намагничиваются против поля, пара- и ферромагнетики - в направлении поля
43	Пьезоэлектрический эффект	Изменение поляризации некоторых кристаллических диэлектриков (пьезоэлектриков) при механической деформации
44	Пьезомагнитный эффект	Возникновение в веществе намагниченности под действием внешнего давления
45	Пироэлектрический эффект	Возникновение электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (пироэлектриков) при их нагревании или охлаждении

46	Поверхностный эффект	Переменный ток в электропроводнике неравномерно распределяется по площади его сечения. Неравномерность плотности тока увеличивается с увеличением частоты тока и площади сечения проводника
47	Поглощение звука	Уменьшение интенсивности акустической волны, которая проходит сквозь вещество, в результате необратимого перехода энергии волны в другие виды энергии, в частности, в теплоту
48	Поглощение света	Уменьшение интенсивности электромагнитного излучения при прохождении сквозь вещество
49	Поляризация диэлектриков	Возникновение объемного дипольного момента диэлектрика под действием электрического поля. На поверхности диэлектрика появляются связанные поляризуемые заряды
50	Сверхпроводимость	Скачкообразное уменьшение практически до нуля электрического сопротивления ряда металлических проводников и сильнолегированных полупроводников при охлаждении ниже критической температуры, характерной для данного материала
51	Сила Лоренца	Действие на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле, силы, перпендикулярной к вектору магнитной индукции поля и вектору скорости движения частицы
52	Тензорезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления в твердых электропроводниках под действием растягивающих или сжимающих напряжений
53	Тепловое расширение тел	Изменение размеров тела при его нагревании. Характеризуется коэффициентом линейного (для твердых тел) или объемного (для жидких и газообразных тел) теплового расширения
54	Термоэлектронная эмиссия	Излучение электронов нагретыми телами в вакуум или другую среду
55	Терморезистивный эффект	Изменение электрического сопротивления электропроводных тел при изменении их температуры. В металлических проводниках сопротивление растет с ростом температуры, в жидких электролитах и полупроводниках - уменьшается
56	Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект)	Излучение электронов твердыми телами и жидкостями в вакуум или другую среду под действием электромагнитного излучения

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Дайте определение понятию "объект".
2. Дайте определение понятию "материальный объект".
3. Дайте определение понятию "объект измерения или контроля".
4. Что такое физическая величина?
5. Приведите примеры физических величин.
6. Какой прибор называется измерительным?
7. Что такое измерительная система?
8. В чем отличие измерительной системы от измерительного прибора?
9. Что такое измерительная цепь?
10. Что называют измерительным каналом?
11. Что называется измерительным преобразователем?
12. Какой измерительный преобразователь называют первичным?
13. Что такое датчик?
14. Какое устройство называют чувствительным элементом?
15. Дайте определение понятию "градуировочная характеристика" средства измерения.
16. В каком виде может быть представлена градуировочная характеристика?
17. Что такое "смещение нуля"?
18. Какую характеристику средства измерения называют чувствительностью?
19. Какая характеристика средства измерения называется разрешением?
20. Приведите примеры разделения датчиков в зависимости от вида входной (измеряемой) величины?
21. Как разделяются датчики по виду выходной величины?
22. Укажите преимущества преобразования входной (измеряемой) величины в электрическую величину?
23. Как разделяются электрические датчики по принципу действия?
24. Какие датчики называются генераторными?
25. Какие датчики называются параметрическими?
26. Какой электрический параметр может изменяться в параметрическом датчике?
27. Какие требования предъявляются к датчикам?
28. На чем основывается принцип действия омических (резистивных) датчиков?
29. Для каких целей служат индуктивные датчики?
30. В чем состоит принцип действия емкостных датчиков?

31. На чем основан принцип действия индукционных датчиков?
32. Приведите пример индукционного датчика.
33. В чем состоит термоэлектрический эффект?
34. Термо-ЭДС прямо- квадратично- или кубично- пропорциональна разности температур между спаями на концах термопары?
35. В чем заключается явление пьезоэффекта?

### ***Уровень курса***

1. Физическая величина как свойство объекта.
2. Преобразование физических величин, измерительные преобразователи. Определения.
3. Измерительные устройства, приборы и системы. Определения.
4. Характеристики средств измерительной техники.
5. Классификация датчиков.
6. Классы датчиков: параметрические и генераторные датчики.

### Лекція № 3

**Тема:** Физические основы измерения температур. Неэлектрические методы измерения. Резистивные методы измерения. Терморезисторы на основе металлов и металлопленочные терморезисторы.

### Оглавление

Температура как физическая величина .....	3
Неэлектрические методы измерения температуры .....	3
Электрические методы измерений температуры.....	4
Терморезистивные преобразователи температуры .....	5
Терморезисторы на основе металлов.....	5
Конструкция чувствительных элементов терморезистивных преобразователей температуры на основе металлов.....	8
Металлопленочные терморезисторы .....	10
Подключение терморезисторов к измерительной схеме .....	10
Двухпроводная схема подключения терморезисторов .....	11
Трёхпроводная схема подключения терморезисторов .....	12
Четырёхпроводная схема подключения терморезисторов .....	12
Контрольные вопросы по теме .....	14
Уровень модуля.....	14
Уровень курса.....	14

### Источники:

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Рекомендации по Межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения
3. ДСТУ 3651.0-97 ОСНОВНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ. Основні положення, назви та позначення.



4. ДСТУ 3651.1-97 ПОХІДНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ ТА ПОЗАСИСТЕМНІ ОДИНИЦІ. Основні поняття, назви та позначення.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»  
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>

## Температура как физическая величина

---

В современном промышленном производстве наиболее распространенными являются измерения температуры (так, на атомной электростанции среднего размера имеется около 1500 точек, в которых производится такое измерение, а на крупном предприятии химической промышленности подобных точек присутствует свыше 20 тыс.). Широкий диапазон измеряемых температур, разнообразие условий использования средств измерений и требований к ним определяют многообразие применяемых средств измерения температуры.

Температура – это статистически сформированная термодинамическая величина, которая характеризует уровень внутренней энергии тела. Носителями внутренней энергии являются атомы и молекулы тела, кинетическая энергия движения которых определяет температуру. В процессе соударения молекул происходит обмен их энергетических импульсов и выравнивания распределения энергий между ними, то есть устанавливается равновесное состояние, при котором все формы кинетической энергии молекул и атомов тела характеризуются одним значением температуры. Такую равновесную температуру называют термодинамической [1, 3, 6, 9, 10].

Измерение температур производится на основе температурных шкал. В распространеннейшей шкале Цельсия в качестве опорных точек приняты температура замерзания ( $0^{\circ}\text{C}$ ) и кипения ( $100^{\circ}\text{C}$ ) воды. Рабочими веществами в этой шкале служат спирт или ртуть. Если начало отсчета установлено от абсолютного нуля температур, то получаем абсолютную термодинамическую шкалу, единицей которой служит градус К. Значения температур по этим шкалам соотносятся  $T = t + 273,15 \text{ К}$ .

Чаще всего приходится измерять средние и высокие температуры в интервале от  $-80$  до  $3000\text{...}3500^{\circ}\text{C}$ . Такой широкий диапазон измеряемых температур и разнообразие условий измерений обусловили большое количество методов и средств их измерений. В современном промышленном производстве преимущественно используются электрические средства измерений температуры, достоинства которых общеизвестны.

## Неэлектрические методы измерения температуры

---

Приборы, использующие неэлектрические методы измерения температур можно разделить на жидкостные, манометрические термометры и термоиндикаторы.

Действие **жидкостных термометров** основано на термическом расширении жидкости, заключенной в капилляре термометра.

Их выпускают в различных модификациях для температурного диапазона  $0 \text{ ... } 500^{\circ}\text{C}$ . Изготавливают также термометры специального

назначения, например электроконтактные, используемые для регулирования технологических процессов, и максимальные (минимальные), предназначенные для регистрации максимальной (минимальной) температуры в данный период.

Действие **манометрических термометров** основано на зависимости между температурой и давлением рабочего вещества (обычно газа), заключенного в замкнутом объеме.

Газовые манометрические термометры предназначены для измерения температур в пределах от  $-160$  до  $+600$  °С. Рабочим веществом обычно является азот.

Конденсационные (парожидкостные) манометрические термометры работают в диапазоне от  $-60$  до  $+320$  °С. Рабочие вещества метилхлорид, спирт, этиловый эфир.

Жидкостные манометрические термометры используют для измерений температур в области от  $-160$  до  $+320$  °С (ртутные от  $-25$  до  $+600$  °С). Рабочая жидкость ртуть, метаксиллол, силиконовые жидкости, металлы с низкой точкой плавления.

Действие **термоиндикаторов** основано на изменении агрегатного состояния, яркости и цвета свечения некоторых веществ при нагреве. С их помощью можно быстро и экономично получить информацию о тепловом режиме объекта. Преимуществом термоиндикаторов является возможность запоминания распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность. К недостаткам термоиндикаторов следует отнести инерционность, сравнительно невысокую точность, необходимость нанесения на изделие специальных покрытий, сложность изучения динамических температурных режимов. Включение их в системы терморегулирования представляет значительные трудности.

### **Электрические методы измерений температуры**

---

Электрические методы измерений температуры можно разделить на контактные и бесконтактные. При контактных методах используется первичный преобразователь (датчик), который в процессе измерения находится в непосредственном тепловом контакте со средой, температуру которой измеряют. Тепло от исследуемого объекта к чувствительному элементу преобразователя передается теплопроводностью и конвекцией.

Бесконтактный метод основывается на свойстве нагретых тел излучать тепловую энергию – световое излучение видимого или инфракрасного диапазона. По параметрам этого излучения и определяют температуру исследуемого объекта.

Выбор того или иного метода и средств измерений определяется рядом факторов, а именно: значениями измеряемых температур, агрессивностью исследуемой среды и ее динамическими характеристиками, а также необходимой чувствительностью и точностью измерения. Часто эти факторы противоречивы, что усложняет выбор метода. Определяющим является, в первую очередь, диапазон измеряемых температур и необходимая точность измерения.

При контактном методе измерений, когда первичный преобразователь помещается непосредственно в исследуемую среду, всегда наблюдается некоторое искажение температурного поля среды как следствие неоднородности теплофизических свойств среды и преобразователя, а также неточность превращения температуры среды в температуру преобразователя.

### **Терморезистивные преобразователи температуры**

Терморезисторы – это резистивные элементы, изготовленные из проводникового или полупроводникового материала с положительным или отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Принцип действия терморезисторов основывается на зависимости их сопротивления от температуры.

#### ***Терморезисторы на основе металлов.***

Для создания терморезисторов используют материалы, которые имеют стабильный ТКС, воспроизводимость электрического сопротивления при данной температуре, большое удельное сопротивление, стабильные химические и физические свойства при нагревании, инертные к влиянию исследуемой среды.

Из проводниковых материалов широко применяется платина, медь, никель. Среди них выделяется **платина**. Этот благородный металл даже при высоких температурах в окислительной среде не изменяет своих физических и химических свойств. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне 0...100°C имеет приблизительно  $1/273 \text{ K}^{-1}$ , удельное сопротивление при 20°C равняется 0,105 Ом мм<sup>2</sup>/м, интервал измеряемых температур достигает -260... ...+1300 °C.

Температурная зависимость сопротивления платины в диапазоне 0...650 °C описывается уравнением:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2)$$

где  $R_T$ ,  $R_0$  – сопротивления преобразователя при температуре  $T$ °C и 0 °C;  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты (для платинового провода, который применяется в промышленных термопреобразователях температуры,

$$A = 3,9702 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}, \quad B = -5,8893 \cdot 10^{-7} 1/\text{K}.$$

В интервале температур  $-250 \dots 0^\circ\text{C}$  зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид:

$$R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + C (T - 100)^3],$$

где  $C = -4,356 \cdot 10^{-12} 1/\text{K}$  – постоянный коэффициент.

В интервале температур от  $-200$  до  $+650^\circ\text{C}$  приведенные зависимости являются точной аппроксимацией функции преобразования платиновых преобразователей температуры, в результате чего их используют в качестве эталонных для воссоздания Международной температурной шкалы. К недостаткам платиновых преобразователей температуры принадлежат достаточно высокая загрязняемость платины при высоких температурах парами металлов (особенно кремния и железа), сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, в результате чего она становится хрупкой, теряет стабильность характеристик.

**Медь** широко применяется в преобразователях температуры в интервале  $-40 \dots +180^\circ\text{C}$ . Температурный коэффициент сопротивления меди  $\alpha_T = 1/234,7 \text{ K}^{-1}$ , зависимость электрического сопротивления от температуры – линейная:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha_T T)$$

К недостаткам медных преобразователей температуры принадлежат высокая окисляемость меди при нагревании, поэтому терморезисторы из меди применяются в указанном, сравнительно узком, диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов. Кроме платины и меди для чувствительных элементов термопреобразователей температуры применяют никель, вольфрам и другие чистые металлы (табл. 1).

Таблица 1

Некоторые физические свойства материалов терморезистивных преобразователей (при  $20^\circ\text{C}$ )

Материал	ТКС $\times 10^{-3}$	Удельное сопротивление, Ом $\text{мм}^2/\text{м}$	Температура плавления, $^\circ\text{C}$
Платина	3,91	0,105	1773
Медь	4,28	0,017	1083
Никель	6,3-6,6	0,068	1455
Вольфрам	4,82	0,055	3410
Молибден	4,57	0,052	2630
Рений	3,11	0,211	3170
Родий	4,57	0,047	1960
Графит	0,02	46,0	3870
Платинородий	1,21	0,160	1900

**Никель** – химически стойкий материал даже при высоких температурах, но имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее воспроизводимость. В интервале температур (-50...+ 180) °С температурная зависимость сопротивления такова:

$$R_m = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$$

где  $A = 0,00547$  1/К,  $B = 0,639 \times 10^{-5}$  1/К;  $C = 0,69 \times 10^{-8}$  1/К – постоянные коэффициенты.

Тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал и ниобий – имеют ограниченное применение. Влияние рекристаллизации и роста зерен в результате действия температуры делает чувствительный элемент из этих материалов хрупким и потому чувствительным к механическим вибрациям.

Наиболее распространенными являются терморезистивные преобразователи с платиновыми и медными чувствительными элементами. Первые предназначены для преобразования температуры в интервале от -260 до +1000 °С, вторые – от -200 до +200 °С.

Таблица 2

Основные характеристики терморезистивных преобразователей температуры

Тип преобразователя	Диапазон измеряемых температур, °С	Класс допуска	Границы допустимого отклонения НСХ, °С
Платиновый ТСП 1П ( $R_0 = 1$ Ом) 10П ( $R_0 = 10$ Ом) 50П ( $R_0 = 50$ Ом) 100П ( $R_0 = 100$ Ом) 500П ( $R_0 = 500$ Ом)	-260...+850 (-200...+ 1100)	А	$\pm(0,15 + 0,002  t )$ от -200 до 850
		В	$\pm(0,3 + 0,005  t )$ от -200 до 1100
		С	$\pm(0,6 + 0,008  t )$ от -100 до +300
Медный ТСМ 10М ( $R_0 = 10$ Ом) 50М ( $R_0 = 50$ Ом) 100М ( $R_0 = 100$ Ом)	-200...+200	А	$\pm(0,15 + 0,002  t )$ от -50 до +120
		В	$\pm(0,25 + 0,0035  t )$ от -200 до +200
		С	$\pm(0,5 + 0,0065  t )$ от -200 до +200
Никелевый ТСН 100Н ( $R_0 = 100$ Ом)	-60...+ 180	С	$\pm(0,3 + 0,0165  t )$ от -60 до 0 $\pm(0,3 + 0,008  t )$ от 0 до 180

Стандартами на терморезистивные преобразователи нормируются пределы допустимых отклонений номинальных статических характеристик (НСХ), допустимые отклонения сопротивления  $R_0$  при температуре 0 °С в

процентах от номинального значения, а также допустимые отклонения отношений сопротивления  $R_{100}$  при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  к сопротивлению  $R_0$  при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (данное отношение обозначается  $W_{100}$ ).

Основными источниками погрешностей терморезистивных преобразователей температуры является неточность подгонки  $R_0$  и отклонение  $R_{100}$  от номинального значения, а также нестабильность этих параметров во время эксплуатации, причем изменения значения  $R_0$  и  $W_{100}$  от длительности работы зависят также от измеряемой температуры.

Нестабильность терморезистивных преобразователей объясняется изменением значений  $R_0$  и  $W_{100}$  в результате загрязнения чувствительного элемента конструкционными материалами. Погрешности, которые возникают за счет изменения  $R_0$  и  $W_{100}$ , имеют разные знаки, поэтому происходит их частичная компенсация.

### **Конструкция чувствительных элементов терморезистивных преобразователей температуры на основе металлов**

Конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) терморезистивных преобразователей температуры в зависимости от пределов измеряемых температур, условий эксплуатации, и т.п., очень разнообразны.

На рис. 1, а показана конструкция платинового терморезистивного преобразователя температуры, которая не имеет специальной защитной арматуры. Чувствительный элемент 1 такого преобразователя выполнен из ленточной платины, навитой на трубчатый изоляционный каркас 2 из специального стекла. Для защиты от механических повреждений чувствительный элемент покрыт внешней изоляцией 3. Преобразователь предназначен для измерений относительно невысоких температур, поскольку при высоких температурах значительно ухудшаются изоляционные свойства стекла, а тепловое расширение стеклоизоляции при ее нагревании приводит к нежелательным механическим напряжениям.

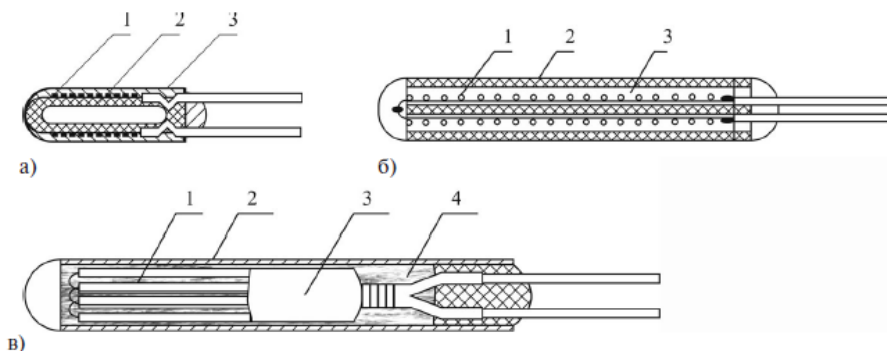


Рис. 1. Конструкции чувствительных элементов терморезистивных преобразователей

Чувствительный элемент платинового терморезистивного преобразователя температуры (рис. 1, б) имеет вид спирали 7, размещенной в канавках двух- или четырехканального керамического каркаса 2, уплотненной порошкообразным окислом алюминия 3. Окисел алюминия является хорошим электрическим изолятором, имеет большую теплостойкость и хорошую теплопроводность, а также ингибиторные свойства. Платиновая спираль к каркасу крепится с помощью глазури на основе окислов алюминия и кремния.

Чувствительный элемент медного термопреобразователя сопротивления – бескаркасная обмотка 7 из медного изолированного провода (рис. 1, в), сверху покрытая фторопластовой пленкой 3. Для обеспечения необходимой механической прочности обмотка помещается в тонкостенную металлическую гильзу 2, засыпается керамическим порошком 4 и герметизируется.

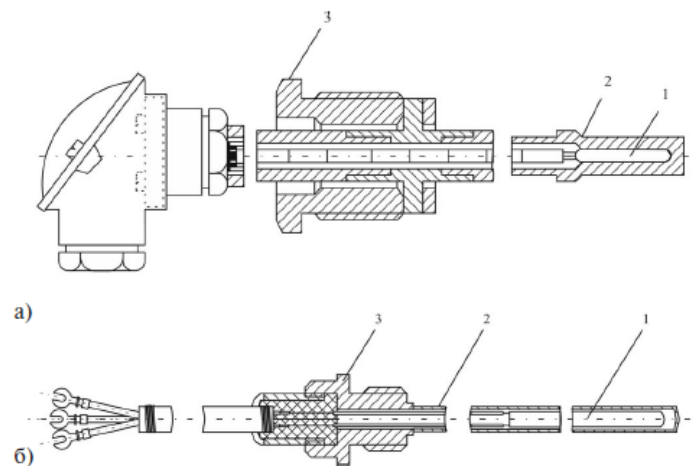


Рис. 2. Разновидности промышленных терморезистивных датчиков температуры

На рис. 2 показаны две конструктивные разновидности стержневого погружаемого терморезистивного преобразователя. Для защиты от влияния внешних механических факторов чувствительный элемент 7 помещают в защитную арматуру 2 (обычно из нержавеющей стали). Для крепления преобразователя на объекте измерения предусмотрен подвижный или неподвижный штуцер 3. Выводы чувствительного элемента выносят на клеммную колодку головки преобразователя (рис. 2, а), а в преобразователях без головки (рис. 2, б) они заканчиваются контактными наконечниками.

Кроме погружаемых выпускаются также терморезистивные преобразователи температуры специального назначения, например, для измерения температуры оборотных поверхностей и др.



### **Металлопленочные терморезисторы**

Использование тонкопленочной технологии в производстве терморезисторов открывает новые возможности, позволяет получить разные пленочные материалы с заданными свойствами, упрощает технологию изготовления термопреобразователей на их основе. Напыление в вакууме позволяет получить пленочные структуры металл–диэлектрик–металл непосредственно на измеряемой поверхности, которая уменьшает погрешность измерений из-за несовершенства теплового контакта чувствительного элемента с поверхностью, температуру которой измеряют.

ТКС и его стабильность в зависимости от длительности работы определяются преимущественно материалом терморезистора и условиями его осаждения. Для большинства чистых металлов ТКС лежит в пределах (3...7)  $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . На практике широко используют металлопленочные терморезисторы из платины, меди и никеля. Они имеют наилучшую стабильность, нечувствительны к давлению, влажности, магнитному полю.

Температурный коэффициент сопротивления тонкопленочных терморезисторов меньше, а температурный диапазон уже, чем в соответствующих проволочных. Причиной такого ограничения является разница в значениях температурного коэффициента линейного расширения основы и металлической пленки, которая вызывает пластическую деформацию пленки при достаточно стремительном повышении или снижении температуры.

Во избежание этого нежелательного явления используют многослойные структуры, которые содержат, кроме термочувствительного, еще и ряд промежуточных слоев, которые обеспечивают крепкий механический контакт. Для стабилизации электрофизических свойств пленочных терморезисторов осуществляют термическое старение в вакууме в условиях циклического изменения температуры.

Как материал пленочных терморезисторов часто применяют сплавы Ni-Fe и Ni-Co. Например, пермаллой (Ni 80% – Fe 20%) имеет температурный коэффициент сопротивления почти такой же, как у платины, его максимальное значение наблюдается при толщинах пленки от 80 до 160 нм, а у платины – при 350 нм. Соответственно, использование пермаллоя вместо платины дает возможность существенно уменьшить площадь терморезистора.

### **Подключение терморезисторов к измерительной схеме**

Обычно при измерении температуры с помощью терморезисторов на ЧЭ подают стабилизированный ток возбуждения  $I_v$ . В результате на датчике возникает разность потенциалов, пропорциональная сопротивлению

$U_t = I_B \cdot R_t$ , а значит, и измеряемой температуре. Таким образом, измерение температуры сводится к измерению напряжения  $U_{изм}$  на ЧЭ.

Поскольку ЧЭ имеют малое номинальное сопротивление, сравнимое с сопротивлением подводящих проводов, то должны быть приняты меры по устранению влияния сопротивления подводящих проводов на измерение температуры.

Эффективность мер определяется методом измерения и способом подключения ко вторичному прибору. Основных схем подключения три:

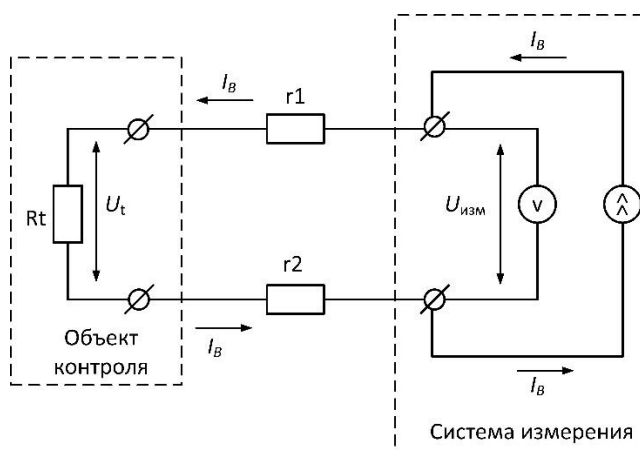
- двухпроводная;
- трехпроводная;
- четырехпроводная.

### **Двухпроводная схема подключения терморезисторов**

В простейшей двухпроводной схеме влияние сопротивления подводящих проводов не устраняется. Напряжение измеряется не только на ЧЭ, но и на соединительных проводах.

$$U_t = U_{изм} - U_{r1} - U_{r2}$$

При этом нужно иметь в виду, что сопротивление соединительных проводов проявляет себя двумя способами. Во-первых, изменяется эквивалентное сопротивление датчика, что приводит к смещению в измерении температуры. Во-вторых, сопротивление соединительных проводов само по себе зависит от температуры окружающей среды.



Иногда смещение температуры пытаются скорректировать во вторичном приборе, однако этот подход неэффективен, так как температура окружающей среды меняется.

Двухпроводная схема может быть использована в случае, если сопротивлением подводящих проводов ( $r1$ ,  $r2$ ) можно пренебречь по сравнению  $R_t$ .

### Трёхпроводная схема подключения терморезисторов

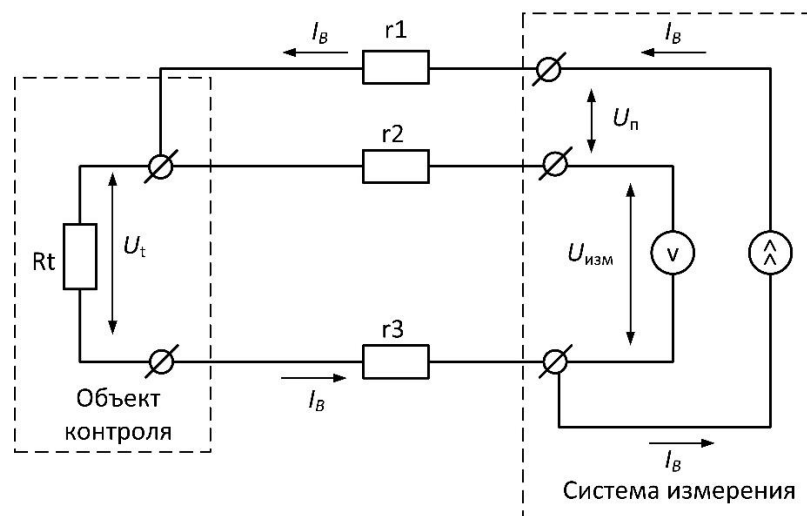
Влияние сопротивления соединительных проводов в трехпроводной схеме устраняется путем компенсации. Компенсация возможна, если соединительные провода одинаковы. В этом случае появляется возможность выделить отдельно напряжение на соединительных проводах и скомпенсировать его. Эта возможность появляется по следующим причинам:

1) Длина подводящих проводов примерно одинакова, тип провода (его сечение и материал) обычно также одинакова. Поэтому сопротивления первого  $r_1$  и третьего  $r_3$  проводов практически одинаковы. Следовательно,  $U_{r1} \approx U_{r3}$ .

2) Из-за того, что входное сопротивление вольтметра очень велико, то ток через сопротивление  $r_2$  небольшой. Поэтому падением напряжения на этом сопротивлении можно пренебречь.

Тогда падение напряжения на терморезисторе  $U_t$  и напряжение  $U_{изм}$ , измеренное вольтметром, оказываются связаны следующим соотношением, в котором  $U_n$  – дополнительно измеряемое напряжение, используемое для компенсации падения напряжения на сопротивлении  $r_3$ :

$$U_t = U_{изм} - (U_{r2} + U_{r3}) \approx U_{изм} - (U_{r2} + U_{r1}) = U_{изм} - U_n$$



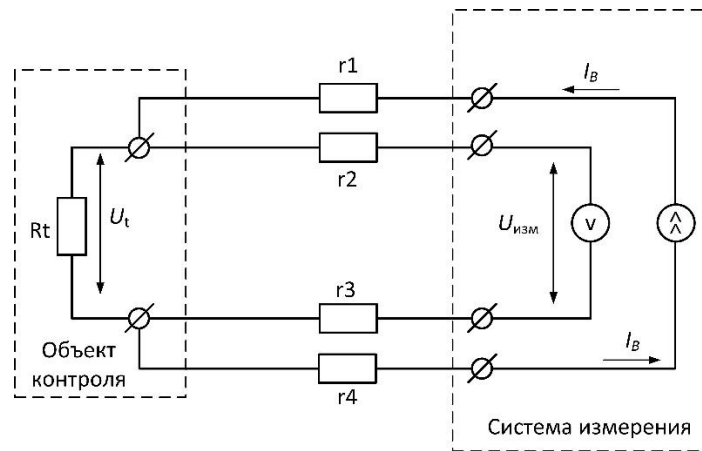
Равенство сопротивлений соединительных проводов и их температурных зависимостей является основным условием применимости трехпроводной схемы.

### Четырёхпроводная схема подключения терморезисторов

В четырехпроводной схеме питание ЧЭ током возбуждения  $I_B$  производится с помощью одних проводов, а измерение разности потенциалов  $U_{изм}$  на ЧЭ – с помощью других. Если измерение напряжения производится высокоомным вольтметром (ток через  $r_2$  и  $r_3$  практически не течет), то влияние сопротивления всех проводов полностью исключается.

В этом случае:

$$U_t \approx U_{изм}$$



Следует учесть, что если измерительный прибор рассчитан на четырехпроводную схему, то датчик к нему можно подключить и по двухпроводной схеме. При этом дополнительная погрешность измерения, вызванная влиянием соединительных проводов, будет иметь величину порядка  $(r_2 + r_3) / R_t$ .

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Температура как физическая величина.
2. Неэлектрические методы измерения температуры.
3. Терморезистивные преобразователи температуры на основе металлов.
4. Конструкция чувствительных элементов терморезистивных преобразователей температуры на основе металлов.
5. Металлопленочные терморезисторы.
6. Подключение терморезисторов к измерительной схеме.

## Лекція № 4

**Тема:** Физические основы действия полупроводниковых терморезистивных преобразователей. Пьезоэлектрический эффект. Принцип действия кварцевых термодатчиков.

**Оглавление**

Полупроводниковые терморезистивные преобразователи .....	2
Термисторы.....	2
Полупроводниковые терморезисторы на основе нитевидных кристаллов.....	3
Позисторы .....	3
Биметаллический датчик температуры .....	4
Волоконно-оптические термометры.....	4
Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.....	4
Кварцевый резонатор.....	5
Кварцевые термодатчики .....	6
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	9

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## Полупроводниковые терморезистивные преобразователи

В настоящее время широко используются полупроводниковые терморезистивные преобразователи температуры. Преимуществами полупроводниковых термопреобразователей являются их малые габариты, незначительная инерционность. Однако они уступают проводниковым в точности. Существуют две группы полупроводниковых терморезисторов: с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (термисторы *NTC*) и с положительным ТКС (позисторы *PTC*). В основном используются терморезисторы с отрицательным ТКС, значение которого может равняться (2...6) % 1/К.

### Термисторы

Термисторы изготавливаются из порошков окислов Mn, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn, Co. После тепловой обработки и старения термисторы металлизуются на поверхности, создаются сопротивления, напаиваются металлические выводы, и вся конструкция фиксируется пластмассой или стеклом. При температуре 20°C сопротивление термисторов составляет от нескольких кОм до приблизительно 40 МОм.

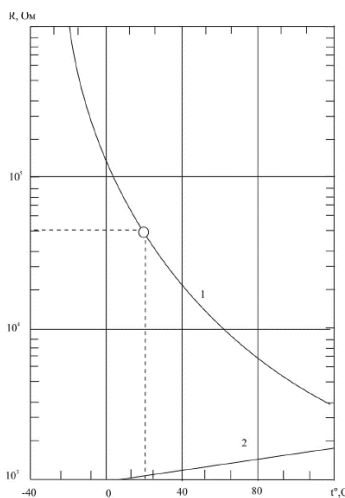


Рис. 1. – Температурная зависимость сопротивления термистора 1 и платинового терморезистора 2

Возможность создания терморезисторов очень малых размеров позволяет уменьшить влияние термопреобразователя на температурное поле исследуемого объекта, улучшить динамические характеристики процесса измерения. Границы стабильной работы полупроводниковых термисторов находятся в диапазоне (-100 ... +400) °С, относительная погрешность составляет (0,2 ... 1,0) % от диапазона преобразований.

Кроме малых габаритов полупроводниковые термисторы отличаются от металлических термопреобразователей высокой чувствительностью (высоким

ТКС). Однако, температурный коэффициент сопротивления термистора не является постоянной величиной, он уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры.

Для сравнения на рис. 1 приведены температурные зависимости сопротивления термистора с  $R_0 = 50$  кОм (кривая 1) и платинового терморезистора, номинальное сопротивление которого  $R_0 = 1000$  Ом (кривая 2).

Конструктивно терморезистивные преобразователи температуры с чувствительными элементами из термисторов могут изготавливаться самой разнообразной формы в зависимости от назначения, места его установки на исследуемом объекте.

### ***Полупроводниковые терморезисторы на основе нитевидных кристаллов***

На современном этапе широкое использование получили полупроводниковые терморезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) таких популярных полупроводников, как кремний и германий и их соединений. Они характеризуются температурной чувствительностью, которая не хуже, чем у термисторов, а их положительный ТКС находится в границах  $(2...5) \% / K$ . Вследствие миниатюрных размеров (нитевидные монокристаллические элементы могут изготавливаться диаметром в несколько микрон и даже долей микрона) они практически безынерционны.

Такие миниатюрные преобразователи температуры (массой  $\approx 0,5$  г) характеризуются диапазоном измеряемых температур  $(20... 120) ^\circ C$ , или  $(-50... + 50) ^\circ C$ , сопротивление при  $20 ^\circ C$  от  $0,5$  кОм до  $1,0$  кОм, погрешность преобразования  $0,5\%$ , тепловая инерционность  $(0,1...0,3)$  с.

Кремниевые датчики температуры применяются в основном для измерения температуры внутри электронных приборов.

### ***Позисторы***

Позисторы – это терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Обычно позисторы изготавливают на основе керамики из титаната бария. Титанат бария  $BaTiO_3$  – материал с удельным сопротивлением при комнатной температуре  $(10^{10}... 10^{12})$  Ом · см, что значительно превышает удельное сопротивление полупроводников. Прибавка к составу керамики из титаната бария добавок редкоземельных материалов (лантана, церия и др.) или других элементов (ниобия, тантала, сурьмы, висмута) позволяет уменьшить удельное сопротивление до  $(10... 100)$  Ом · см, что соответствует удельному сопротивлению полупроводниковых материалов.



## **Биметаллический датчик температуры**

---

Биметаллический датчик сделан из двух разнородных металлических пластин, скрепленных между собой. Разные металлы имеют различный температурный коэффициент расширения. Если соединенные в пластину металлы нагреть или охладить, то она изогнется, при этом замкнет (разомкнет) электрические контакты или переведет стрелку индикатора. Диапазон работы биметаллических датчиков  $-40...+550$  °С. Используются для измерения поверхности твердых тел и температуры жидкостей. Основные области применения – автомобильная промышленность, системы отопления и нагрева воды.

## **Волоконно-оптические термометры**

---

Волоконно-оптические термометры (ВОТ) выполняются из кварцевого моноволокна диаметром 0,2 ... 1 мм, длиной до 100 м, на торце которого, вводимого в контролируемый объем, располагается микрокапсула с веществом, изменяющим свои оптические свойства при нагреве (люминофор, жидкий кристалл, двупреломляющийся кристалл и т.д.). На другом конце располагаются источник света (обычно светодиод) и фотодиод для регистрации излучения, огражденного от капсулы термодатчика. Достоинство ВОТ – отсутствие гальванической связи с объектом, нечувствительность к электромагнитным помехам, нетоксичность, малые габариты, высокое быстродействие.

## **Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект**

---

Некоторые кристаллы, не имеющие центра симметрии (в том числе все сегнетоэлектрики), при деформации поляризуются. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом или просто пьезоэлектрическим эффектом. Величина поляризации пропорциональна деформации, а, следовательно, в пределах упругости и механическому напряжению. При изменении знака деформации знак поляризации меняется также на обратный.

Важнейшими пьезоэлектриками (т. е. пьезоэлектрическими кристаллами) являются кварц, сегнетова соль, метатитанат бария и др.

Кристаллы кварца принадлежат к гексагональной системе. Если вырезать из кристалла кварца пластинку, перпендикулярную к кристаллографической оси  $a$ , и подвергнуть ее сжатию вдоль этой оси, то на гранях пластинки появляются связанные заряды (на рис. 2 пластинка расположена так, что кристаллографическая ось  $c$  направлена на нас). То же самое происходит, если пластинку подвергнуть растяжению вдоль оси  $OO$ , перпендикулярной к кристаллографическим направлениям  $a$  и  $c$ . В последнем случае эффект называют поперечным, в первом случае — продольным. При

изменении знака деформации (т.е. при растяжении вдоль  $a$  или сжатии вдоль  $OO$ ) на гранях пластинки появляются связанные заряды другого знака. Для практического использования пьезоэлектрического эффекта на грани пластинки накладываются металлические обкладки. Если эти обкладки включить в замкнутую цепь, то при изменениях деформации кристалла в цепи будут возникать импульсы тока. Такие процессы протекают, например, в пьезоэлектрическом микрофоне – знакопеременная деформация пластинки под действием звуковой волны преобразуется в переменный ток той же частоты.

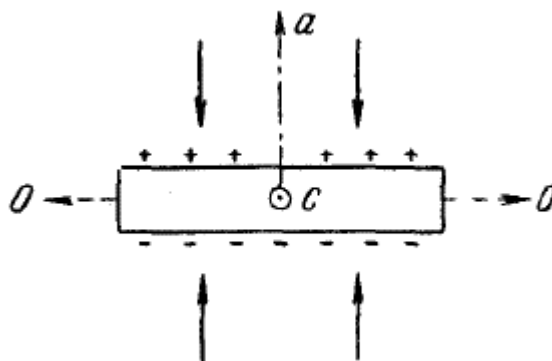


Рис. 2 – Пьезоэлектрический эффект на пластинке кварца

Наряду с описанным выше прямым эффектом, у пьезоэлектрических кристаллов наблюдается обратный эффект, заключающийся в том, что поляризация под действием электрического поля сопровождается механическими деформациями кристалла. Таким образом, если на металлические обкладки изображенной на рис. 2 пластинки подать переменное электрическое напряжение, то пластинка будет попеременно, растягиваться и сжиматься вдоль оси  $a$  (одновременно происходят сжатие и растяжение вдоль оси  $OO$ ), т. е. в ней возбуждятся механические колебания. Эти колебания станут особенно интенсивными, если частота переменного напряжения совпадает с собственной (резонансной) частотой пластинки.

### Кварцевый резонатор

Если изменять частоту прикладываемого к кристаллу кварца переменного электрического напряжения, то на определенной частоте наступит резонанс: механические деформации кристалла резко возрастут, а его электрическое сопротивление резко уменьшится. Данная частота называется резонансной. Явление резонанса используется для построения кварцевых резонаторов.

Кварцевый резонатор – это прибор, в котором пьезоэлектрический эффект и явление механического резонанса используются для построения

высокодобротного резонансного элемента электронной схемы. Кварцевый резонатор является электромеханической колебательной системой. Если приложить к кварцевой пластине переменное напряжение, которое совпадает с резонансной частотой самой кварцевой пластины, то происходит резонанс частот и амплитуда колебаний резко возрастает.

При резонансе электрическое сопротивление резонатора уменьшается. В результате получается эквивалент последовательной колебательной системы. Поскольку потери энергии в кварцевом резонаторе очень малы, то он фактически представляет собой электрический колебательный контур (рис. 3) с очень большой добротностью. Кварцевый резонатор является аналогом колебательного контура на основе ёмкости и индуктивности. При этом кварцевый резонатор существенно превосходит  $LC$ -контур по величине добротности  $Q$ .

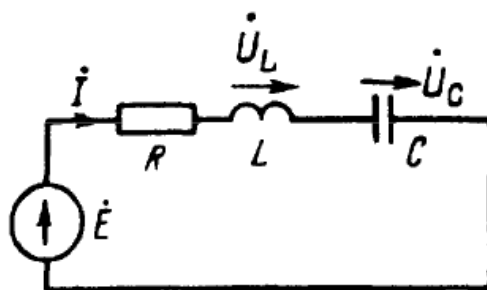


Рис. 3 – Схема последовательного колебательного контура, эквивалентного кварцевому резонатору

Резонаторы на основе кварца обладают очень высокой добротностью, которая недостижима при использовании обычного колебательного  $LC$ -контура. Если добротность  $Q$  обычных контуров лежит в пределах 100 – 300, то для кварцевых резонаторов величина добротности  $Q$  достигает  $10^5$  –  $10^7$ .

Такие настроенные в резонанс пьезоэлектрические пластинки используются для возбуждения ультразвуковых волн, для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний в радиотехнике и т. п., а также для построения кварцевых термодатчиков.

### Кварцевые термодатчики

Давно известно, что резонансная частота кристалла кварца в большей или меньшей степени (в зависимости от способа его изготовления) зависит от температуры окружающей среды. С недавнего времени благодаря созданию высокоточных электронных счетчиков удалось использовать этот эффект для измерения температуры.

В головке датчика температуры расположен кварцевый резонатор, который при  $0^\circ\text{C}$  колеблется с частотой  $f_0 \approx 28,2$  МГц. Зависимость этой

частоты от температуры датчика характеризуется коэффициентом  $k = 1$  кГц/К, который в основном постоянен. Для абсолютного измерения температуры частота кристалла датчика сравнивается с частотой контрольного (сравнительного) кристалла, который изготовлен по другой технологии, вследствие чего его частота почти не зависит от температуры; к тому же он работает в термостате с постоянной температурой. Частота биения (разность частот) измеряется электронным счетчиком. Если требуется определять разность температур, то сопоставляют частоты двух чувствительных элементов (кристаллов кварца).

Другим способом измерения собственной частоты кварцевого термодатчика является включение резонатора в схему автогенератора.

Пьезорезонансные кварцевые термопреобразователи (рис. 4) выполняются в виде линзового кварцевого резонатора 1, закрепленного на упругих ножках 2 и 3, которые одновременно исполняют роль токоподводов.

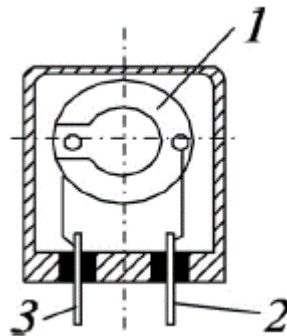


Рис. 4. – Строение кварцевого термочувствительного резонатора

Резонатор размещен в металлическом герметическом баллоне диаметром 6...8 мм, заполненном для уменьшения тепловой инерционности гелием, который характеризуется хорошей теплопроводностью. Производятся также пьезорезонансные термопреобразователи в стеклянных вакуумных баллонах. Последние обладают большой инерционностью, но более высокой временной стабильностью и разделительной способностью.

Кварцевые термометры отличаются исключительно высокой точностью. Такая измерительная система особенно нужна для научных измерений в физике, химии и технике и в первую очередь для всех калориметрических исследований. Диапазон измерений соответствует температурам от  $-80$  до  $250$  °С. Нелинейность в этом диапазоне не превышает  $\pm 0,05$  %, а абсолютная погрешность составляет  $0,02$  К. Разрешающая способность зависит от принятого времени счета (то есть интервала времени, в течение которого выполняется измерение частоты путем подсчета количества положительных импульсов, приходящих за это время):

Время счета, с	0,1	1,0	10,0	100,0
Разрешающая способность, К	0,01	0,001	0,0001	0,00001

Динамика измерительной системы определяется размерами чувствительного элемента.

Кварцевый термометр, несмотря на его высокую точность, чрезвычайно прост по конструкции и имеет универсальную применимость. Так как измеряются частоты, то длина проводников и наложенные пульсирующие рассеянные напряжения помех («гудение») не создают никаких проблем. Непосредственное цифровое показание быстро выдает результаты. В аналоговых приборах такого же класса точности потребовалось бы гораздо больше затрат на компенсацию и расшифровку до получения результата измерений. К тому же прибор выдает сигналы, удобные для регистрирующих устройств или последующей цифровой обработки.

Необходимо, однако, отметить, что, как и собственная частота резонанса, так и термочувствительность характеризуются значительными технологическими разбросами, что усложняет аппаратную реализацию устройств с термочувствительными пьезорезонаторами.

## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Термисторы.
2. Полупроводниковые терморезистивные преобразователи на основе нитевидных кристаллов. Позисторы.
3. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.
4. Кварцевый резонатор.
5. Кварцевые термодатчики.

## Лекція № 5

**Тема:** Термоэлектрические явления. Принцип действия термоэлектрических преобразователей.

**Оглавление**

Принцип действия термоэлектрических преобразователей.....	2
Материалы термоэлектродов.....	4
Термопары из благородных металлов .....	5
Термопары из неблагородных металлов .....	5
Устройство термоэлектрических термометров (конструктивные формы).....	6
Удлинительные термоэлектроды .....	7
Схемы подключения термоэлектрических термометров.....	8
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля.....	11
Уровень курса.....	11

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## Принцип действия термоэлектрических преобразователей

Явление термоэлектричества было открыто в 1823 г. Зеебеком и заключается в следующем. Зеебек установил, что если электрическая цепь состоит из двух различных металлов или сплавов и точки их соединения (спаи) находятся при различных температурах, то в цепи должен протекать ток (рис. 1). При размыкании цепи на ее концах можно измерить разность потенциалов – так называемую термоэлектродвижущую силу (термо-э.д.с.).

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или иначе термопарой; проводники, составляющие термопару, – термоэлектродами, а места их соединения – спаями.

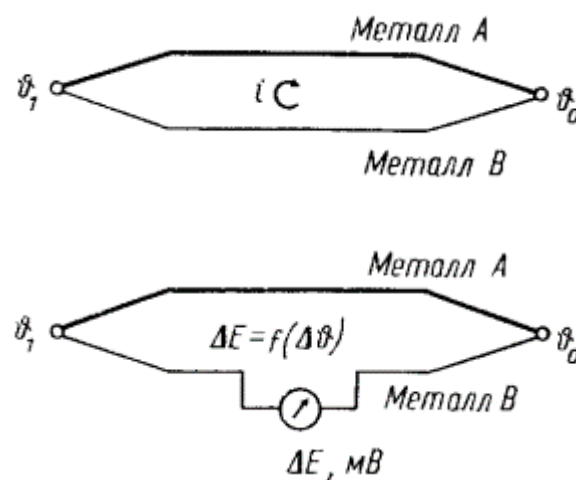


Рис.1 – Проявление термоэлектрического эффекта

Если же через такую цепь пропускать ток, то в зависимости от направления этого тока в одной точке соединения проводников будет выделяться, а в другой – поглощаться тепло (эффект Пельтье). Если температура одной точки соединения (спая)  $\Theta_0$  известна, то получаемая термо-э.д.с. будет мерой разности между измеряемой температурой  $\Theta_1$  и контрольной температурой  $\Theta_0$  (холодного спаи). Оба места соединения называют также рабочим («горячим») и свободным («холодным») спаем.

$$E_{AB}(\Theta_1, \Theta_0) = f(\Theta_1) - f(\Theta_0)$$

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников, подчиняющихся закону Ома, величина термо-э.д.с. зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температур между спаями. Зависимость между термо-э.д.с. и разностью температур в общем случае нелинейна и может быть выражена уравнением третьей степени. Однако в области температур, обычных при промышленных измерениях, обычно вполне достаточно принять квадратичную зависимость:

$$\Delta E = a + b\Delta\Theta + c\Delta\Theta^2$$



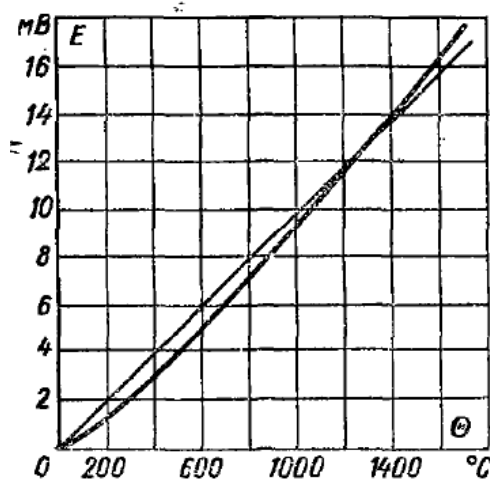


Рис. 2 – Зависимость величины термо-э.д.с. от разности температур

Постоянные  $a$ ,  $b$  и  $c$  зависят в первую очередь от природы обоих металлов или сплавов. Их можно определить путем градуировки в реперных точках. При малых изменениях температур характеристики многих термопар могут быть линеаризованы без большого ущерба для точности:

$$\Delta E = k \Delta \theta \text{ [мВ]},$$

где  $k$  – коэффициент термо-э.д.с., зависящий также и от уровня температуры, мВ/К.

Используя уравнение для термо-э.д.с., можно для каждой комбинации материалов термопары построить график зависимости термо-э.д.с. термопары от измеряемой температуры (температуры рабочего спая), полагая, что температура ее свободного спая  $\theta_0$  равна  $0^\circ\text{C}$  (рис. 2а). Если контрольная температура не равна  $0^\circ\text{C}$ , а поддерживается постоянной, как это часто бывает, равной 20, 50 или  $60^\circ\text{C}$  или даже вообще непостоянна (как при измерении разности температур), то в измеренное значение термо-э.д.с.  $\Delta E_m$  нужно внести поправку  $\Delta E_k$ , которая соответствует отклонению контрольной температуры  $\theta_0$  от  $0^\circ\text{C}$ :

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta E_k$$

Значения термо-э.д.с. в зависимости от измеряемой температуры, а также допустимые отклонения при поставке регламентируются для основных комбинаций материалов фирмами-изготовителями и национальными управлениями по стандартизации и указываются в специальных таблицах (при  $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Эти допуски считаются гарантированными при поставках, но к погрешностям при последующих измерениях они не относятся.

Полярность термо-э.д.с. считается положительной, если температура в месте измерения выше контрольной. При обозначении материалов термоэлектрических элементов на первом месте перед тире ставят условный

символ положительного термоэлектрода, а на втором месте после тире – символ отрицательного термоэлектрода (потенциала).

Как уже было указано ранее, явление термоэлектричества принадлежит к числу обратимых явлений, обратный эффект был открыт в 1834 г. Жаном Пельтье и назван его именем. Если через цепь, состоящую из двух различных проводников или полупроводников, пропустить электрический ток, то тепло выделяется в одном спае и поглощается в другом. Теплота Пельтье связана с силой тока линейной зависимостью в отличие от теплоты Джоуля, и в зависимости от направления тока происходит нагревание или охлаждение спая.

Поглощаемая или выделяемая тепловая мощность пропорциональна силе тока, зависит от природы материалов, образующих спай, характеризуется коэффициентом Пельтье  $\pi_{AB}$  и равна  $q_{AB} = \pi_{AB}I$ .

К.п.д. термоэлектрического генератора зависит от разности температур и свойств материалов и для существующих материалов очень мал (при  $\Delta\theta = 300^\circ$  не превышает  $\eta = 13\%$ , а при  $\Delta\theta = 100^\circ$  значение  $\eta = 5\%$ ), поэтому термоэлектрические генераторы используются как генераторы энергии лишь в специальных условиях.

К. п. д. термоэлектрического подогревателя и холодильника также очень малы, и для охлаждения к. п. д. при температурном перепаде  $5^\circ$  составляет  $9\%$ , а при перепаде  $40^\circ$  – только  $0,6\%$ ; однако, несмотря на столь низкие к. п. д., термоэлементы используются в холодильных устройствах. В измерительной технике термопары получили широкое распространение для измерения температур; кроме того, полупроводниковые термоэлементы используются как обратные тепловые преобразователи, преобразующие электрический ток в тепловой поток и температуру.

### **Материалы термоэлектродов**

Выбирать подходящую термопару для измерения определенной температуры следует с учетом различных требований, причем в отношении некоторых требований приходится принимать компромиссные решения. Однако к термоэлектродам наряду с приемлемой ценой и надежностью предъявляют следующие требования: высокая чувствительность к изменениям температуры (высокий коэффициент термо-э.д.с.), линейность характеристики термо-э.д.с., благоприятные динамические свойства (малая инерционность), достаточная механическая прочность при высоких и низких температурах, стойкость против коррозии, стабильность термоэлектрических свойств во времени.

С течением времени из большого числа возможных комбинаций материалов термоэлектродов получили применение на практике лишь

некоторые, причем каждая пара, как правило, имеет свою специфическую область применения. Все материалы для термопар делят на две группы: пары благородных металлов и пары неблагородных металлов.

### ***Термопары из благородных металлов***

Термопары из благородных металлов, преимущественно из платины и ее сплава с родием (Pt10Rh – Pt и Pt13Rh – Pt6Rh), обладают высокой точностью и отличаются воспроизводимостью термоэлектрической характеристики. Поэтому платинородий-платиновая термопара Pt10Rh – Pt используется для воспроизведения Международной практической температурной шкалы (МПТШ) в интервале температур от 630,7 до 1064,4 °С. Эти термопары более устойчивы к коррозии и окислению, чем термопары из неблагородных металлов, и поэтому могут быть использованы при более высоких температурах. Так, термопары Pt10Rh – Pt используют для измерения температур от 0 до 1600 °С а термопары Pt13Rh – Pt6Rh – от 0 до 1700 °С. Термопары из благородных металлов имеют, как правило, низкую чувствительность к изменениям температуры; к тому же они довольно дороги.

### ***Термопары из неблагородных металлов***

Термопары из неблагородных металлов применяют преимущественно для измерения более низких температур. Они дешевле термопар из благородных металлов, и на их долю приходится абсолютное большинство всех применяемых термопар; во многих странах они отчасти стандартизированы. К таким стандартизированным термопарам относятся медь–константан, железо–константан и нихром–никель (хромель–алюмель).

Термопары *медь – константан* (Cu–Konst, константан – сплав меди, никеля и марганца) особенно пригодны для измерения низких температур от –250 до 400 °С. При более высоких температурах медь не обладает достаточной стойкостью к кислороду воздуха. Эти термопары наряду с железо-константановыми имеют наиболее крутую температурную характеристику, но их характеристика недостаточно линейна.

*Железо-константановые* термопары (Fe–Konst) допускают более широкий диапазон измерения от –250 до 700 °С, если коррозионно-активная среда не препятствует их применению (при некоторых условиях железо сильно ржавеет и покрывается окалиной). Постоянство термоэлектрических свойств во времени тоже надежно не обеспечивается.

Термопары *нихром–никель* (почти то же, что хромель–алюмель) имеют среди термопар из неблагородных металлов самый высокий температурный диапазон измерения: от –200 до 1300 °С. Эти термопары отличаются точностью и устойчивостью, однако их температурный коэффициент термо-э.д.с. меньше, чем термопар медь–константан и железо–константан.

Характеристика их в достаточной степени линейна. Окалинообразование вследствие окисления становится заметным при температурах выше  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что ограничивает время использования термопар в верхней области их температурного диапазона.

### Устройство термоэлектрических термометров (конструктивные формы)

Надежность измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров зависит от их конструкции и расположения и от возможности их контакта с измеряемой средой. Если физические и химические условия допускают это, то термопара может быть введена в измеряемую среду без защитной оболочки (чехла). В этом случае она имеет преимущество перед другими контактными термопарами, поскольку ее можно разместить в самых труднодоступных местах, а ее размеры могут быть приняты практически сколь угодно малыми, чем обеспечивается благоприятное динамическое поведение (малая инерционность). При высоких температурах или агрессивных средах термопара должна быть помещена в защитную арматуру (чехол).

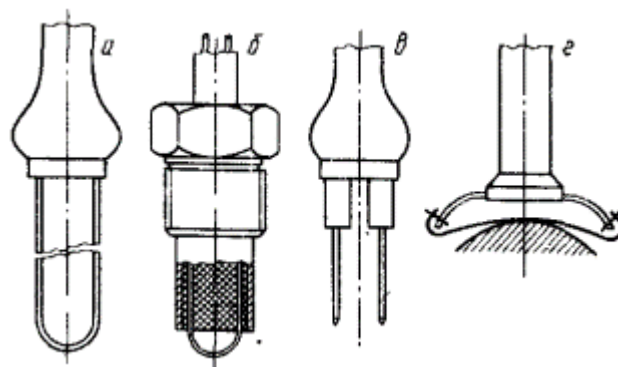


Рис. 3 – Примеры открытых, незащищенных термопар

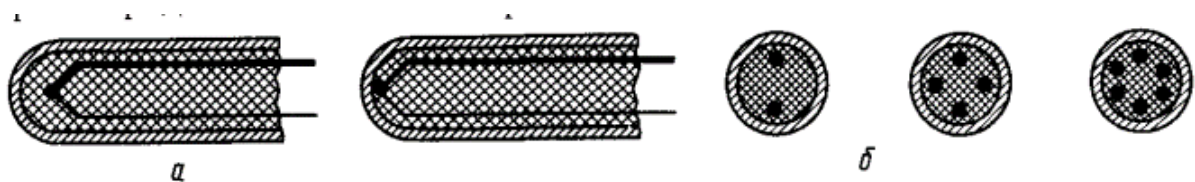


Рис. 4 – Конструктивные исполнения термопар с защитной оболочкой

Материалы термоэлектродов, выполненные в виде фольги, располагаются между двумя поддерживающими пластинами из пластмассы или алюминия. Эти элементы можно наклеивать как тензометрические датчики. Они очень легко принимают форму неровных поверхностей, толщина их может составлять примерно  $0,05\text{--}1\text{ мм}$  (рис. 5).

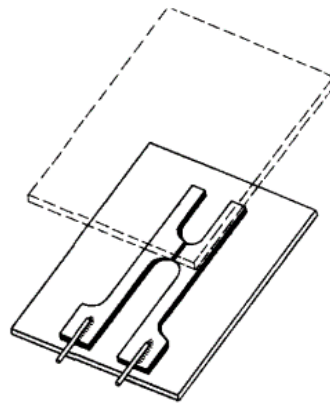


Рис. 5 – Термопара из фольги

### Удлинительные термоэлектроды

Удлинительные термоэлектроды. Свободные концы термопары должны находиться при постоянной температуре, лучше всего при  $0^{\circ}\text{C}$  (рис. 6). Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды термопары настолько длинными и гибкими, чтобы свободные концы ее можно было разместить в достаточном удалении от рабочего спая (рис. 6). Кроме того, при использовании благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно, поэтому приходится использовать провода из другого материала. Соединительные провода  $A_1$  и  $B_1$  (рис. 6), идущие от зажимов в головке термопары до места нахождения нерабочих спаев и выполняемые из дешевых материалов, называют *удлинительными термоэлектродами, компенсационным* или *термоэлектродным проводом*. Чтобы при включении удлинительных термоэлектродов из материалов, отличных от материалов основных термоэлектродов, не изменилась термо-э.д.с. термопары, необходимо выполнить два условия. Первое – удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны с основной термопарой, т. е. иметь ту же термо-э.д.с. в диапазоне возможных температур места соединения термоэлектродов в головке термопары (примерно в диапазоне от  $0$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ). И второе – места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным термоэлектродам в головке термопары должны иметь одинаковую температуру.

Для термопары платинородий – платина применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную термопаре платинородий – платина в пределах до  $150^{\circ}\text{C}$ . Такие же удлинительные термоэлектроды с измененными знаками полярности применяют для термопары вольфрам – молибден. Для термопары хромель – алюмель удлинительные термоэлектроды изготавливаются из меди и константана. Для термопары хромель – конпель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводов.

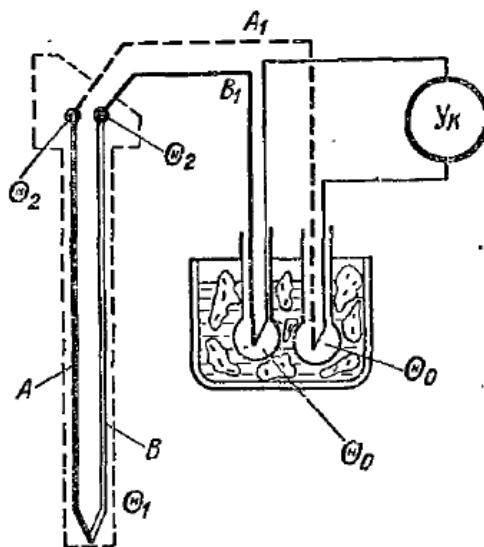


Рис. 6 – Применение удлинительных термоэлектродов

### Схемы подключения термоэлектрических термометров

Длину термопар ввиду их высокого сопротивления, а также с учетом их стоимости следует принимать возможно меньшей. Поэтому место подключения так называемого компенсационного или термоэлектродного провода (кабеля) предусматривают в непосредственной близости от места измерения – обычно в подсоединительной головке защитной трубы. К компенсационным проводам предъявляют меньшие требования, поскольку они не подвергаются воздействию тяжелых условий окружающей среды. По термоэлектрическим свойствам они идентичны термоэлектродам, так что в местах соединения не может возникнуть разность напряжений.

Наиболее простая схема подключения термопар получается при непосредственном подсоединении термоэлектродных проводов к показывающему прибору (рис. 7а). При этом место сравнительного измерения («холодный спай») переносится к клеммам измерительного прибора, температура которых неизвестна, а обычно также и непостоянна. Вследствие этого такой метод неточен и ненадежен; его следует применять только для ориентировочных измерений.

В правильной схеме (рис. 7б) должно быть предусмотрено отдельное место для свободных концов термопары («холодный спай»), температура которого (сравнительная температура) поддерживается термостатом постоянной, обычно равной 50°C.

В том же корпусе обычно подключают к прибору провода, которые могут быть медными, если все клеммы имеют одинаковую температуру  $\Theta$ .

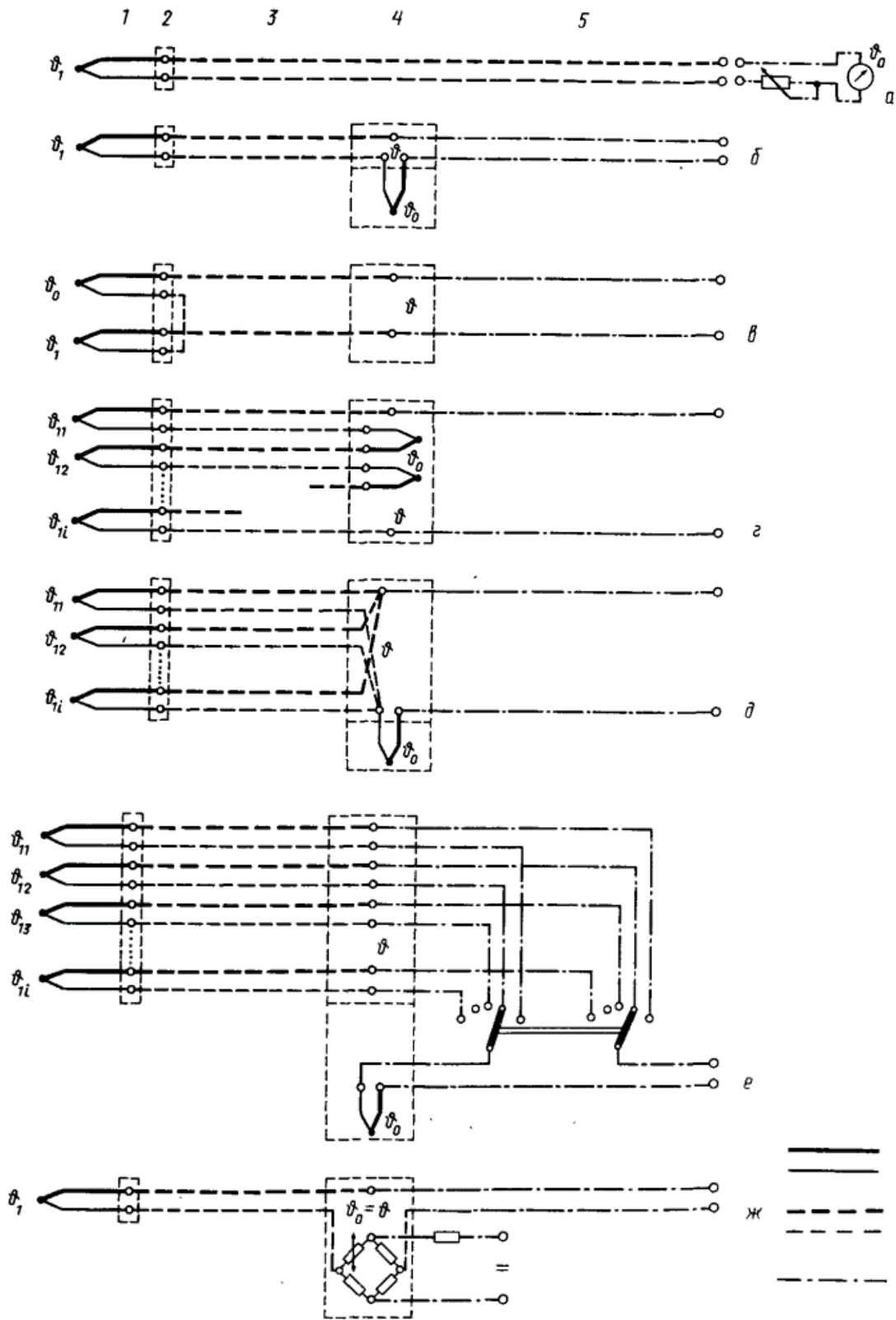


Рис. 7 – Схема подключения термоэлектрических термометров (термопар); а – схема, требующая минимальных затрат; б – обычное подключение; в – подключение для измерения разности температур; г – последовательное включение нескольких термопар (термобатарея); д – параллельное подключение; е – схема с переключением точек измерения (логометром); ж – автоматическая компенсация температуры свободных концов термопары; 1 – собственно термопара; 2 – место подключения термоэлектродов к термоэлектродным проводам; 3 – термоэлектродные провода; 4 – место свободных концов термопары (холодный спай; все клеммы должны находиться при одной и той же температуре); 5 – медные провода

На рис. 7в–е приведены схемы измерения разности температур (встречное включение термопар), увеличения измеряемой термо-э.д.с. (последовательным включением нескольких термопар в виде «термостолбика»), формирования среднего значения (при параллельном включении термопар и контроля нескольких температур одним из показывающих устройств (переключатель точек измерения, логометр, сканирующий мультиплексор).

При лабораторных измерениях температуру свободного конца термометра (холодного спая  $\theta_0$ ) лучше всего поддерживать постоянной, равной  $0^\circ\text{C}$ , используя сосуд Дьюара (термос), заполненный тающим льдом. Поскольку термостатирование с охлаждением на основе принципа Пельтье потребовало бы слишком больших затрат на аппаратуру, температуру свободных концов  $\theta_0$  принимают немного выше комнатной, обеспечивая электрический подогрев термостата до  $50 \pm 0,1^\circ\text{C}$ . В таком случае полученный результат нужно скорректировать уже упоминавшимся способом. Другая возможность учесть повышенную температуру свободного конца заключается в том, что холодный спай не термостатируют, но измеряют его температуру  $\theta_0$  термометром сопротивления и добавляют падение напряжения, зависящее от температуры, к измеренной термо-э.д.с. Корректирующая схема (рис. 7ж) состоит из дополнительного моста сопротивления, в одно из плеч которого включено сопротивление, зависящее от температуры  $\theta_0$ . Мост питается высокостабилизированным источником напряжения постоянного тока. Он сбалансирован так, что при  $\theta = 0^\circ\text{C}$  напряжение на его диагонали точно равно нулю.

Электронная промышленность предоставляет интегральные схемы (модули) и измерительные преобразователи, которые линеаризируют нелинейные характеристики термопар, регистрируют непостоянную сравнительную температуру свободного конца (холодного спая) и компенсируют ее, а также усиливают термо-э.д.с. до уровня стандартного сигнала. Линеаризация также выполняется алгоритмически при помощи ЭВМ, когда компьютер используется для обработки сигнала.



## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Принцип действия термоэлектрических преобразователей.
2. Материалы термоэлектродов термоэлектрических преобразователей.
3. Удлинительные термоэлектроды термоэлектрических преобразователей.
4. Схемы подключения термоэлектрических термометров.

## Лекція № 6

**Тема:** Физические основы функционирования индуктивных и индукционных датчиков.

**Оглавление**

Магнитное поле .....	3
Взаимодействие токов .....	3
Магнитная индукция .....	3
Магнитный поток .....	4
Напряженность магнитного поля и закон полного тока .....	5
Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля .....	6
Магнитная цепь .....	7
Магнитный поток через поперечное сечение магнитопровода .....	8
Магнитодвижущая (намагничивающая) сила .....	8
Падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи .....	9
Магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи. ....	10
Законы Кирхгофа для магнитных цепей .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля .....	12
Уровень курса .....	12

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.

4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## Магнитное поле

### Взаимодействие токов

Электрические токи взаимодействуют между собой. Например, два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи (мы будем называть их прямыми токами), притягивают друг друга, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкивают друг друга, если их направления противоположны.

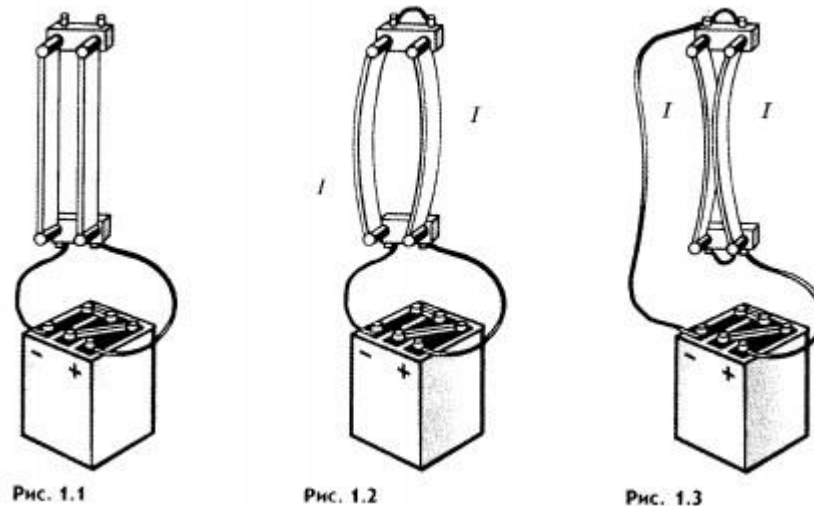


Рис. 6.1 – Взаимодействие токов через магнитное поле

Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называется магнитным. Это название происходит от того, что, как обнаружил Эрстед, поле, создаваемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку.

Итак, движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства — создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы.

### Магнитная индукция

**Силовой характеристикой** магнитного поля является *магнитная индукция*, которую обычно обозначают латинской буквой  $B$  или  $\vec{B}$  — когда необходимо указать ее векторную природу. Магнитная индукция  $\vec{B}$  — это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток. Одним из основных проявлений магнитного поля является его силовое воздействие на проводник с током, помещенный в это поле. Опыт показывает, что сила  $\vec{F}$ , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной  $d\vec{l}$  с током  $I$ , определяется векторным произведением:

$$\vec{F} = I [d\vec{l} \vec{B}] \quad (6.1)$$

Эта сила направлена перпендикулярно индукции в данной точке поля и перпендикулярна элементу току  $I d\vec{l}$  (рис. 6.2).

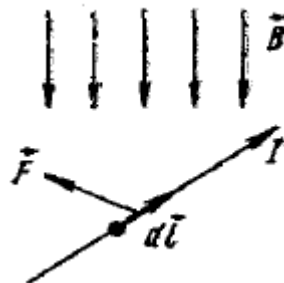


Рис. 6.2 – Воздействие силы на проводник с током в магнитном поле

В международной системе единиц СИ единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл):  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 1 \text{ Вб} / \text{м}^2$ .

### Магнитный поток

Магнитный поток через контур площадью  $S$  определяется следующим образом:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (6.2)$$

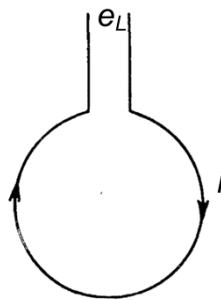


Рис. 6.3 – Контур

Под контуром понимается незамкнутый виток провода, имеющий форму петли (Рис. 6.3).

В этой формуле  $\vec{B}$  – это индукция магнитного поля, в котором находится контур. В случае плоского контура и неизменной в пределах этого контура величине магнитной индукции магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален величине магнитной индукции  $B$  в данной точке магнитного поля, площади контура  $S$  и косинусу угла между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к плоскости контура (рис. 6.4):

$$\Phi = \vec{B}\vec{S} = B \cdot S \cos \alpha \quad (6.3)$$

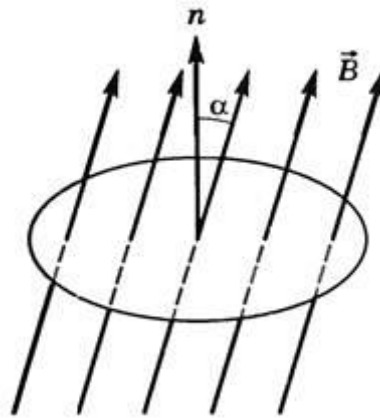


Рис. 6.4 Поток магнитной индукции через контур

Очевидно, что магнитный поток через контур имеет максимальное значение, когда магнитная индукция направлена перпендикулярно плоскости контура (то есть, когда  $\alpha = 0$ ).

**Напряженность магнитного поля и закон полного тока**

Другой характеристикой магнитного поля является его *напряженность*. Магнитное поле в каждой точке характеризуется вектором *напряженности H*, величина которого измеряется в А/м. Напряженность характеризует связь параметров поля с величиной источника поля. Как было указано выше, источником магнитного поля является электрический ток.

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов  $\sum I$ , охваченных этим контуром, определяется **законом полного тока**:

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = \sum I \quad (6.4)$$

Данная формула иллюстрируется следующим рисунком.

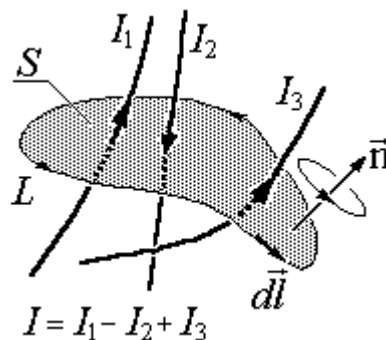


Рис. 6.5 Иллюстрация закона полного тока

Положительное направление интегрирования связано с положительным направлением тока  $I$  правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков  $w$  (синий контур L1 на рис.6.6), по которой проходит ток  $I$ , то  $\sum I = Iw$  и  $\oint \vec{H}d\vec{l} = Iw$ .

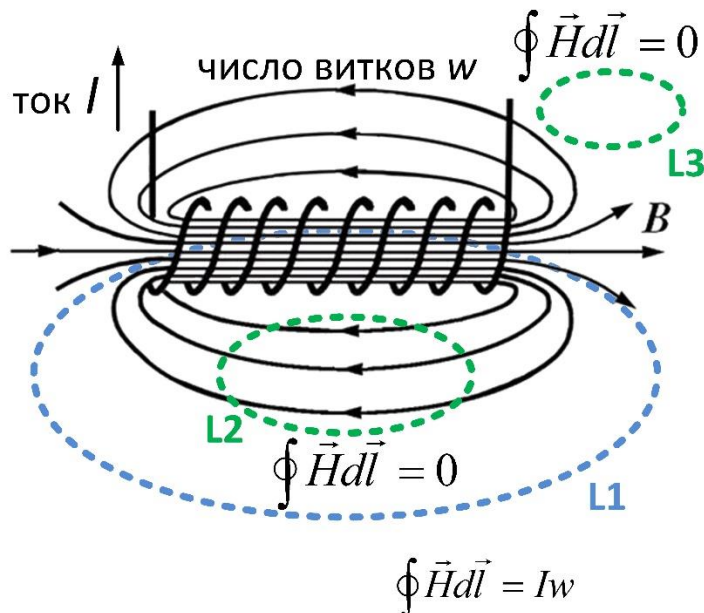


Рис. 6.6 – Пример применения закона полного тока к магнитному полю, создаваемому соленоидом

Если контур интегрирования не охватывает ни одного витка катушки (зеленые контура L2 и L3), ни одного провода, по которому протекает электрический ток, то в этом случае:

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = 0 \tag{6.5}$$

Разумеется, этот интеграл  $\oint \vec{H}d\vec{l}$  также равен нулю всегда, когда по катушке не пропускается ток, то есть, когда  $I=0$ , даже если интегрирование идет по контуру L1.

### **Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля**

Итак, напряженность магнитного поля  $H$  показывает **причину** появления магнитного поля: почему оно возникает? Эта характеристика отражает связь с источником возникновения магнитного поля – с электрическим током (формула (6.4)). А вот магнитная индукция  $B$  отражает силовые свойства поля. Она показывает, с какой силой данное магнитное поле действует на провод с током, помещенный в это поле (формула (6.1)). То есть, магнитная индукция указывает на **последствия** наличия магнитного поля: на то, как оно проявляется, как можно его обнаружить?

Существует ли связь между этими двумя характеристиками: напряженностью и магнитной индукцией?

Да. Если мы рассматриваем магнитное поле в вакууме, то обе эти характеристики фактически представляют собой одну и ту же величину:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (6.6)$$

Они отличаются только масштабным коэффициентом, который зависит от выбранной системы единиц. Можно подобрать такую систему единиц, при которой напряженность и магнитная индукция будут полностью совпадать. В применяемой нами международной системе единиц СИ  $B$  и  $H$  связаны через коэффициент  $\mu_0$ , который носит название *магнитная постоянная*, она равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \quad (6.7)$$

Казалось бы, зачем тогда вводить две характеристики магнитного поля вместо одной? Все дело в том, что для веществ равенство (6.6) не соблюдается. Если магнитное поле распространяется не в вакууме, а внутри вещества: внутри газа (например, воздух), внутри жидкости (например, вода) или внутри твердого тела (например, дерево или железо), – то вместо формулы (6.6) необходимо пользоваться другой формулой:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \quad (6.8)$$

И, здесь, как видите, появляется еще один коэффициент, обозначаемый  $\mu$ , и имеющий название *относительная магнитная проницаемость*. Относительная магнитная проницаемость разная для разных веществ. Соответственно, разной для разных веществ является и *абсолютная магнитная проницаемость*

$$\mu_a = \mu_0 \mu \quad (6.9)$$

С использованием абсолютной магнитной проницаемости формула (6.8) может быть переписана следующим образом:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \quad (6.10)$$

### Магнитная цепь

Магнитной цепью в общем случае называют совокупность катушек с током, ферромагнитных тел или каких-либо иных тел (сред), по которым замыкается магнитный поток.



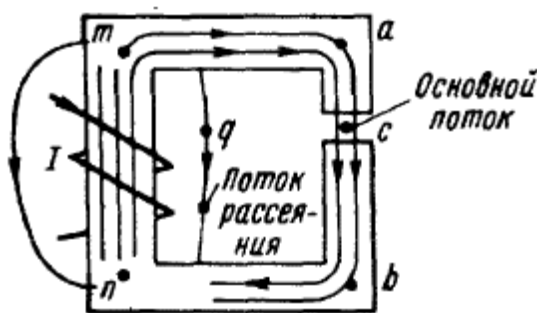


Рис. 6.7 – Неразветвленная магнитная цепь

Магнитные цепи могут быть подразделены на *неразветвленные* и *разветвленные*. Примером неразветвленной цепи может служить цепь, показанная на рис. 6.7.

Аналогом тока в электрической цепи является поток  $\Phi$  в магнитной цепи, аналогом падения электрического напряжения является падение магнитного напряжения, аналогом электродвижущей силы (ЭДС) является магнитодвижущая сила (МДС), аналогом электрического сопротивления является магнитное сопротивление.

**Магнитный поток через поперечное сечение магнитопровода**

Если поле направлено вдоль магнитопровода (рис. 6.8), то магнитный поток через поперечное сечение магнитопровода определяется простым умножением площади поперечного сечения магнитопровода на величину магнитной индукции внутри этого магнитопровода, которую в большинстве расчетных случаев можно считать одинаковой во всех точках поперечного сечения:

$$\Phi = B \cdot S \tag{6.11}$$

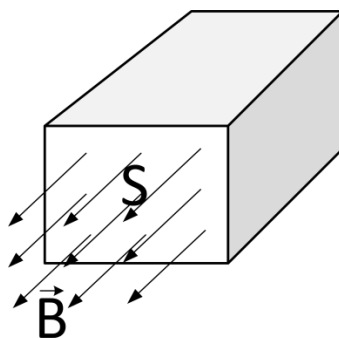


Рис. 6.8 – Магнитный поток в магнитопроводе

**Магнитодвижущая (намагничивающая) сила**

Магнитодвижущей силой (МДС) или намагничивающей силой (НС) катушки или обмотки с током называют произведение числа витков катушки  $w$  на протекающий по ней ток  $I$ .

МДС  $Iw$  вызывает магнитный поток в магнитной цепи подобно тому, как ЭДС вызывает электрический ток в электрической цепи. Как и ЭДС, МДС – величина направленная (положительное направление на схеме обозначают стрелкой).

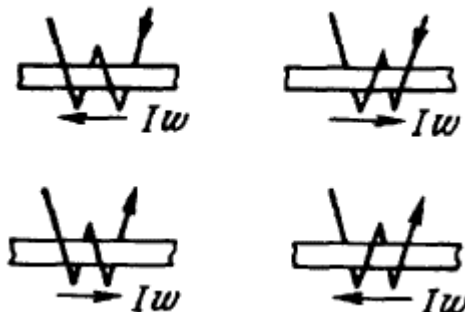


Рис. 6.9 – Определение направления МДС

Положительное направление МДС совпадает с движением острия правого винта, если винт вращать по направлению тока в обмотке.

Для определения положительного направления МДС пользуются мнемоническим правилом: если сердечник мысленно охватить правой рукой, расположив ее пальцы по току в обмотке, а затем отогнуть большой палец, то последний укажет направление МДС.

На рис. 6.9 дано несколько эскизов с различным направлением намотки катушек на сердечник и различным направлением МДС.

### **Падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи**

Падением магнитного напряжения между точками  $a$  и  $b$  магнитной цепи называют линейный интеграл от напряженности магнитного поля между этими точками:

$$U_{\text{маб}} = \int_a^b \vec{H} d\vec{l} \quad (6.12)$$

Если на этом участке  $\vec{H}$  постоянна и совпадает по направлению с элементом пути  $d\vec{l}$ , то  $\vec{H}d\vec{l} = Hdl \cos 0^\circ$  и  $H$  можно вынести из-под знака интеграла. Тогда

$$U_{\text{маб}} = H \int_a^b dl = Hl_{\text{аб}} \quad (6.13)$$

где  $l_{\text{аб}}$  – длина пути между точками  $a$  и  $b$ .

Единица падения магнитного напряжения – ампер (А).

В том случае, когда участок магнитной цепи между точками  $a$  и  $b$  может быть подразделен на  $n$  отдельных частей так, что для каждой части  $H=H_k = const$ , то

$$U_{.mab} = \sum_{k=1}^n H_k l_k \quad (6.14)$$

**Магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи.**

По определению (формула (6.13)), падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи длиной  $l$  :

$$U_{.m} = Hl \quad (6.15)$$

но

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu\mu_0 S} \quad (6.16)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения участка.

Следовательно,

$$U_{.m} = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \Phi = R_m \Phi \quad (6.17)$$

То есть:

$$U_{.m} = R_m \Phi, \quad (6.18)$$

где  $R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$  – магнитное сопротивление участка цепи длиной  $l$ .

Уравнение (6.18) называют законом Ома для участка магнитной цепи. Это уравнение устанавливает связь между падением магнитного напряжения  $U_{.m}$  и потоком  $\Phi$ ;  $R_m$  называют магнитным сопротивлением участка магнитной цепи. Величину, обратную магнитному сопротивлению, называют магнитной проводимостью.

**Законы Кирхгофа для магнитных цепей**

При расчетах магнитных цепей, также, как и электрических, используют первый и второй законы (правила) Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (6.19)$$

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей следует из принципа непрерывности магнитного потока, известного из курса физики.

Второй закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:

$$\sum U_m = \sum I_w \quad (6.20)$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей, по сути дела, есть иная форма записи закона полного тока.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Магнитная индукция и магнитный поток.
2. Напряженность магнитного поля и закон полного тока.
3. Связь магнитной индукции и напряженности магнитного поля.
4. Магнитодвижущая сила.
5. Падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи. Магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи.

## Лекція № 7

**Тема:** Физические основы функционирования индуктивных и индукционных датчиков (продолжение).

**Оглавление**

Магнитное сопротивление .....	3
Магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи (повторение).....	3
Законы Кирхгофа для магнитных цепей (повторение) .....	3
Полное магнитное сопротивление неразветвленной магнитной цепи.....	4
Переменное магнитное поле в магнитной цепи .....	5
Комплексное магнитное сопротивление .....	5
Явление электромагнитной индукции .....	5
Вихревые токи (токи Фуко) .....	6
Электромагнитные преобразователи .....	7
Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей .....	7
Контрольные вопросы по теме .....	10
Уровень модуля.....	10
Уровень курса.....	10

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.

4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## Магнитное сопротивление

### **Магнитное сопротивление участка магнитной цепи. Закон Ома для участка магнитной цепи (повторение).**

По определению падение магнитного напряжения на участке магнитной цепи длиной  $l$  равно:

$$U_m = Hl \quad (7.1)$$

но

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0} = \frac{\Phi}{\mu\mu_0 S} \quad (7.2)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения участка.

Следовательно,

$$U_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S} \Phi = R_m \Phi \quad (7.3)$$

То есть:

$$U_m = R_m \Phi, \quad (7.4)$$

где  $R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$  – магнитное сопротивление участка цепи  $l$ .

Уравнение (7.4) называют законом Ома для участка магнитной цепи. Это уравнение устанавливает связь между падением магнитного напряжения  $U_m$  и потоком  $\Phi$ ;  $R_m$  называют магнитным сопротивлением участка магнитной цепи. Величину, обратную магнитному сопротивлению, называют магнитной проводимостью.

### **Законы Кирхгофа для магнитных цепей (повторение)**

При расчетах магнитных цепей, также, как и электрических, используют первый и второй законы (правила) Кирхгофа.

#### Первый закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма магнитных потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (7.5)$$

Первый закон Кирхгофа для магнитных цепей следует из принципа непрерывности магнитного потока, известного из курса физики.



Второй закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС вдоль того же контура:

$$\sum U_m = \sum I_w \quad (7.6)$$

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей, по сути дела, есть иная форма записи закона полного тока.

**Полное магнитное сопротивление неразветвленной магнитной цепи.**

Магнитная цепь обычно состоит из нескольких участков. Например, неразветвленная магнитная цепь, представленная на рисунке 6.7, состоит из четырех последовательно соединенных участков:

- 1) участок цепи от  $n$  точки до точки  $m$ , у которого площадь поперечного сечения больше, чем на других участках,
- 2) участок цепи от точки  $m$  до воздушного зазора,
- 3) участок цепи от точки  $n$  до воздушного зазора,
- 4) участок цепи воздушного зазора, в котором магнитная проницаемость во много раз меньше ( $\mu \approx 1$ ), чем на других участках, которые изготовлены из ферромагнитного материала и где  $\mu$  составляет несколько тысяч единиц.

На каждом из этих участков имеет место падение магнитного напряжения. Сумма падений этих напряжений в соответствии со вторым законом Кирхгофа равна действующей в магнитной цепи МДС:

$$U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} + U_{m4} = I_w \quad (7.7)$$

Вспомним, что аналогом электрического тока в магнитной цепи является магнитный поток  $\Phi$ , аналогом ЭДС – магнитодвижущая сила МДС. Для неразветвленной цепи можно записать:

$$U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} + U_{m4} = R_{m1}\Phi + R_{m2}\Phi + R_{m3}\Phi + R_{m4}\Phi = (R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4})\Phi \quad (7.8)$$

В соответствии с (7.7) получаем:

$$(R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4})\Phi = I_w \quad (7.9)$$

Откуда получаем закон Ома для участка неразветвленной магнитной цепи:

$$R_m \Phi = I_w \quad (7.10),$$

где  $R_m = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4}$  – полное магнитное сопротивление неразветвленной магнитной цепи. Или в общем виде для неразветвленной цепи, состоящей из  $N$  последовательно соединенных участков:

$$R_m = \sum_{i=1}^N R_{mi} \quad (7.11),$$

Во всех датчиках обязательно имеется как минимум один участок с воздушным зазором.

## Переменное магнитное поле в магнитной цепи

### *Комплексное магнитное сопротивление*

В курсе электротехники мы видели, что в электрических цепях переменного тока электрическое сопротивление носит комплексный характер. Комплексное сопротивление в цепях переменного тока обозначают через  $Z$  в отличие от сопротивления в цепях постоянного тока, которое обозначают через  $R$ . Точно также и в магнитных цепях: если магнитодвижущая сила, а вслед за ней и поток становятся переменными, то сопротивление (в данном случае магнитное сопротивление) принимает комплексный характер. В этом случае его обозначают как  $Z_m$ .

### *Явление электромагнитной индукции*

Если магнитное поле является переменным, то возникает явление электромагнитной индукции, которое также было рассмотрено ранее в курсе электротехники.

Электромагнитной индукцией называется возникновения эдс в контуре при пересечении его магнитным полем. Под контуром понимается незамкнутый виток провода, имеющий форму петли (Рис. 6.3).

Индуктируемая в контуре внешним магнитным полем электродвижущая сила  $e$  определяется по формуле:

$$e_L = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7.12)$$

где  $\Phi$  – это магнитный поток, пронизывающий контур.

ЭДС индукции, наводимая внешним магнитным полем, пропорциональна **скорости изменения магнитного потока**. Знак минус в правой части формулы (7.12) обусловлен принципом Ленца, определяющим направление индуктивной эдс: «эдс направлена так, что своим действием препятствует причине, вызвавшей её появление». Или иначе говоря: эдс, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится

вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.

Явление электромагнитной индукции является причиной самоиндукции и взаимной индукции двух катушек. Напомним, что параметром, отражающим это явление в электрической цепи, являются  $L$  – индуктивность катушки и  $M$  – коэффициент взаимной индукции двух катушек.

Если на неразветвленную магнитную цепь надета катушка индуктивности, то ее индуктивность  $L$  в значительной мере зависит от параметров магнитной цепи, то есть от ее магнитного сопротивления. Если же магнитную цепь охватывают сразу две катушки индуктивности, то коэффициент взаимной индукции этих катушек  $M$  в первую очередь зависит от свойств данной магнитной цепи – от ее магнитного сопротивления. Чем меньше  $R_m$ , тем больше  $M$ .

### ***Вихревые токи (токи Фуко)***

Токи Фуко (в честь Фуко, Жан Бернар Леон) — это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока. Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо вследствие изменения во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо вследствие движения тела в магнитном поле, приводящего к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть. Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

В отличие от электрического тока в проводах, текущего по точно определённым путям, вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей массе, образуя вихреобразные контуры. Эти контуры тока взаимодействуют с породившим их магнитным потоком. Согласно правилу Ленца, магнитное поле вихревых токов направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего эти вихревые токи.

В соответствии с законом Джоуля - Ленца вихревые токи нагревают проводники, в которых они возникли. Поэтому вихревые токи приводят к потерям энергии (потери на вихревые токи) в магнитопроводах (в сердечниках трансформаторов и катушек переменного тока, в магнитных цепях машин).

При движении проводящего тела в магнитном поле индуцированные вихревые токи обуславливают заметное механическое взаимодействие тела с полем. Токи Фуко, как и индукционные токи в простых линейных проводниках, имеют направление, которое подчиняется правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы быть препятствием изменению магнитного потока, который вызывает вихревые токи. Например, если между

полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания (рис. 7.1), то при включении тока он начинает сильно тормозить и очень быстро останавливается. Этот опыт объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют направление, при котором действующие на них со стороны магнитного поля силы оказывают тормозящее действие на маятник и он быстро останавливается. Этот факт практически применяется для успокоения (демпфирования) подвижных частей различных приборов и механизмов. Если сделать радиальные вырезы в описанном маятнике, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

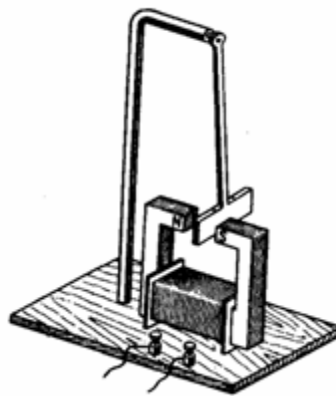


Рис. 7.1 Опыт с маятником для демонстрации действия токов Фуко

Вихревые токи применяются для пайки, плавки и поверхностной закалки металлов, а их силовое действие используется в успокоителях колебаний подвижных частей приборов и аппаратов, в индукционных тормозах (в которых массивный металлический диск вращается в поле электромагнитов) и т. п.

### **Электромагнитные преобразователи**

#### ***Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей***

На рис. 7.2а изображена магнитная цепь электромагнитного преобразователя. Магнитная цепь состоит сердечника из двух магнитопроводов 1 и 2, каждый из которых обладает своим магнитным сопротивлением  $R_{M1}$  и  $R_{M2}$ , а также воздушного зазора между ними шириной  $\delta$  с магнитным сопротивлением  $R_\delta$ . На магнитопровод 2 намотаны две обмотки с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ .

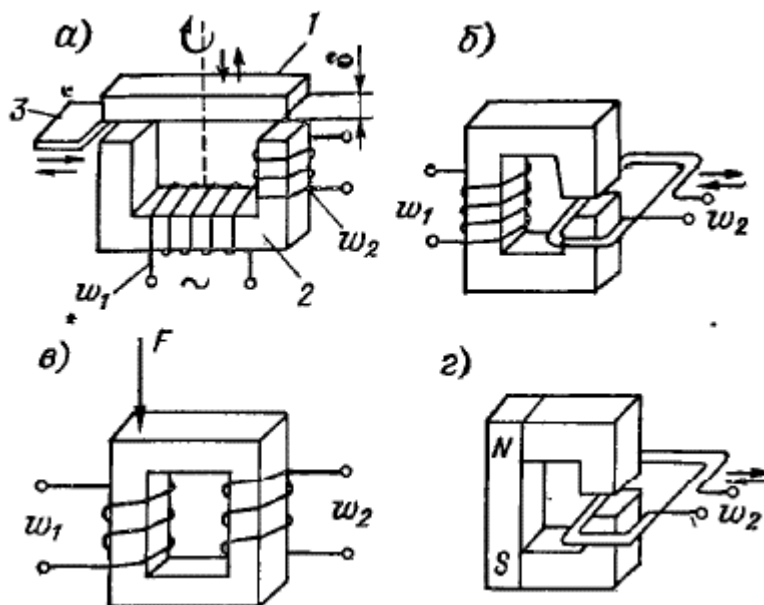


Рис.7.2 – Магнитная цепь электромагнитного преобразователя

Можно изменять магнитное сопротивление воздушного зазора  $R_{\delta}$ , например, приближая подвижный сердечник  $1$  к неподвижному  $2$  (уменьшение  $\delta$ ), или уменьшать площадь  $S$  участка магнитной цепи в воздушном зазоре, поворачивая сердечник  $1$  относительно неподвижной части магнитной цепи  $2$ . Тогда будет изменяться полное магнитное сопротивление  $R_m$  всей цепи. Вслед за этим будет изменяться величина индуктивности каждой из катушек  $L1, L2$ , а также величина взаимной индуктивности  $M$ .

Значения  $L$  и  $M$  можно изменять и при неподвижных сердечниках  $1$  и  $2$  путем введения в воздушный зазор пластины  $3$  из ферромагнитного материала (фактически, это приводит к уменьшению величины воздушного зазора  $\delta$ ) или пластины из электропроводного неферромагнитного материала. В последнем случае изменение  $L$  и  $M$  обусловлено размагничивающим действием вихревых токов, индуктированных в пластине основным магнитным потоком, проходящим по магнитной цепи.

Преобразователи, преобразующие естественную входную величину в виде перемещения в изменение индуктивности, называют *индуктивными*. Преобразователи, преобразующие перемещение в изменение величины взаимной индукции, принято называть *трансформаторными*.

В трансформаторных преобразователях изменение величины взаимной индукции  $M$  можно получить не только при изменении магнитного сопротивления, но и при перемещении одной из обмоток, как это показано на рис. 7.2б.

Если к магнитной цепи преобразователя (рис. 7.2в) приложить сжимающие, растягивающие или скручивающие усилия, то вследствие их воздействия произойдет изменение магнитной проницаемости  $\mu$  сердечника.

Последнее вызовет изменение магнитного сопротивления сердечника  $R_M$ . Это, в свою очередь, приведет к изменению индуктивности обмотки, помещенной на сердечнике, или взаимоиנדуктивности между обмотками  $w_1$  и  $w_2$ .

Подобные преобразователи в качестве естественной входной величины имеют упругую деформацию сердечника и могут быть использованы для измерения сил, давлений, моментов и т. д. Эти преобразователи, основанные на изменении магнитного сопротивления, обусловленном изменением магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под воздействием механической деформации, называются *магнитоупругими*.

На рис. 7.2г изображен преобразователь, конструктивно аналогичный трансформаторному преобразователю на рис. 7.2б, но с постоянным магнитом, который может быть заменен постоянным электромагнитом, если через обмотку  $w_1$ , (рис. 7.2б) пропустить постоянный ток. При неподвижной обмотке  $w_2$  ЭДС на ее зажимах равна нулю. Однако если обмотка  $w_2$  под воздействием измеряемой величины начинает перемещаться, то сцепленный с ней магнитный поток  $\Phi$  изменяется, что согласно закону электромагнитной индукции вызывает появление в обмотке э. д. с., равной

$$e_L = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.13)$$

где  $\frac{d\Phi}{dt}$  – скорость изменения магнитного потока, сцепляющегося с витками обмотки.

Поскольку скорость изменения магнитного потока определяется скоростью перемещения обмотки в воздушном зазоре, то преобразователь (рис. 7.2г) имеет естественную входную величину в виде скорости линейных или угловых перемещений, а выходную – в виде индуцированной э. д. с. Подобные преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой (механической) величины преобразуется в индуцированную э. д. с., называются *индукционными*.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Законы Кирхгофа для магнитных цепей. Полное магнитное сопротивление неразветвленной магнитной цепи.
2. Явление электромагнитной индукции.
3. Вихревые токи (токи Фуко).
4. Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей.

## Лекція № 8

**Тема:** Физические основы функционирования индуктивных и индукционных датчиков (продолжение).

**Оглавление**

Переменное магнитное поле в магнитной цепи (повторение) .....	2
Комплексное магнитное сопротивление .....	2
Явление электромагнитной индукции .....	2
Вихревые токи (токи Фуко) .....	3
Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей .....	4
Типы индуктивных преобразователей .....	6
Контрольные вопросы по теме .....	8
Уровень модуля .....	8
Уровень курса .....	8

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5



## Переменное магнитное поле в магнитной цепи (повторение)

### Комплексное магнитное сопротивление

В курсе электротехники мы видели, что в электрических цепях переменного тока электрическое сопротивление носит комплексный характер. Комплексное сопротивление в цепях переменного тока обозначают через  $Z$  в отличие от сопротивления в цепях постоянного тока, которое обозначают через  $R$ . Точно также и в магнитных цепях: если магнитодвижущая сила, а вслед за ней и поток становятся переменными, то сопротивление (в данном случае магнитное сопротивление) принимает комплексный характер. В этом случае его обозначают как  $Z_m$ .

### Явление электромагнитной индукции

Если магнитное поле является переменным, то возникает явление электромагнитной индукции, которое также было рассмотрено ранее в курсе электротехники.

Электромагнитной индукцией называется возникновения эдс в контуре при пересечении его магнитным полем. Под контуром понимается незамкнутый виток провода, имеющий форму петли (Рис. 6.3).

Индуктируемая в контуре внешним магнитным полем электродвижущая сила  $e$  определяется по формуле:

$$e_L = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.1)$$

где  $\Phi$  – это магнитный поток, пронизывающий контур.

ЭДС индукции, наводимая внешним магнитным полем, пропорциональна **скорости изменения магнитного потока**. Знак минус в правой части формулы (8.1) обусловлен принципом Ленца, определяющим направление индуктивной эдс: «эдс направлена так, что своим действием препятствует причине, вызвавшей её появление». Или иначе говоря: эдс, наводимая в контуре изменяющимся магнитным потоком, всегда стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока.

Явление электромагнитной индукции является причиной самоиндукции и взаимной индукции двух катушек. Напомним, что параметром, отражающим это явление в электрической цепи, являются  $L$  – индуктивность катушки и  $M$  – коэффициент взаимной индукции двух катушек.

Если на неразветвленную магнитную цепь надета катушка индуктивности, то ее индуктивность  $L$  в значительной мере зависит от параметров магнитной цепи, то есть от ее магнитного сопротивления. Если же магнитную цепь охватывают сразу две катушки индуктивности, то

коэффициент взаимной индукции этих катушек  $M$  в первую очередь зависит от свойств данной магнитной цепи – от ее магнитного сопротивления. Чем меньше  $R_m$ , тем больше  $M$ .

### **Вихревые токи (токи Фуко)**

Токи Фуко (в честь Фуко, Жан Бернар Леон) — это вихревые замкнутые электрические токи в массивном проводнике, которые возникают при изменении пронизывающего его магнитного потока. Вихревые токи являются индукционными токами и образуются в проводящем теле либо вследствие изменения во времени магнитного поля, в котором находится тело, либо вследствие движения тела в магнитном поле, приводящего к изменению магнитного потока через тело или какую-либо его часть. Величина токов Фуко тем больше, чем быстрее меняется магнитный поток.

В отличие от электрического тока в проводах, текущего по точно определённым путям, вихревые токи замыкаются непосредственно в проводящей массе, образуя вихреобразные контуры. Эти контуры тока взаимодействуют с породившим их магнитным потоком. Согласно правилу Ленца, магнитное поле вихревых токов направлено так, чтобы противодействовать изменению магнитного потока, индуцирующего эти вихревые токи.

В соответствии с законом Джоуля - Ленца вихревые токи нагревают проводники, в которых они возникли. Поэтому вихревые токи приводят к потерям энергии (потери на вихревые токи) в магнитопроводах (в сердечниках трансформаторов и катушек переменного тока, в магнитных цепях машин).

При движении проводящего тела в магнитном поле индуцированные вихревые токи обуславливают заметное механическое взаимодействие тела с полем. Токи Фуко, как и индукционные токи в простых линейных проводниках, имеют направление, которое подчиняется правилу Ленца: их магнитное поле направлено так, чтобы быть препятствием изменению магнитного потока, который вызывает вихревые токи. Например, если между полюсами невключенного электромагнита массивный медный маятник совершает практически незатухающие колебания (рис. 8.1), то при включении тока он начинает сильно тормозить и очень быстро останавливается. Этот опыт объясняется тем, что возникшие токи Фуко имеют направление, при котором действующие на них со стороны магнитного поля силы оказывают тормозящее действие на маятник и он быстро останавливается. Этот факт практически применяется для успокоения (демпфирования) подвижных частей различных приборов и механизмов. Если сделать радиальные вырезы в описанном маятнике, то вихревые токи ослабляются и торможение почти отсутствует.

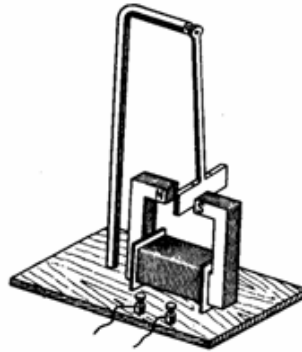


Рис. 8.1 Опыт с маятником для демонстрации действия токов Фуко

Вихревые токи применяются для пайки, плавки и поверхностной закалки металлов, а их силовое действие используется в успокоителях колебаний подвижных частей приборов и аппаратов, в индукционных тормозах (в которых массивный металлический диск вращается в поле электромагнитов) и т. п.

### Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей

На рис. 8.2а изображена магнитная цепь электромагнитного преобразователя. Магнитная цепь состоит сердечника из двух магнитопроводов 1 и 2, каждый из которых обладает своим магнитным сопротивлением  $R_{M1}$  и  $R_{M2}$ , а также воздушного зазора между ними шириной  $\delta$  с магнитным сопротивлением  $R_\delta$ . На магнитопровод 2 намотаны две обмотки с числом витков  $w_1$  и  $w_2$ .

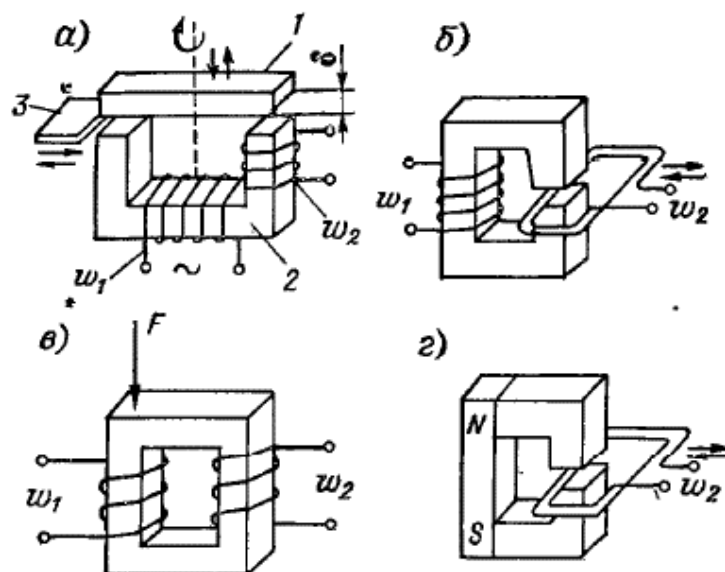


Рис.8.2 – Магнитная цепь электромагнитного преобразователя

Можно изменять магнитное сопротивление воздушного зазора  $R_\delta$ , например, приближая подвижный сердечник  $1$  к неподвижному  $2$  (уменьшение  $\delta$ ), или уменьшать площадь  $S$  участка магнитной цепи в воздушном зазоре, поворачивая сердечник  $1$  относительно неподвижной части магнитной цепи  $2$ . Тогда будет изменяться полное магнитное сопротивление  $R_M$  всей цепи. Вслед за этим будет изменяться величина индуктивности каждой из катушек  $L1, L2$ , а также величина взаимной индуктивности  $M$ .

Значения  $L$  и  $M$  можно изменять и при неподвижных сердечниках  $1$  и  $2$  путем введения в воздушный зазор пластины  $3$  из ферромагнитного материала (фактически, это приводит к уменьшению величины воздушного зазора  $\delta$ ) или пластины из электропроводного неферромагнитного материала. В последнем случае изменение  $L$  и  $M$  обусловлено размагничивающим действием вихревых токов, индуктированных в пластине основным магнитным потоком, проходящим по магнитной цепи.

Преобразователи, преобразующие естественную входную величину в виде перемещения в изменение индуктивности, называют *индуктивными*. Преобразователи, преобразующие перемещение в изменение величины взаимной индукции, принято называть *трансформаторными*.

В трансформаторных преобразователях изменение величины взаимной индукции  $M$  можно получить не только при изменении магнитного сопротивления, но и при перемещении одной из обмоток, как это показано на рис. 8.2б.

Если к магнитной цепи преобразователя (рис. 8.2в) приложить сжимающие, растягивающие или скручивающие усилия, то вследствие их воздействия произойдет изменение магнитной проницаемости  $\mu$  сердечника. Последнее вызовет изменение магнитного сопротивления сердечника  $R_M$ . Это, в свою очередь, приведет к изменению индуктивности обмотки, помещенной на сердечнике, или взаимной индуктивности между обмотками  $w_1$  и  $w_2$ .

Подобные преобразователи в качестве естественной входной величины имеют упругую деформацию сердечника и могут быть использованы для измерения сил, давлений, моментов и т. д. Эти преобразователи, основанные на изменении магнитного сопротивления, обусловленном изменением магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под воздействием механической деформации, называются *магнитоупругими*.

На рис. 8.2г изображен преобразователь, конструктивно аналогичный трансформаторному преобразователю на рис. 8.2б, но с постоянным магнитом, который может быть заменен постоянным электромагнитом, если через обмотку  $w_1$ , (рис. 8.2б) пропустить постоянный ток. При неподвижной обмотке  $w_2$  эдс на ее зажимах равна нулю. Однако если обмотка  $w_2$  под воздействием измеряемой величины начинает перемещаться, то сцепленный с ней

магнитный поток  $\Phi$  изменяется, что согласно закону электромагнитной индукции вызывает появление в обмотке э. д. с., равной

$$e_L = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (8.2)$$

где  $\frac{d\Phi}{dt}$  – скорость изменения магнитного потока, сцепляющегося с витками обмотки.

Поскольку скорость изменения магнитного потока определяется скоростью перемещения обмотки в воздушном зазоре, то преобразователь (рис. 8.2г) имеет естественную входную величину в виде скорости линейных или угловых перемещений, а выходную – в виде индуцированной э. д. с. Подобные преобразователи, в которых скорость изменения измеряемой (механической) величины преобразуется в индуцированную э. д. с., называются *индукционными*.

### Типы индуктивных преобразователей

На рис. 8.3а изображен наиболее распространенный преобразователь с малым воздушным зазором  $\delta$ , ширина которого изменяется под действием некоторой силы  $P$ . Комплексное сопротивление катушки индуктивности  $Z$  изменяется так, как показано на рисунке 8.4. Как видно, линейный участок  $\Delta\delta$  зависимости  $Z(\delta)$  довольно небольшой в сравнении с наибольшей шириной зазора  $\delta_0$ . Обычно, именно этот линейный участок используют как рабочий, то есть измерения проводят именно в этом диапазоне перемещений подвижной части сердечника. Рабочее перемещение в данных преобразователях с переменным зазором составляет 0,01—10 мм.

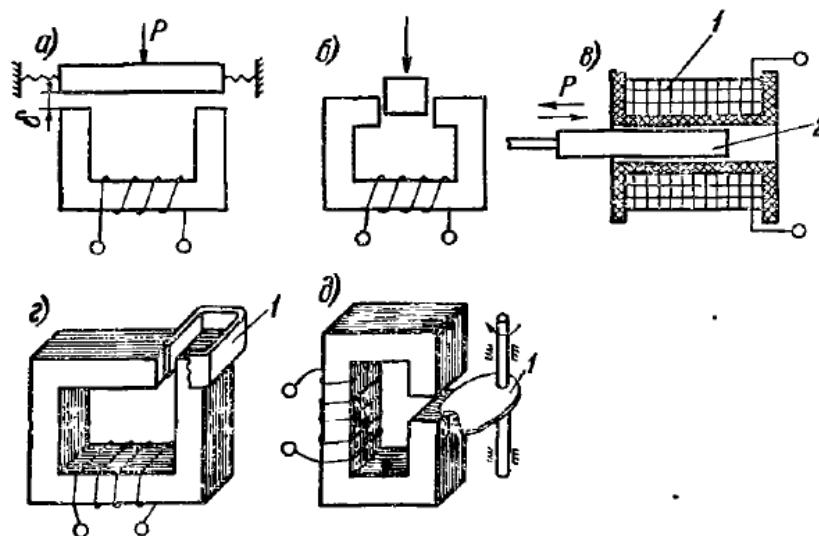


Рис. 8.3 – Индуктивные преобразователи

Преобразователь с изменяющейся в соответствии со значением измеряемой величины площадью воздушного зазора приведен на рис. 8.3б. Преобразователи такого типа можно применять при измерении перемещений порядка 5—20 мм.

На рис. 8.3в изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой катушку 1, внутри которой помещен стальной сердечник (якорь) 2. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки. Этот тип преобразователя применяется для измерения значительных перемещений сердечника (10—100 мм).

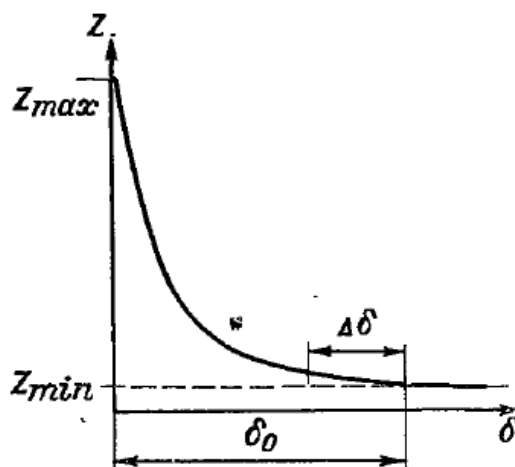


Рис. 8.4 – Зависимость комплексного сопротивления катушки от ширины зазора

Преобразователи, показанные на рис. 8.3г, 8.3д, основаны на изменении магнитного сопротивления вследствие размагничивающего действия вторичных токов. В преобразователе (рис. 8.3г) в воздушный зазор вводится короткозамкнутый виток 1. В преобразователе (рис. 8.3д) аналогичное экранирующее действие обусловлено вторичными токами в профилированном электропроводном диске 1 из меди или алюминия. Изменяя профиль диска, можно получить любой вид зависимости индуктивности от угла поворота диска. Преобразователи этого типа используются для измерения угловых перемещений до 180 – 360°.

Одним из основных достоинств индуктивных преобразователей является возможность получения большой мощности преобразователя (до 1 – 5 В·А), что позволяет пользоваться сравнительно малочувствительным указателем на выходе измерительной цепи и регистрировать измеряемую переменную величину самописцем или вибратором осциллографа без предварительного усиления. Лишь при малогабаритных преобразователях приходится прибегать к включению усилителя между измерительной цепью и указателем или регистратором.

## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Явление электромагнитной индукции.
2. Вихревые токи (токи Фуко).
3. Разновидности и принципы действия электромагнитных преобразователей.
4. Типы индуктивных преобразователей.

## Лекція № 9

**Тема:** Физические основы измерения перемещений, скоростей и ускорений.

**Оглавление**

Общие принципы измерения перемещений, скорости и ускорений ...	3
Измерение перемещений при помощи электромагнитных преобразователей .....	4
Типы индуктивных преобразователей (повторение) .....	4
Дифференциальные индуктивные преобразователи .....	5
Измерение скорости вращения .....	7
Тахометрические преобразователи .....	7
Импульсные преобразователи для измерения угловой скорости ....	8
Измерение линейной скорости .....	9
Измерение линейного ускорения .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля .....	11
Уровень курса .....	11

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.



4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## **Общие принципы измерения перемещений, скорости и ускорений**

---

По естественной входной величине прибора методы измерения параметров движения могут быть разбиты на две группы.

К первой группе относятся методы, основанные на осуществлении непосредственного контакта между движущимся объектом и системой, принятой за неподвижную. Контакт не обязательно должен быть механическим, он может осуществляться оптическими, акустическими методами, радиометодами и др. Основным свойством всех без исключения приборов, основанных на этом методе, является их общность по естественной входной величине, которой может быть только перемещение. Приборы, основанные на этом методе, называются контактными. К этой группе приборов относятся все устройства, предназначенные для измерения параметров относительного движения.

Ко второй группе относятся методы, не требующие осуществления непосредственного контакта с неподвижной системой отсчета. Приборы, реализующие этот метод, называются *инерционными*, а принцип их действия основан на интегрировании основного уравнения механики ( $F = ma$ ). Поэтому естественной входной величиной таких приборов может быть только сила инерции, воспринимаемая корпусом датчика, с которым связана собственная (подвижная) система отсчета. Инерционные приборы для измерения параметров линейного движения принято называть сейсмическими, а углового – гироскопическими.

Это свойство приборов для измерения параметров движения, т. е. способность реагировать или на взаимное перемещение, или на силу инерции, нашло свое отражение в их структуре. Так как основные параметры механического движения – перемещение, скорость и ускорение – связаны между собой простейшими дифференциальными зависимостями, то обычно прибор для измерения какого-либо параметра имеет предварительный преобразователь, реагирующий на другой параметр, легче поддающийся измерению, а искомая величина получается путем применения операционных звеньев в цепи дальнейшего преобразования (в датчике, измерительной цепи или указателе).

Существует достаточно большое количество методов измерения угловых и линейных перемещений, скоростей и ускорений. Соответственно, существует разнообразные датчики, построенные с использованием этих методов. Достаточно назвать пьезоэлектрические, емкостные, радиоволновые, акустические, оптические датчики. В данной лекции представлено измерение угловых и линейных перемещений, скоростей и ускорений только электромагнитными преобразователями, рассмотренными в предыдущих

лекціях. Важно отметить, что эти датчики благодаря простоте конструкции и высокой надежности получили наибольшее распространение. В последующих лекциях, по мере продвижения в изучении физических основ построения систем автоматизированного управления и контроля, будут рассмотрены и другие типы датчиков этих физических величин.

## Измерение перемещений при помощи электромагнитных преобразователей

### Типы индуктивных преобразователей (повторение)

На рис. 9.1а изображен наиболее распространенный преобразователь с малым воздушным зазором  $\delta$ , ширина которого изменяется под действием некоторой силы  $P$ . Комплексное сопротивление катушки индуктивности  $Z$  изменяется так, как показано на рисунке 9.2. Как видно, линейный участок  $\Delta\delta$  зависимости  $Z(\delta)$  довольно небольшой в сравнении с наибольшей шириной зазора  $\delta_0$ . Обычно, именно этот линейный участок используют как рабочий, то есть измерения проводят именно в этом диапазоне перемещений подвижной части сердечника. Рабочее перемещение в данных преобразователях с переменным зазором составляет 0,01–10 мм.

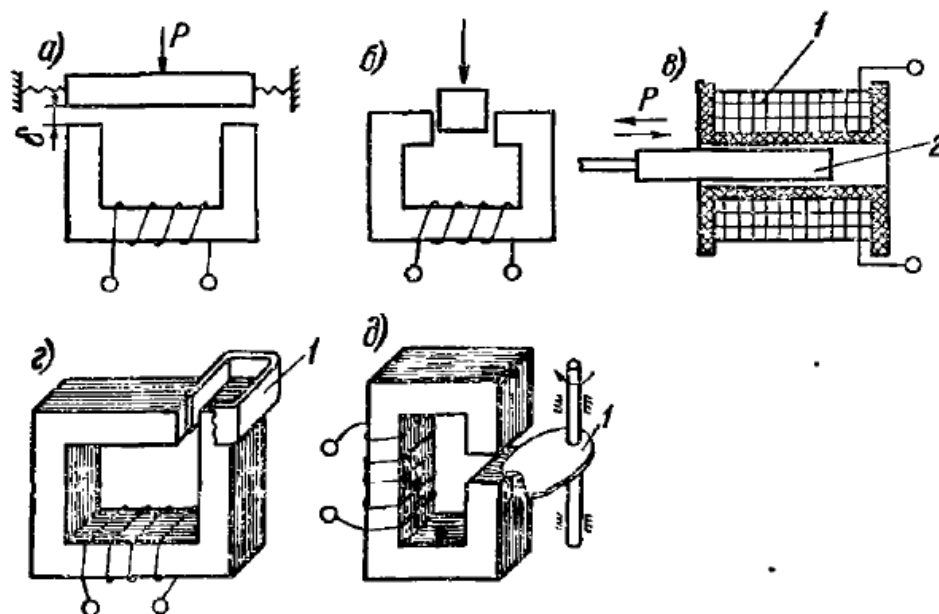


Рис. 9.1 – Индуктивные преобразователи

Преобразователь с изменяющейся в соответствии со значением измеряемой величины площадью воздушного зазора приведен на рис. 9.1б. Преобразователи такого типа можно применять при измерении перемещений порядка 5–20 мм.

На рис. 9.1в изображен преобразователь с разомкнутой магнитной цепью. Он представляет собой катушку 1, внутри которой помещен стальной

сердечник (якорь) 2. Перемещение сердечника вызывает изменение индуктивности катушки. Этот тип преобразователя применяется для измерения значительных перемещений сердечника (10–100 мм).

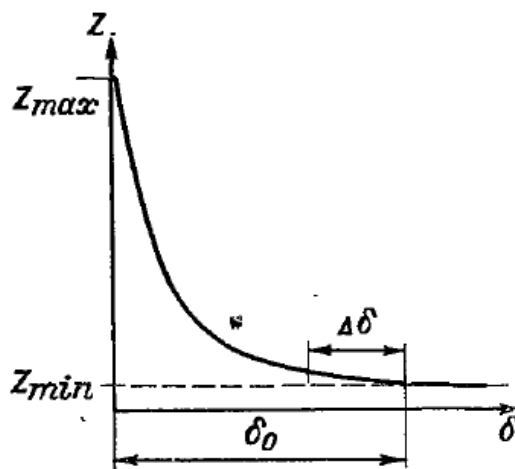


Рис. 9.2 – Зависимость комплексного сопротивления катушки от ширины зазора

Преобразователи, показанные на рис. 9.1г, 9.1д, основаны на изменении магнитного сопротивления вследствие размагничивающего действия вторичных токов. В преобразователе (рис. 9.1г) в воздушный зазор вводится короткозамкнутый виток  $I$ . В преобразователе (рис. 9.1д) аналогичное экранирующее действие обусловлено вторичными токами в профилированном электропроводном диске  $I$  из меди или алюминия. Изменяя профиль диска, можно получить любой вид зависимости индуктивности от угла поворота диска. Преобразователи этого типа используются для измерения угловых перемещений до  $180 - 360^\circ$ .

Одним из основных достоинств индуктивных преобразователей является возможность получения большой мощности преобразователя (до  $1 - 5 \text{ В} \cdot \text{А}$ ), что позволяет пользоваться сравнительно малочувствительным указателем на выходе измерительной цепи и регистрировать измеряемую переменную величину самописцем или вибратором осциллографа без предварительного усиления. Лишь при малогабаритных преобразователях приходится прибегать к включению усилителя между измерительной цепью и указателем или регистратором.

### **Дифференциальные индуктивные преобразователи**

Дифференциальные преобразователи позволяют уменьшить погрешности и увеличить линейный участок характеристики (рис. 9.4), поэтому в практике индуктивные преобразователи почти всегда выполняются дифференциальными. Некоторые их конструкции показаны на рис. 9.3.

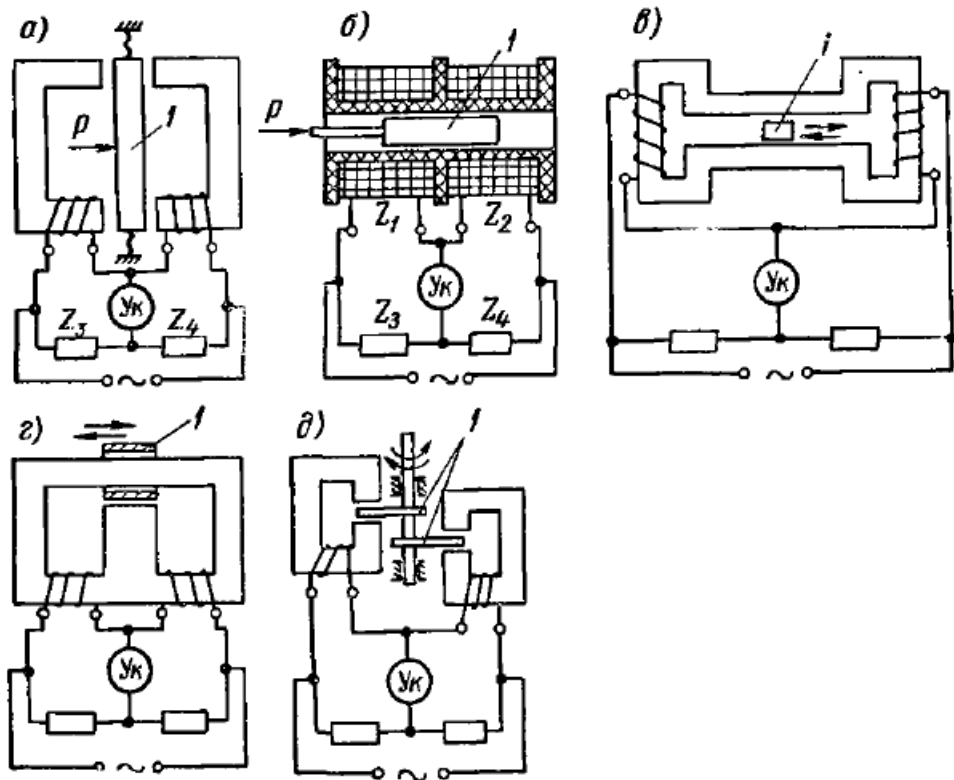


Рис. 9.3 – Дифференциальные индуктивные преобразователи

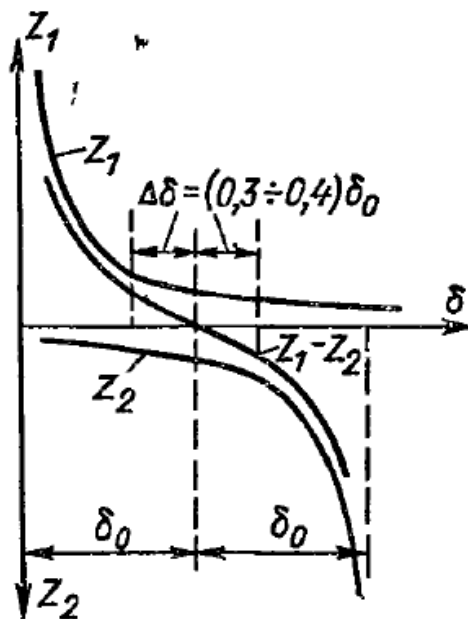


Рис 9.4 – Выходная характеристика дифференциального преобразователя

При отсутствии перемещения, когда внешняя сила равна нулю  $P = 0$  якорь  $I$  (рис. 9.3a) расположен симметрично относительно обоих сердечников и магнитные сопротивления для потоков, создаваемых обеими катушками, одинаковы. Изменения магнитных сопротивлений, происходящие под воздействием силы  $P$ , имеют противоположные знаки. Аналогичное явление наблюдается при перемещениях из среднего положения якоря  $I$  в

преобразователях, показанных на рис. 9.3, б, в, д, или короткозамкнутого витка  $I$  в преобразователе на рис. 9.3г.

### **Измерение скорости вращения**

Под скоростью вращения  $v$  (об/мин) обычно понимают число оборотов  $n$  твердого тела за единицу времени  $t = 1$  мин:

$$v = nt$$

Частота вращения  $f$  Гц обозначает число полных оборотов за единицу времени  $t = 1$  с:

$$f = n/t$$

В машиностроении и во многих других областях техники необходимо точно определять частоту вращения, например для контроля и регулирования работы машин. Неудивительно поэтому, что имеется много разнообразных типов тахометров, тем более что в основу измерения частоты вращения могут быть положены разные физические явления.

Наиболее простой конструкцией отличаются механические тахометры. Они выпускаются в очень больших количествах в виде неподвижно встроенных в агрегаты приборов, используемых для непрерывной индикации усредненного мгновенного значения скорости, или в виде ручных приборов, применяемых иногда для единичных измерений.

Значительно удобнее как по возможности использования для измерения различных физических эффектов, так и по возможности дальнейшей обработки измерительных сигналов являются электрические тахометры. Под ними понимаются все тахометры, дающие на выходе электрический сигнал. Сюда относятся, в частности, различные типы тахогенераторов, которые должны быть жестко связаны с объектом измерения. Они вырабатывают непрерывный сигнал, пропорциональный частоте вращения объекта измерений, и могут быть также с успехом использованы для определения изменений частоты вращения.

### **Тахометрические преобразователи**

Тахометрические преобразователи – это индукционные датчики, построенные путем использования закона электромагнитной индукции. Преобразователи этого типа представляют собой электромашинные генераторы. В качестве примера рассмотрим синхронный (преобразователь называется синхронным, так как частота его ЭДС равна или кратна частоте вращения вала) преобразователь с вращающимся постоянным магнитом (рис. 9.5а): он состоит из статора 1, на котором помещена обмотка, и ротора 2 с

закрепленным на нем постоянным магнитом. При вращении магнита изменяется поток, проходящий через обмотку, и в ней индуцируется переменная ЭДС. Амплитуда и частота ЭДС пропорциональны частоте вращения ротора. Частота ЭДС определяется соотношением  $f = np/60$ , где  $n$  - частота вращения, об/мин;  $p$  - число пар полюсов.

На рис. 9.5б приведена схема тахометрического преобразователя постоянного тока с возбуждением от постоянного магнита, расположенного на статоре 1. Измерительная обмотка расположена на роторе 2, и при его вращении в ней образуется переменная ЭДС, которая снимается с вращающегося ротора и подается на статор с помощью коллектора 3 и скользящих по нему щеток. При этом переменная ЭДС выпрямляется.

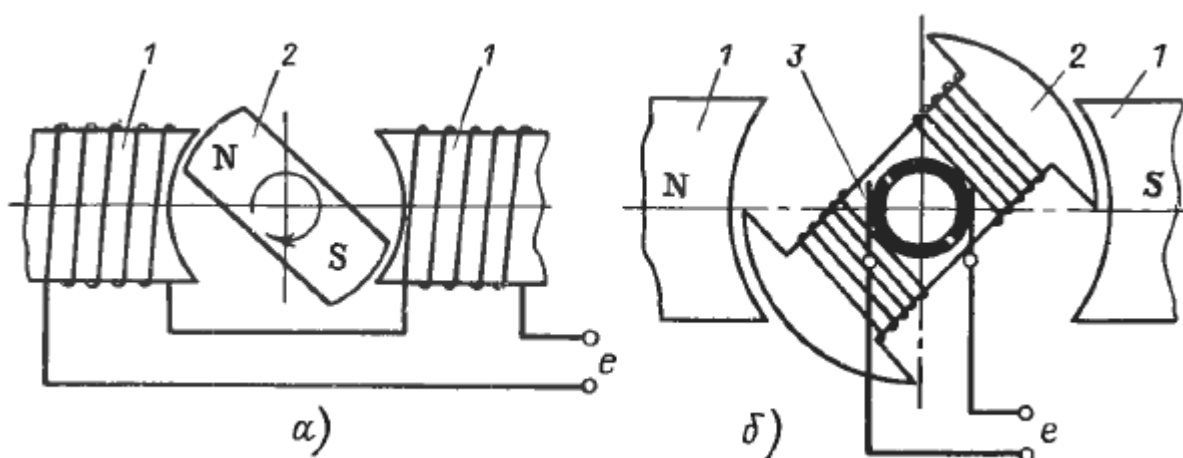


Рис. 9.5 – Конструктивная схема построения тахогенератора

Если в нагрузке преобразователя течет ток, то преобразователь отдает в измерительную цепь некоторую электрическую мощность. Эта энергия образована из механической.

### **Импульсные преобразователи для измерения угловой скорости**

Импульсные преобразователи представляют собой электромагнитный преобразователь индуктивного типа. Импульсный преобразователь (рис. 9.6) представляет собой катушку 1 с разомкнутым ферромагнитным сердечником, установленную возле вала 2, частота вращения которого измеряется; на валу монтируется один или несколько ферромагнитных зубцов 3. Сердечник катушки предварительно намагничивается. При вращении вала зуб проходит вблизи катушки и уменьшает магнитное сопротивление  $R_m$  сердечника, как показано на графике. В соответствии с этим изменяется магнитный поток, проходящий через катушку, и в ней индуцируется ЭДС  $e$ . С выводом катушки снимается последовательность двуполярных импульсов, частота которых равна частоте прохождения зубцов вблизи катушки, т.е. пропорциональна частоте вращения вала.

Вторичним преобразователем импульсного индукционного преобразователя является частотомер, проградуированный в единицах частоты вращения.

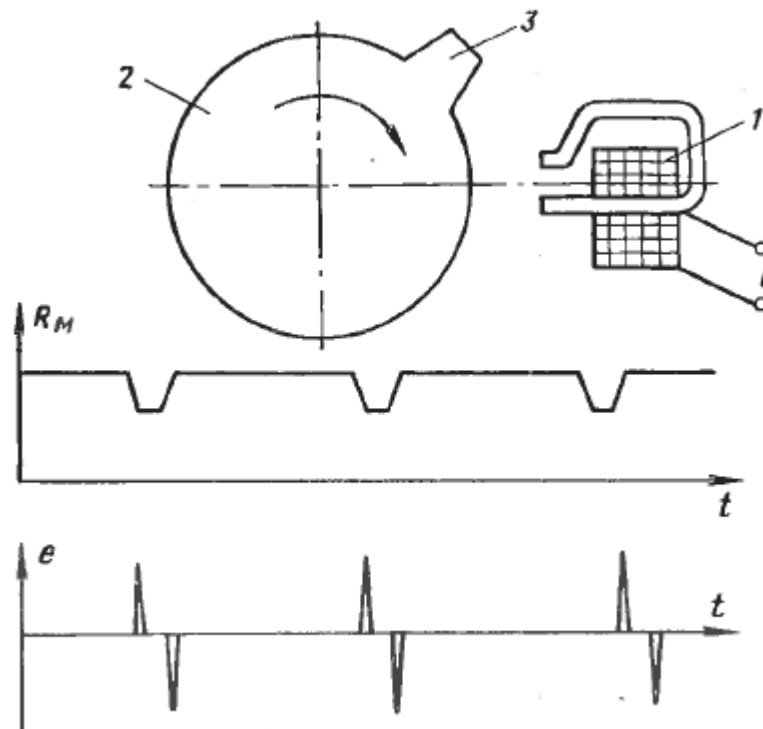


Рис. 9.6 – Принцип действия импульсного индуктивного преобразователя

### Измерение линейной скорости

Под линейной скоростью  $v$  понимается отношение длины (пройденного пути)  $s$  к времени  $t$ :

$$v = s/t$$

Производной единицей линейной скорости согласно Международной системе единиц (СИ) является метр в секунду (м/с). Применяется также единица км/ч.

Это определение аналогично понятию «частота вращения», т. е. количеству оборотов за единицу времени. Поэтому имеется простая возможность измерять линейную скорость путем преобразования линейного движения во вращательное при помощи колеса. Частота вращения этого колеса и измеряемая линейная скорость связаны между собой постоянным, неизменным соотношением. Поэтому можно измерять линейную скорость градуированным в единицах линейной скорости измерителем угловой скорости (частоты вращения).

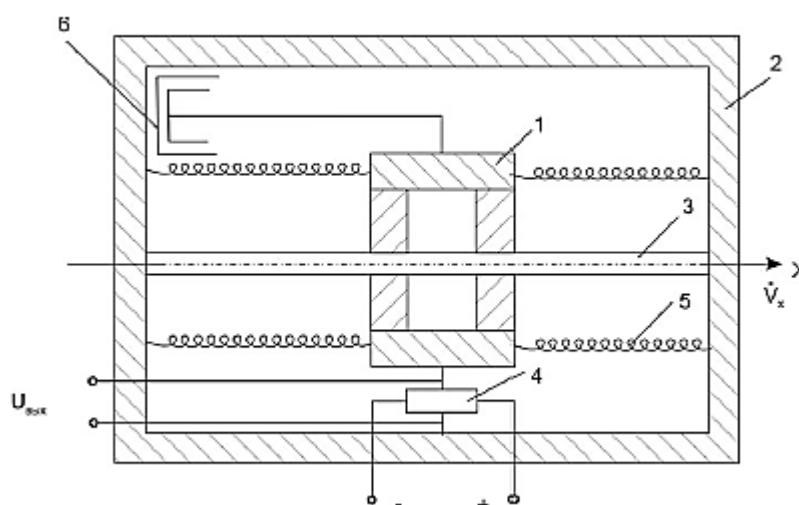
Большинство используемых в промышленности способов измерения линейной скорости основано на этой предпосылке. Например, наблюдение за скоростью ленточных конвейеров, измерение скорости автомобилей, а также измерение скорости схода нитей в текстильной промышленности.



## Измерение линейного ускорения

Акселерометры – это устройства, позволяющие регистрировать линейные ускорения летательного аппарата при движении его на траектории и преобразующие эти ускорения в требуемый электрический сигнал. Сигналы, пропорциональные ускорению, используются для стабилизации и автоматического управления движущимся объектом на траектории. Чувствительным элементом акселерометра является инерционная масса, воспринимающая линейное ускорение движения летательного аппарата.

Принципиальная кинематическая схема акселерометра для измерения линейных ускорений приведена на рис. 24.6.



Акселерометр устанавливается на летательном аппарате (ЛА) таким образом, чтобы ось  $Z$  направляющей инерционной массы  $I$  совпадала с осью  $X$  ЛА, вдоль которой необходимо измерять ускорение  $a_x$ .

Инерционная масса  $I$  может перемещаться относительно корпуса прибора  $2$  по направляющей  $3$  вдоль оси  $X$ . Свобода движения инерционной массы  $I$  относительно корпуса  $2$  ограничена пружинами  $5$ . При отсутствии ускорения ( $a_x = 0$ ) натяжение пружин  $5$  одинаково, и инерционная масса располагается в среднем положении. Во время движения ЛА с ускорением  $a_x$  под действием инерционной силы  $F_x = ma_x$  масса  $I$  перемещается относительно корпуса на величину  $\delta$ . Это перемещение с помощью датчика  $4$  преобразуется в электрический сигнал. Для успокоения колебаний инерционной массы относительно корпуса служит демпфер  $б$ .

В качестве датчика в акселерометрах часто используются дифференциальные индуктивные преобразователи, рассмотренные ранее в данной лекции. Другим вариантом является использование пьезодатчиков.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Общие принципы измерения перемещений, скорости и ускорений.
2. Дифференциальные индуктивные преобразователи.
3. Тахометрические преобразователи.
4. Импульсные преобразователи для измерения угловой скорости.
5. Измерение линейной скорости.
6. Измерение линейного ускорения.

## Лекція № 10

**Тема:** Измерительные мосты**Оглавление**

Общие понятия .....	2
Измерительный мост постоянного тока .....	2
Измерительный мост переменного тока.....	3
Контрольные вопросы по теме .....	6
Уровень модуля.....	6
Уровень курса.....	6

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

### Общие понятия

Важным классом устройств, предназначенных для измерения параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.) методом сравнения, являются мосты. Сравнение измеряемой величины с образцовой мерой, которое производится в процессе измерения при помощи моста, может осуществляться вручную или автоматически, на постоянном или на переменном токе.

### Измерительный мост постоянного тока

В простейшем случае мостовая схема содержит четыре резистора, соединенных в кольцевой замкнутый контур. Такую схему имеет одинарный мост постоянного тока (рис. 10.1). Резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  этого контура называются плечами моста, а точки соединения соседних плеч – вершинами моста. Цепи, соединяющие противоположные вершины, называются диагоналями. Одна из диагоналей (3–4) содержит источник питания  $GB$  а другая (1–2) – указатель равновесия  $PG$ . В случае моста переменного тока его плечи могут включать в себя не только резисторы, но также конденсаторы и катушки индуктивности, т.е. сопротивления могут иметь комплексный характер.

Мост называется уравновешенным, если разность потенциалов между точками 1 и 2 равна нулю, т.е. напряжение на диагонали, содержащей индикатор нуля, отсутствует и ток через индикатор равен нулю.

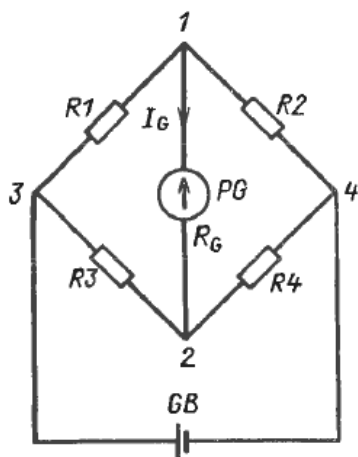


Рис. 10.1

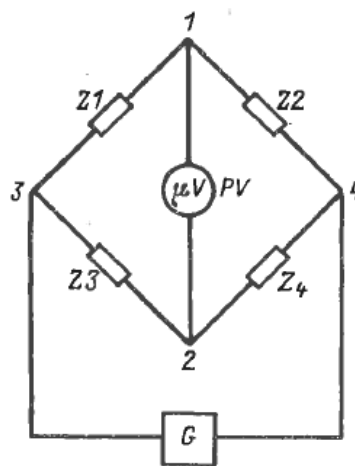


Рис.10.2

Измерительный мост постоянного тока

Измерительный мост переменного тока

Соотношение между сопротивлениями плеч, при котором мост уравновешен, называется условием равновесия моста. Это условие можно получить, используя законы Кирхгофа для расчета мостовой схемы.

Например, для одинарного моста постоянного тока зависимость протекающего через индикатор нуля (гальванометр)  $PG$  тока  $I_G$  от сопротивлений плеч, сопротивления гальванометра и напряжения питания и имеет вид

$$I_G = \frac{U(R_1R_4 - R_2R_3)}{R_G(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)} \quad (10.1)$$

Ток  $I_G = 0$  при

$$R_1R_4 = R_2R_3 \quad (10.2)$$

Это и есть условие равновесия одинарного моста постоянного тока, которое можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы мост был уравновешен, произведения сопротивлений противолежащих плеч должны быть равны. Если сопротивление одного из плеч неизвестно (например,  $R_1 = R_x$ ), то условие (10.2) будет иметь вид

$$R_x = R_2R_3/R_4 \quad (10.3)$$

Таким образом, измерение при помощи одинарного моста можно рассматривать как сравнение неизвестного сопротивления  $R_x$  с образцовым сопротивлением  $R_2$  при сохранении неизменным отношением  $R_3/R_4$ . По этой причине плечо  $R_2$  называют плечом сравнения, плечи  $R_3$  и  $R_4$  – плечами отношения.

### **Измерительный мост переменного тока**

Одинарные мосты могут также работать на переменном токе. В этом случае сопротивления плеч являются комплексными. Обобщенная схема моста переменного тока представлена на рис. 10.2. Индикатором нуля обычно служит электронный милливольтметр. Возможно также использование электронного индикатора нуля на базе электронно-лучевой трубки. Электронные индикаторы имеют очень большое входное сопротивление, что выгодно отличает их от электромеханических устройств, таких, как вибрационный гальванометр или телефонные наушники, которые тоже иногда используются в качестве индикаторов нуля.

Аналогично соотношению (10.2) условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид

$$Z_1Z_4 = Z_2Z_3 \quad (10.4)$$

где  $Z_1, Z_2, Z_3$  и  $Z_4$  – комплексные сопротивления плеч.

Как известно, любое комплексное число  $Z$  можно представить в показательной форме:  $Z = ze^{j\varphi}$ . Используя это представление, получим вместо условия (10.4) равенство

$$z_1 e^{j\varphi_1} z_4 e^{j\varphi_4} = z_2 e^{j\varphi_2} z_3 e^{j\varphi_3}, \quad (10.5)$$

которое справедливо только в том случае, если выполняются вытекающие из него соотношения

$$z_1 z_4 = z_2 z_3 \quad (10.6)$$

и

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (10.7)$$

Условие (10.6), требующее равенства произведений модулей комплексных сопротивлений противоположных плеч, дополняется условием (10.7), налагающим требование равенства сумм их аргументов. Только одновременное выполнение соотношений (10.6) и (10.7) обеспечивает равенство нулю напряжения на диагонали 1–2, в которую включен индикатор нуля  $PV$  (рис. 11).

Условия равновесия можно записать иначе, если воспользоваться не показательной, а алгебраической формой представления комплексных чисел  $Z = R + jX$ , где  $R$  и  $X$  – вещественная и мнимая части соответственно. В нашем случае символом  $Z$  обозначено комплексное сопротивление, а  $R$  и  $X$  представляют собой активную и реактивную составляющие. В алгебраической форме условие (10.4) переписывается в виде

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3) \quad (10.8)$$

Это равенство выполняется, если справедливы равенства для активных и реактивных частей:

$$R_1 R_4 - X_1 X_4 = R_2 R_3 - X_2 X_3 \quad (10.9)$$

и

$$R_1 X_4 - R_4 X_1 = R_2 X_3 - R_3 X_2 \quad (10.10)$$

Вновь требуется одновременное выполнение соотношений (10.9) и (10.10).

Две пары равенств (10.6), (10.7) и (10.9), (10.10) полностью равноправны, и выбор того или другого определяется соображениями удобства при расчетах конкретных мостовых схем. Чтобы обеспечить

выполнение двух условий одновременно, необходимо иметь не менее двух регулируемых элементов. Ими чаще всего являются резисторы и конденсаторы, поскольку они допускают более точную регулировку, чем катушки индуктивности. На практике важно, чтобы мост можно было быстро, с наименьшим числом элементарных операций по регулировке, уравновесить. Число таких операций, необходимых для достижения равновесия, характеризует "сходимость" моста. Правильный выбор регулируемых элементов и их положения в плечах моста обеспечивает наилучшую сходимость, а следовательно, и наименьшее время измерений.

## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Измерительный мост постоянного тока.
2. Измерительный мост переменного тока.



## Лекція № 11

**Тема:** Основные характеристики и уравнения электрического поля. Закон Кулона, электрическое поле, напряженность поля. Теорема Гаусса.

**Оглавление**

Электрический заряд .....	2
Взаимодействие зарядов. Закон Кулона .....	3
Электрическое поле. Напряженность электрического поля.....	4
Суперпозиция полей .....	5
Линии напряженности .....	6
Поток вектора напряженности .....	7
Теорема Гаусса .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля.....	12
Уровень курса.....	14

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5
5. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Электрический заряд

Имеется два вида электрических зарядов, условно называемых положительным и отрицательным. Заряды одного знака отталкиваются, разных знаков — притягивают друг друга.

Электрический заряд является неотъемлемым свойством некоторых элементарных частиц. Заряд всех элементарных частиц (если он не равен нулю) одинаков по абсолютной величине. Его можно назвать элементарным зарядом. Обозначать его мы будем буквой  $e$ . К числу элементарных частиц принадлежат, например, электрон (несущий отрицательный заряд), протон (несущий положительный заряд) и нейтрон (заряд которого равен нулю). Обычно частицы, несущие заряды разных знаков, присутствуют в равных количествах и распределены в теле с одинаковой плотностью. В этом случае алгебраическая сумма зарядов в любом элементарном объеме тела равна нулю, и каждый такой объем (и тело в целом) будет нейтральным. Если каким-либо образом (например, натиранием) создать в теле избыток частиц одного знака (соответственно недостаток частиц другого знака), тело окажется заряженным. Можно также, не изменяя общего количества положительных и отрицательных частиц, вызвать их перераспределение в теле таким образом, что в одной части тела возникнет избыток зарядов одного знака, в другой — противоположного. Это можно осуществить, приблизив к металлическому телу другое заряженное тело.

Поскольку всякий заряд образуется совокупностью элементарных зарядов, он является целым кратным  $e$ :

$$q = \pm Ne \quad (11.1)$$

Однако элементарный заряд настолько мал, что возможную величину макроскопических зарядов можно считать изменяющейся непрерывно. Электрические заряды могут исчезать и возникать вновь. Однако всегда возникают или исчезают одновременно два элементарных заряда противоположных знаков. Поэтому суммарный заряд электрически изолированной системы не может изменяться. Это утверждение носит название закона сохранения электрического заряда.

Единицей заряда в международной системе единиц является кулон (Кл). Элементарный заряд составляет  $e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Если заряженные частицы, например, электроны, могут более или менее свободно перемещаться в пределах тела, то соответствующее вещество способно проводить электрический ток. Единицей силы тока является ампер (А). Если сила тока через некоторое сечение составляет 1 А, то за 1 секунду через это сечение пройдет электрический заряд в 1 кулон.

В соответствии со способностью проводить электрический ток все вещества подразделяются на диэлектрики (или изоляторы), проводники и полупроводники. Идеальных изоляторов в природе не существует. Все вещества хотя бы в ничтожной степени проводят электрический ток. Однако вещества, называемые диэлектриками, проводят ток в  $10^{15}$ – $10^{20}$  раз хуже, чем вещества, называемые проводниками. Полупроводниками называется обширная группа веществ, которые по способности проводить ток заполняют промежуточную область между проводниками и диэлектриками.

### **Взаимодействие зарядов. Закон Кулона**

Наличие у тела электрического заряда проявляется в том, что такое тело взаимодействует с другими заряженными телами. Тела, несущие заряды одинакового знака (или, как говорят, заряженные одноименно), отталкивают друг друга. Тела, заряженные разноименно, притягиваются друг к другу. Закон, которому подчиняется сила взаимодействия так называемых точечных зарядов, был установлен в 1785 г. Кулоном:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (11.2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $q_1$  и  $q_2$  — величины взаимодействующих зарядов,  $r$  — расстояние между ними.

В международной системе единиц  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная (используются также названия: "диэлектрическая постоянная", "электрическая проницаемость вакуума", "диэлектрическая проницаемость вакуума"). Исследования показали, что  $\epsilon_0$  — величина постоянная и ее значение, измеряемое в фарадах на метр, составляет.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (11.3)$$

Таким образом, в системе СИ закон Кулона записывается следующим образом

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (11.4)$$

В случае одноименных зарядов сила, вычисленная по формуле (11.4), оказывается положительной (что соответствует отталкиванию между зарядами). В случае разноименных зарядов сила отрицательна (что соответствует притяжению зарядов друг к другу). Сила взаимодействия двух точечных зарядов величиной 1 кулон каждый, находящихся на расстоянии в 1 метр друг от друга составляет около миллиона тонн.

Зная закон, взаимодействия между точечными зарядами, можно вычислить силу взаимодействия между зарядами, сосредоточенными на телах конечных размеров. Для этого нужно разбить каждый из зарядов на столь малые заряды, чтобы их можно было считать точечными, вычислить по формуле (11.4) силу взаимодействия между зарядами, взятыми попарно, и затем произвести векторное сложение этих сил. Математически эта операция полностью выполняется путем интегрирования по объему.

### Электрическое поле. Напряженность электрического поля

Взаимодействие между зарядами осуществляется через электрическое поле. Всякий заряд изменяет свойства окружающего его пространства — создает в нем электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещенный в какую-либо его точку электрический заряд оказывается под действием силы. Следовательно, для того чтобы выяснить, имеется ли в данном месте электрическое поле, нужно поместить туда заряженное тело (для краткости говорят просто: "заряд") и установить, испытывает оно действие электрической силы или нет. По величине силы, действующей на данный «пробный» заряд, можно судить об «интенсивности» поля.

Если некоторый пробный точечный заряд  $q_{пр}$  поместить в поле, создаваемое точечным зарядом  $q$ , то в соответствии с законом Кулона на него будет действовать сила величиной:

$$F = q_{пр} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \quad (11.5)$$

С учетом не только величины, но и направления действия силы (рис.11.1), в векторной форме можно записать:

$$\vec{F} = q_{пр} \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \right) \vec{R} \quad (11.6)$$

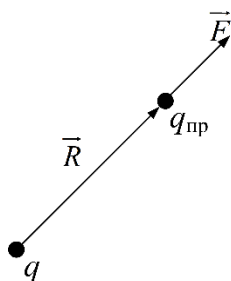


Рис. 11.1 Векторы расстояния и силы

Из формулы (11.6) следует, что сила, действующая на пробный заряд, зависит не только от величин, определяющих поле (от  $q$  и  $\vec{R}$ ), но и от величины пробного заряда  $q_{пр}$ . Если брать разные по величине пробные заряды, то и

силы, которые они испытывают в данной точке поля, будут различны. Однако, отношение  $\frac{F}{q_{np}}$  для всех пробных зарядов будет одно и то же, и оно зависит только от величин от  $q$  и  $r$ , определяющих поле в данной точке. Это отношение и есть та величина, которая характеризует электрическое поле:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{np}} \quad (11.7)$$

Векторную величину (11.7) называют *напряженностью* электрического поля в данной точке. В соответствии с формулой (11.7) напряженность электрического поля численно равна силе, действующей на единичный точечный заряд, находящийся в данной точке поля. Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Как следует из формул (11.6) и (11.7), напряженность поля точечного заряда пропорциональна величине заряда  $q$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  от заряда до данной точки поля:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (11.8)$$

В векторном виде

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{R}}{r} \quad (11.9)$$

Направлен вектор  $\vec{E}$  вдоль радиальной прямой, проходящей через заряд и данную точку поля, от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен.

### Суперпозиция полей

Опыт показывает, что сила, с которой система зарядов действует на некоторый не входящий в систему заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на данный заряд каждый из зарядов системы в отдельности. Отсюда вытекает, что напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum \vec{E}_i \quad (11.10)$$

Последнее утверждение носит название принципа суперпозиции (наложения) электрических полей.

Принцип суперпозиції дозволяє вычислить напруженність поля любой системы зарядов. Разбивая протяженные заряды на достаточно малые доли  $dq$ , любую систему зарядов можно свести к совокупности точечных зарядов. Вклад каждого из таких зарядов в результирующее поле вычисляется по формуле (11.9).

### Линии напряженности

Электрическое поле можно задать, указав для каждой точки величину и направление вектора  $E$ . Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности электрического поля. Линии напряженности проводятся таким образом, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с направлением вектора  $\vec{E}$ . Густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности перпендикулярной к линиям, было равно численному значению вектора  $\vec{E}$ . Тогда по картине линий напряженности можно судить о направлении и величине вектора  $\vec{E}$  в разных точках пространства (рис. 11.2).

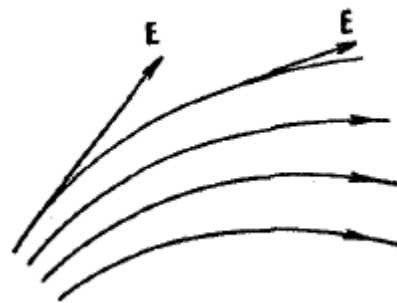


Рис. 11.2 Линии напряженности электрического поля

Линии  $\vec{E}$  одиночного, изолированного точечного заряда представляют собой совокупность радиальных прямых, направленных от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен (рис. 11.3). Линии одним концом опираются на заряд, другим уходят в бесконечность. Линии нигде, кроме заряда, не начинаются и не заканчиваются; они, начавшись на заряде, уходят в бесконечность (заряд положителен), либо, приходя из бесконечности, заканчиваются на заряде (заряд отрицателен). Это свойство линий  $E$  является общим для всех электростатических полей, т. е. полей, создаваемых любой системой неподвижных зарядов: линии напряженности могут начинаться или заканчиваться лишь на зарядах либо уходить в бесконечность.

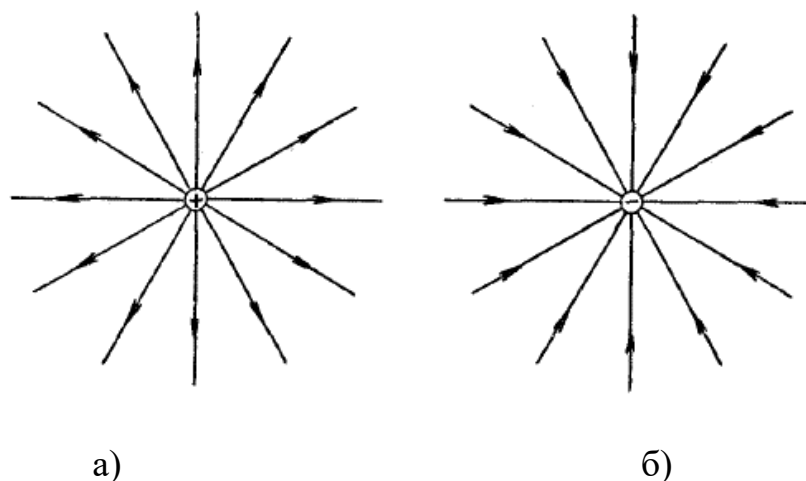


Рис. 11.3 Поле одиночного заряда: а) - положительного, б) - отрицательного

Ниже, на рис. 11.4, показана картина линий  $\vec{E}$  поля **диполя** - совокупности близко расположенной пары одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов.

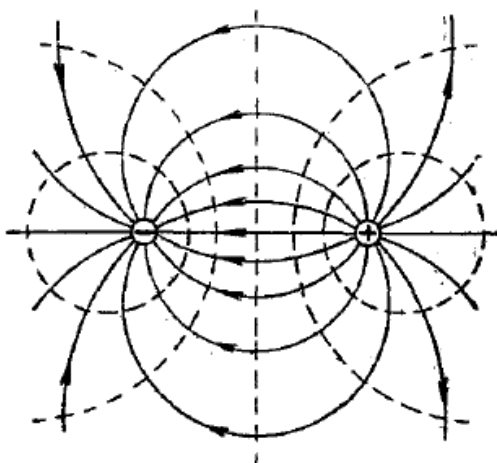


Рис. 11.4 Поле диполя

### Поток вектора напряженности

Введем понятие потока вектора напряженности электрического поля. Поток вектора напряженности электрического поля - это есть число линий напряженности  $\vec{E}$ , пронизывающих некоторую поверхность  $S$ .

Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то тогда поток определяется как произведение величины вектора напряженности  $E$  на площадь поверхности площадки  $S$ :

$$\Phi = ES \quad (11.11)$$

Однако, если при этом условие перпендикулярности не соблюдается, то в формулу добавляется  $\cos \alpha$ , где  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{E}$  и нормалью к поверхности площадки  $\vec{n}$  (рис. 11.5):

$$\Phi = ES \cos \alpha \tag{11.12}$$

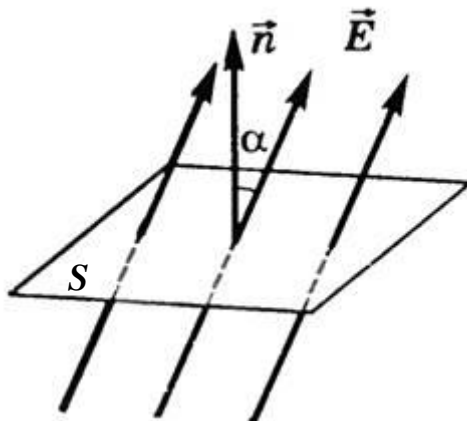


Рис. 11.5 Поток вектора через плоскую поверхность

Формула (11.12), по существу, выражает скалярное произведение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{S}$ , где  $\vec{S}$  – вектор, перпендикулярный рассматриваемой плоской поверхности (по нормали к поверхности  $\vec{n}$ ), величина которого равна площади этой поверхности  $S$ .

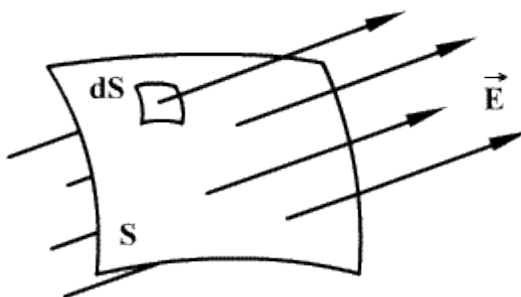


Рис. 11.6 Разбиение поверхности на элементарные участки  $dS$

Рассмотрим поверхность произвольной формы и поток вектора напряженности через такую поверхность. Для того, чтобы вычислить поток вектора через такую поверхность, всю эту поверхность разбивают на бесконечное число бесконечно малых участков  $dS$  (рис. 11.6) и каждому из этих участков приписывают так называемый векторный элемент поверхности  $\vec{dS}$ . Под векторным элементом поверхности в некоторой точке, лежащей на этой поверхности, понимают вектор, направленный перпендикулярно данной поверхности в указанной точке (по нормали); величина этого вектора соответствует бесконечно малой площади, на которую он опирается (фактически, площади точки). Элементарный вектор поверхности обычно



обозначают как  $\vec{dS}$ . Поток вектора через элементарную, бесконечно малую, площадь поверхности представляет собой скалярное произведение двух векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{dS}$ . Тогда полный поток вектора через всю поверхность произвольной формы получаем путем вычисления поверхностного интеграла, рассчитываемого по всей поверхности  $S$ .

$$\Phi = \iint_S \vec{E} \vec{dS} \quad (11.13)$$

Понятие потока вектора напряженности поля играет большую роль в учении об электричестве и магнетизме.

Заметим, что поток (11.13) есть алгебраическая величина, причем знак его зависит от выбора направления нормали к элементарным площадкам, на которые разбивается поверхность  $S$  при вычислении  $\Phi$ . Изменение направления нормали на противоположное изменяет знак у потока  $\Phi$ .

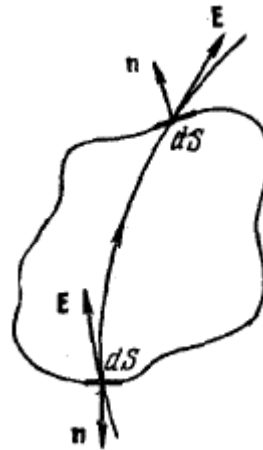


Рис. 11.7 Знак произведения вектора напряженности и нормали к поверхности

В случае замкнутых поверхностей принято вычислять поток, выходящий из охватываемой поверхностью области наружу. Соответственно под нормалью к  $dS$  всегда подразумевается обращенная наружу, т. е. внешняя, нормаль. Поэтому в тех местах, где вектор  $\vec{E}$  направлен наружу (т. е. линия  $\vec{E}$  выходит из объема, охватываемого поверхностью), произведение  $\vec{E} \vec{dS}$  будет положительно; в тех же местах, где вектор  $\vec{E}$  направлен внутрь (т. е. линия  $\vec{E}$  входит в объем, охватываемый поверхностью), произведение  $\vec{E} \vec{dS}$  будет отрицательным (рис. 11.7).

## Теорема Гаусса

Эта теорема может быть сформулирована следующим образом: поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов (рис. 11.8), деленной на  $\varepsilon_0$ :

$$\iint_s \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q_i \quad (11.14)$$

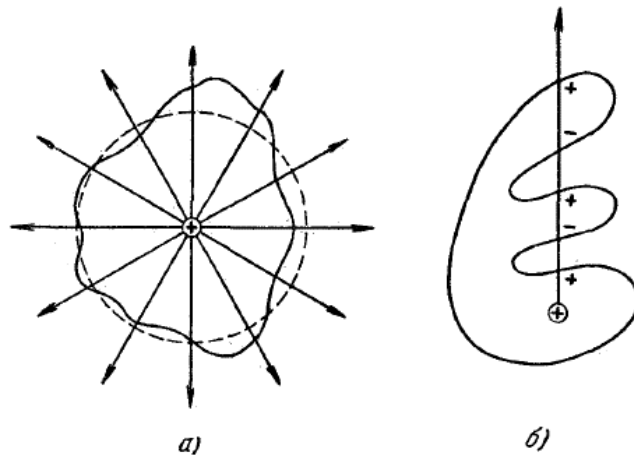


Рис. 11.8 Замкнутая поверхность с заключенными внутри поверхности зарядами

В частности, если внутри поверхности заряды отсутствуют, поток равен нулю. В этом случае каждая линия напряженности поля (создаваемого зарядами, расположенными вне поверхности) пересекает поверхность четное число раз, выходя наружу столько же раз, сколько и входя внутрь (рис. 11.9). В итоге вклад, вносимый в поток каждой из линий, будет равен нулю.

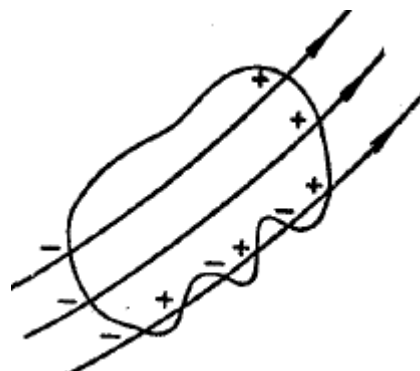


Рис. 11.9 Замкнутая поверхность, не содержащая внутри себя зарядов

Если заряд распределен внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , теорема Гаусса должна быть записана следующим образом:

$$\iint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum \iiint_V \rho dV \quad (11.15)$$

где интеграл справа берется по объему  $V$ , охватываемому поверхностью  $S$ .

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какая элементарная частица несет отрицательный заряд?
2. Какая элементарная частица несет положительный заряд?
3. Какие известные Вам элементарные частицы не несут электрического заряда?
4. Почему физические тела в большинстве случаев электрически нейтральны?
5. Величина заряда физического тела может принимать любое значение?
6. Почему на практике мы не замечаем ступенчатость изменения электрического заряда?
7. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
8. В каких единицах измеряется электрический заряд?
9. В каких единицах измеряется сила тока?
10. Какова связь между единицами измерения заряда и тока?
11. Как разделяются вещества по их способности проводить электрический ток?
12. Какой фактор определяет способность твердого вещества быть проводником электрического тока?
13. Какой факт установил Кулон своими исследованиями?
14. Запишите формулу закона Кулона в международной системе единиц.
15. Какие термины могут применяться для указания на электрическую постоянную?
16. Если величина одного из двух зарядов увеличится в четыре раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
17. Если величина каждого из двух зарядов уменьшится в три раза при сохранении расстояния между ними, как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
18. Если расстояние между зарядами увеличится в два раза при сохранении величины обоих зарядов, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
19. Если изменится полярность обоих зарядов при сохранении величины обоих зарядов и расстояния между ними, то как изменится сила взаимодействия этих зарядов?
20. Можно ли пользоваться формулой закона Кулона для расчета силы взаимодействия между двумя объемными телами?
21. Как на основании закона Кулона для точечных зарядов определить силу взаимодействия между двумя объемными телами?

22. Каким образом проявляет себя электрическое поле?
23. Какую величину называют напряженностью электрического поля?
24. Напряженность электрического поля - это величина векторная или скалярная?
25. Какими двумя параметрами характеризуется напряженность электрического поля в данной точке пространства?
26. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины заряда, порождающего это поле?
27. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от расстояния до заряда, порождающего это поле?
28. Каким образом величина напряженности электрического поля зависит от величины пробного заряда?
29. Как связано направление вектора напряженности электрического поля и знак заряда, порождающего это поле?
30. Как связаны между собой направление вектора напряженности электрического поля и знак пробного заряда?
31. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
32. Как направлены линии напряженности?
33. Как выбирается густота линий напряженности электрического поля?
34. Где начинаются линии напряженности электрического поля?
35. Где заканчиваются линии напряженности электрического поля?
36. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного положительного заряда.
37. Нарисуйте линии напряженности электрического поля одиночного отрицательного заряда.
38. Нарисуйте линии напряженности электрического поля, образуемого диполем.
39. Как можно определить понятие "поток вектора напряженности электрического поля"?
40. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности перпендикулярен поверхности, то как можно рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
41. Если поверхность представляет собой плоскую площадку, а величина напряженности поля в пределах площадки одинакова, и при этом вектор напряженности не перпендикулярен поверхности, то как можно рассчитать поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
42. Что такое векторный элемент поверхности?

43. Какой формулой определяется поток напряженности электрического поля через поверхность произвольной формы?
44. Как выбирается направление нормали для замкнутых поверхностей?
45. Чему равен поток напряженности электрического поля через замкнутую поверхность?
46. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью отдельных зарядов.
47. Сформулируйте теорему Гаусса для случая охвата поверхностью объемно распределенного заряда.
48. Если число зарядов внутри замкнутой поверхности возрастет в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
49. Если объемная плотность заряда внутри замкнутой поверхности в каждой точке уменьшится в четыре раза, то как изменится поток напряженности электрического поля через эту поверхность?
50. Если количество протонов и электронов внутри замкнутой поверхности одинаково, то чему равен поток напряженности электрического поля через эту поверхность?

### ***Уровень курса***

1. Электрический заряд. Закон Кулона.
2. Электрическое поле. Напряженность электрического поля.
3. Суперпозиция полей. Линии напряженности.
4. Поток вектора напряженности электрического поля.
5. Теорема Гаусса для электрического поля.

## Лекція № 12

**Тема:** Поля тел различной формы. Потенциал.

**Оглавление**

Электрические поля заряженных тел различной формы.....	2
Поле бесконечной однородно заряженной плоскости.....	2
Поле двух разноименно заряженных плоскостей.....	3
Поле бесконечного заряженного цилиндра. ....	5
Поле заряженной сферической поверхности. ....	6
Поле объемно заряженной сферы. ....	7
Потенциал .....	8
Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом	10
Эквипотенциальные поверхности .....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля.....	12
Уровень курса.....	14

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
3. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5
5. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Электрические поля заряженных тел различной формы

### *Поле бесконечной однородно заряженной плоскости.*

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной плоскостью, заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ ; для определенности будем считать заряд положительным. Из соображений симметрии вытекает, что напряженность в любой точке поля имеет направление, перпендикулярное к плоскости. В самом деле, поскольку плоскость бесконечна и заряжена однородно (т. е. с постоянной плотностью), нет никаких оснований для того, чтобы сила, действующая на пробный заряд, отклонялась в какую-либо сторону от нормали к плоскости. В симметричных относительно плоскости точках напряженность поля будет одинакова по величине и противоположна по направлению.

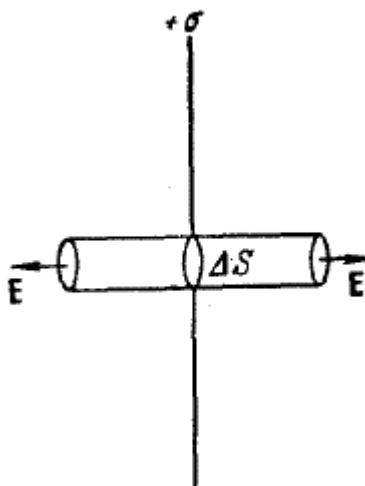


Рис. 12.1 Поверхность для применения теоремы Гаусса

Представим цилиндрическую поверхность с образующими, перпендикулярными к плоскости и основаниями величины  $\Delta S$ , расположенными относительно плоскости симметрично (рис. 12.1). Применим к этой поверхности теорему Гаусса. Поток через боковую часть поверхности будет отсутствовать, так как вектор  $\vec{E}$  направлен вдоль оси цилиндра и линии напряженности не пересекают боковую поверхность цилиндра. Вектор  $\vec{E}$  перпендикулярен основаниям цилиндра, то есть через каждое основание проходит поток величиной  $E\Delta S$ . Таким образом, суммарный поток через всю поверхность цилиндра будет равен  $2E\Delta S$ . Внутри поверхности заключен заряд  $\sigma\Delta S$ . Согласно теореме Гаусса должно выполняться условие:



$$2E\Delta S = \frac{\sigma\Delta S}{\epsilon_0}, \tag{12.1}$$

откуда

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \tag{12.2}$$

Полученный результат не зависит от длины цилиндра. Таким образом, на любых расстояниях от плоскости напряженность поля одинакова по величине. Картина линий напряженности выглядит так, как показано на рис. 12.2. Для отрицательно заряженной плоскости результат будет таким же, лишь направление вектора  $\vec{E}$  и линий напряженности изменится на обратное.

Если взять плоскость конечных размеров, например, заряженную тонкую пластинку, то полученный выше результат будет справедливым лишь для точек, расстояние которых от края пластинки значительно превышает расстояние от самой пластинки (на рис. 12.3 область этих точек обведена пунктирной кривой). По мере удаления от плоскости или приближения к ее краям поле будет все больше отличаться от поля бесконечной заряженной плоскости.

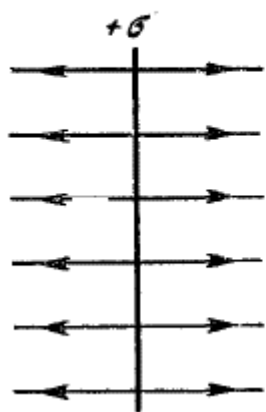


Рис. 12.2

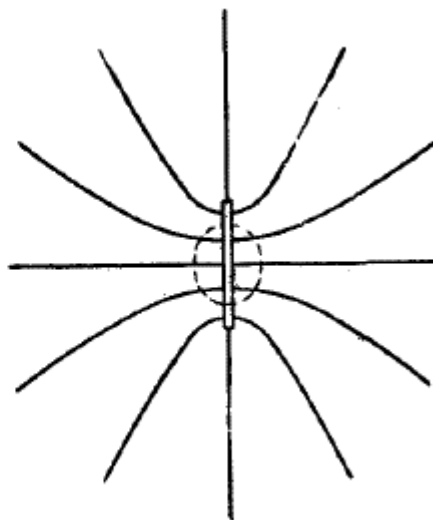


Рис. 12.3

Характер поля на больших расстояниях легко представить, если учесть, что на расстояниях, значительно превышающих размеры пластинки, создаваемое ею поле можно рассматривать как поле точечного заряда.

**Поле двух разноименно заряженных плоскостей.**

Поле двух параллельных бесконечных плоскостей, заряженных разноименно с одинаковой по величине постоянной поверхностной

плотностью  $\sigma$ , можно найти как суперпозицию полей, создаваемых каждой из плоскостей в отдельности. Легко видеть (рис. 12.4), что в области между плоскостями складываемые поля имеют одинаковое направление, так что результирующая напряженность равна

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \tag{12.3}$$

Вне объема, ограниченного плоскостями, складываемые поля имеют противоположные направления, так что результирующая напряженность равна нулю.

Таким, образом, поле оказывается сосредоточенным между плоскостями. Напряженность поля во всех точках этой области одинакова по величине и по направлению. Поле, обладающее такими свойствами, называется однородным. Линии напряженности однородного поля представляют собой совокупность параллельных равноотстоящих прямых.

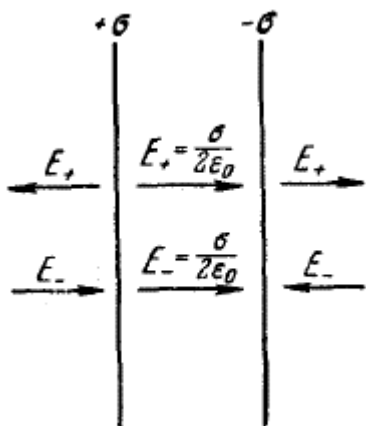


Рис. 12.4



Рис. 12.5

Полученный результат приближенно справедлив и в случае плоскостей конечных размеров, если расстояние между плоскостями значительно меньше их линейных размеров (плоский конденсатор). В этом случае заметные отклонения поля от однородности и значения напряженности от  $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$  наблюдаются только вблизи краев пластин (рис. 12.5).

**Поле бесконечного заряженного цилиндра.**

Рассмотрим поле, создаваемое бесконечной цилиндрической поверхностью радиуса  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ .

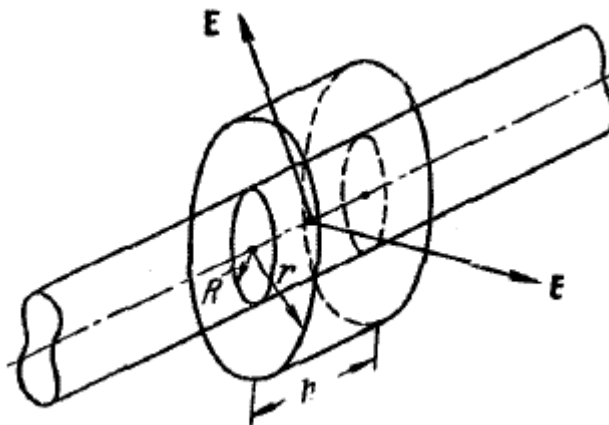


Рис. 12.6 Расчет поля цилиндра

Из соображений симметрии следует, что напряженность поля в любой точке должна быть направлена вдоль радиальной прямой, перпендикулярной к оси цилиндра, а величина напряженности может зависеть лишь от расстояния  $r$  от оси цилиндра. Представим себе мысленно коаксиальную с заряженной поверхностью замкнутую цилиндрическую поверхность радиуса  $r$  и высоты  $h$  (рис. 12.6). Поток через основания этого цилиндра равен нулю, для боковой поверхности  $E = E(r)$  (заряд считаем положительным). Следовательно, поток линий  $\vec{E}$  через эту замкнутую поверхность будет равен  $E(r) \cdot 2\pi r h$ . Если  $r > R$ , внутрь поверхности попадает заряд  $q = \lambda h$ , где  $\lambda$  – линейная плотность заряда. Применяя теорему Гаусса, получаем

$$E(r) \cdot 2\pi r h = \frac{\lambda h}{\varepsilon_0}, \quad (12.4)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\lambda}{r} \quad (r \geq R) \quad (12.5)$$

Если  $r < R$ , рассматриваемая замкнутая поверхность не содержит внутри зарядов, вследствие чего  $E(r) = 0$ .

Таким образом, внутри заряженной цилиндрической поверхности бесконечной длины поле отсутствует. Напряженность поля вне поверхности определяется лишь линейной плотностью заряда  $\lambda$  и расстоянием  $r$  от оси

цилиндра. Поле отрицательно заряженного цилиндра отличается от поля цилиндра, заряженного положительно, только направлением вектора  $\vec{E}$ .

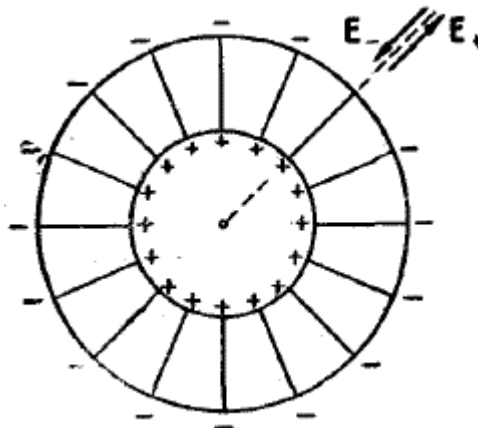


Рис. 12.7 Коаксиальная линия

Из формулы (12.5) следует, что, уменьшая радиус цилиндра  $R$  (при неизменной линейной плотности заряда  $\lambda$ , вблизи поверхности цилиндра можно получить очень сильное поле, т. е. поле с очень большой напряженностью  $E$ .

Учитывая, что  $\lambda = 2\pi R\sigma$ , для напряженности в непосредственной близости от поверхности ( $r = R$ ) в соответствии с (12.5) получаем

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (12.6)$$

С помощью принципа суперпозиции легко найти поле двух коаксиальных цилиндрических поверхностей, заряженных с одинаковой по величине, но отличающейся знаком линейной плотностью  $\lambda$  (рис. 12.7). Внутри меньшего и вне большего цилиндров поле отсутствует. В зазоре между цилиндрами величина напряженности поля определяется формулой (12.5). Это справедливо и для цилиндрических поверхностей конечной длины, если зазор между поверхностями значительно меньше их длины (цилиндрический конденсатор). Заметные отступления от поля поверхностей бесконечной длины будут наблюдаться только вблизи краев цилиндров.

### ***Поле заряженной сферической поверхности.***

Поле, создаваемое сферической поверхностью радиуса  $R$ , заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ , будет, очевидно, отличаться центральной симметрией. Это означает, что направление вектора  $\vec{E}$  в любой точке проходит через центр сферы, а величина напряженности является функцией расстояния  $r$  от центра сферы. Вообразим сферическую поверхность

радиуса  $r$ . Для всех точек этой поверхности  $E = E(r)$ . Если  $r > R$ , внутрь поверхности попадает весь заряд  $q$ , создающий рассматриваемое поле. Следовательно,

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad (12.7)$$

откуда

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (r \geq R) \quad (12.8)$$

Сферическая поверхность радиуса  $r$ , меньшего, чем  $R$ , не будет содержать зарядов, вследствие чего для  $r < R$  получается  $E(r) = 0$ .

Таким образом, внутри сферической поверхности, заряженной с постоянной поверхностной плотностью  $\sigma$ , поле отсутствует. Вне этой поверхности поле имеет такой же вид, как поле точечного заряда той же величины, помещенного в центре сферы.

Заменив в (12.8)  $q$  через  $4\pi R^2\sigma$  и положив  $r = R$ , получим для напряженности поля вблизи заряженной сферической поверхности

$$E(R) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad (12.9)$$

[ср. с формулой (12.6)].

Используя принцип суперпозиции, легко показать, что поле двух концентрических сферических поверхностей (сферический конденсатор), несущих одинаковые по величине и противоположные по знаку заряды  $+q$  и  $-q$ , сосредоточено в зазоре между поверхностями, причем величина напряженности поля в этом зазоре определяется формулой (12.8).

### **Поле объемно заряженной сферы.**

Рассмотрим сферу радиуса  $R$ , заряженную с постоянной объемной плотностью  $\rho$ . Поле такой сферы, очевидно, обладает центральной симметрией. Легко видеть, что для поля вне сферы получается тот же результат [в том числе и формула (12.8)], что и в случае поверхностно заряженной сферы. Однако для точек внутри сферы результат будет иным. В самом деле, сферическая поверхность радиуса  $r$  ( $r < R$ ) заключает в себе заряд, равный  $\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$ .

Следовательно, теорема Гаусса для такой поверхности запишется следующим образом:

$$E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{1}{\varepsilon_0} \rho \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (12.10)$$

откуда, заменяя  $\rho$  через  $\frac{q}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ , получаем

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (r \leq R) \quad (12.11)$$

Таким образом, внутри сферы напряженность поля растет линейно с расстоянием  $r$  от центра сферы. Вне сферы напряженность убывает по такому же закону, как и у поля точечного Заряда.

### Потенциал

Как известно, сила при перемещении тела совершает работу. В случае электрического поля сила, действующая на заряд, зависит от напряженности поля. При перемещении единичного заряда (величина которого равна единице заряда – 1 Кл) по некоторому пути внутри поля, который можно обозначить как кривая  $L$ , совершается работа

$$A = \int_L \vec{E} d\vec{l} \quad (12.12)$$

Важно отметить, что электростатическое поле, то есть поле, создаваемое неподвижными зарядами, является *потенциальным*. Это означает, что работа (12.12) при перемещении заряда вдоль кривой  $L$  зависит только от того, где находится начальная и где находится конечная точки кривой  $L$ , а от конфигурации этой кривой – никак не зависит. В частности, если кривая заканчивается в той же точке, где и начиналась, тогда справедливо равенство

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0 \quad (12.13)$$

Это означает, что работа поля при перемещении заряда по замкнутому контуру (точно также, как и работа внешней силы при перемещении заряда по замкнутому контуру внутри электрического поля) равна нулю.

Если положительную работу при перемещении заряда совершает внешняя сила, то потенциальная энергия заряда возрастает. Если работа, которую выполняет внешняя сила, отрицательна, то потенциальная энергия заряда убывает.

*Потенциалом электрического поля  $\phi$*  в данной точке называется потенциальная энергия единичного заряда, находящегося в этой точке.

Численно потенциал равен работе, которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки в бесконечность. Такую же по величине работу необходимо совершить против сил электрического поля для того, чтобы переместить единичный положительный заряд из бесконечности в данную точку поля. При этом потенциал и работа имеют противоположные знаки

$$\varphi_a = -\int_a^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \quad (12.14)$$

Принято считать, что потенциал электрического поля в бесконечности равен нулю. Можно показать, что потенциал электрического поля, образуемого точечным зарядом  $q_0$  на расстоянии  $r$  от этого заряда

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r} \quad (12.15)$$

Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то работа, совершаемая полем при перемещении единичного положительного заряда из точки  $a$  в точку  $b$  равна разности потенциалов поля в этих двух точках

$$A = \varphi_a - \varphi_b \quad (12.16)$$

Если заряд, на который действует поле не единичный, и его величина равна  $q$ , тогда работа равна

$$A = q(\varphi_a - \varphi_b) \quad (12.17)$$

Следовательно, работа по удалению заряда  $q$  из точки  $a$  в бесконечность равна

$$A = q\varphi_a \quad (12.18)$$

Если имеется несколько зарядов, которые в совокупности образуют электрическое поле, тогда потенциал поля, создаваемого системой зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым из зарядов в отдельности. В то время как напряженности поля складываются при наложении полей векторно, потенциалы складываются алгебраически. По этой причине вычисление потенциалов оказывается обычно гораздо проще, чем вычисление напряженностей электрического поля.

## Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом

Поскольку в соответствии с (12.14) потенциал представляет собой интеграл от напряженности, взятый по кривой, то напряженность поля, соответственно, равна производной от потенциала по участку кривой

$$\vec{E} = -\frac{d\varphi}{d\vec{l}} \quad (12.19)$$

Через  $\vec{l}$  и соответственно  $d\vec{l}$  обозначено произвольно выбранное направление в пространстве. Если перейти к проекциям  $\vec{E}$  и  $d\vec{l}$  на оси координат, то получаем

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (12.20)$$

откуда

$$\vec{E} = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z = -\left(\vec{i}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) \quad (12.21)$$

Выражение, находящееся в скобках, называется градиентом скаляра. В рассматриваемом случае это градиент скаляра  $\varphi$  и обозначается  $\text{grad } \varphi$  или  $\nabla\varphi$ . Используя понятие градиента, можно записать

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (12.22)$$

## Эквипотенциальные поверхности

Для наглядного изображения поля можно вместо линий напряженности воспользоваться поверхностями равного потенциала или эквипотенциальными поверхностями. Как следует из ее названия, эквипотенциальная поверхность – это такая поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

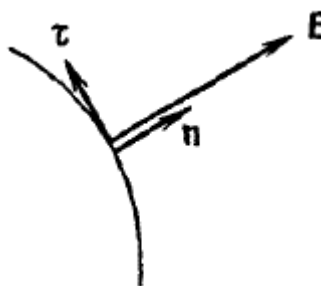


Рис. 12.8



Направление нормали к эквипотенциальной поверхности будет совпадать с направлением вектора  $\vec{E}$  в той же точке. Соответственно, линии напряженности в каждой точке ортогональны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальную поверхность можно провести через любую точку поля. Следовательно, таких поверхностей может быть построено бесконечное множество. Условливаются, однако, проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов  $\varphi_{i+1} - \varphi_i$  для двух соседних поверхностей была всюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине напряженности поля. Действительно, чем гуще располагаются эквипотенциальные поверхности, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении вдоль нормали к поверхности. Следовательно, тем больше в данном месте  $\text{grad}\varphi$ , а значит и  $\vec{E}$ .

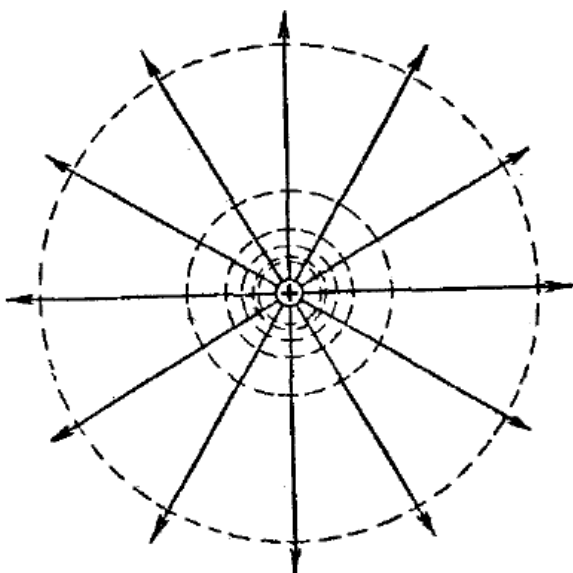


Рис. 12.9

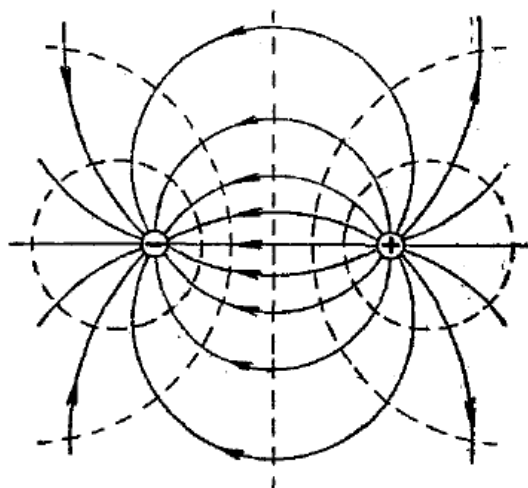


Рис. 12.10

На рис. 12.9 показаны эквипотенциальные поверхности (точнее, их пересечения с плоскостью чертежа) для поля точечного заряда. В соответствии с характером изменения  $\vec{E}$  эквипотенциальные поверхности при приближении к заряду становятся гуще.

Для однородного поля эквипотенциальные поверхности, очевидно, представляют собой систему равноотстоящих друг от друга плоскостей, перпендикулярных к направлению поля.

На рис. 12.10 изображены эквипотенциальные поверхности и линии напряженности для поля диполя. Из рис. 12.9 и 12.10 видно, что при одновременном использовании и эквипотенциальных поверхностей, и линий напряженности картина поля получается особенно наглядной.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной бесконечной пластины.
2. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательно заряженной бесконечной пластины.
3. Запишите формулу, связывающую плотность электрического заряда бесконечной пластины и величину напряженности электрического поля, создаваемого этой пластиной.
4. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженной пластины конечных размеров.
5. Нарисуйте, как выглядит электрическое поле пластины конечных размеров на расстояниях, значительно превышающих размеры пластины.
6. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительного точечного заряда.
7. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля отрицательного точечного заряда.
8. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля диполя.
9. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда бесконечными пластинами.
10. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами конечных размеров.
11. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя противоположно заряженными с одинаковой величиной плотности заряда пластинами на расстояниях, с которых пластины могут рассматриваться как точки.
12. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля между двумя противоположно заряженными бесконечными пластинами с поверхностной плотностью заряда этих пластин.
13. Запишите формулу, связывающую значение напряженности электрического поля за пределами двух противоположно заряженных бесконечных пластин с поверхностной плотностью заряда этих пластин.

14. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля положительно заряженного бесконечного полого цилиндра.
15. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженного бесконечного полого цилиндра.
16. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженного бесконечного полого цилиндра.
17. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженного бесконечного полого цилиндра.
18. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя заряженными бесконечными полыми цилиндрами.
19. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля за пределами внешнего из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
20. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля в пространстве, которое ограничено внутренним из двух противоположно заряженных бесконечных полых цилиндров.
21. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля снаружи заряженной бесконечной полый сферы.
22. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля внутри заряженной бесконечной полый сферы.
23. Запишите формулу для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности заряженной бесконечной полый сферы.
24. Нарисуйте, как направлены линии напряженности электрического поля, образованного двумя полыми сферами.
25. Сравните формулы для значения напряженности электрического поля вблизи поверхности бесконечной пластины, вблизи поверхности бесконечного полого цилиндра и вблизи поверхности полый сферы. Как бы Вы объяснили сходство и различие этих формул?
26. Внутри какого конденсатора более высокая напряженность электрического поля: составленного из двух пластин, составленного из двух цилиндров, составленного из двух сфер?
27. Какой формулой выражается работа, совершаемую полем при перемещении единичного заряда вдоль кривой  $L$ ?
28. Чему равна работа электрического поля при перемещении электрического заряда по замкнутой кривой?
29. В чем состоит характерная особенность поля, которое является потенциальным?
30. Почему электрическое поле называют потенциальным?

31. Что называется потенциалом электрического поля?
32. Чему численно равен потенциал электрического поля в данной точке?
33. Чему равен потенциал электрического поля в бесконечности? Как установлено это значение?
34. Как через потенциал выразить работу поля по перемещению заряда величиной  $q$  из точки  $a$  в точку  $b$ ?
35. Как получить потенциал электрического поля, образованного несколькими зарядами, в некоторой точке, если известны потенциалы полей, создаваемых каждым из этих зарядов в отдельности, в данной точке?
36. Как связаны напряженность и потенциал электрического поля в данной точке?
37. Что называют эквипотенциальной поверхностью?
38. Как связано направление вектора напряженности электрического поля в данной точке с формой эквипотенциальной поверхности в этой точке?
39. На каком расстоянии друг от друга на рисунке обычно проводят линии эквипотенциальных поверхностей?
40. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного точечным зарядом.
41. Нарисуйте эквипотенциальные линии электрического поля, образованного диполем.

### **Уровень курса**

1. Электрическое поле бесконечной однородно заряженной пластины. Поле двух разноименно заряженных пластин.
2. Электрическое поле бесконечного заряженного цилиндра.
3. Электрическое поле заряженной сферической поверхности. Поле объемно заряженной сферы.
4. Потенциал электрического поля.
5. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом.
6. Эквипотенциальные поверхности.

## Лекція № 13

**Тема:** Электрическое поле в диэлектрике. Сегнетоэлектрики. Электрет. Пьезоэлектрики.

**Оглавление**

Электрическое поле в диэлектриках .....	2
Полярные и неполярные молекулы.....	2
Диполь в однородном электрическом поле.....	3
Поляризация диэлектриков .....	4
Описание поля в диэлектрике.....	6
Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков.....	7
Сегнетоэлектрики.....	8
Электрет .....	9
Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.....	10
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля.....	12
Уровень курса.....	14

**Источники:**

1. ДЕРЖАВНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ ДСТУ 3396.2—07. ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. ТЕХНІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ. Терміни та визначення.
2. Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов / Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под ред. А.П. Зайцева и А.А. Шелупанова. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Электрическое поле в диэлектриках

### Полярные и неполярные молекулы

Если диэлектрик внести в электрическое поле, то это поле и сам диэлектрик претерпевают существенные изменения. Чтобы понять, почему это происходит, нужно учесть, что в составе атомов и молекул имеются положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. Электроны движутся в пределах атома или молекулы с огромной скоростью, непрерывно изменяя свое положение относительно ядер. Поэтому действие каждого электрона на внешние заряды будет примерно таким, как если бы он находился в покое в некоторой точке, полученной усреднением положения электрона по времени. Эту точку условно можно назвать "центром тяжести" электрона.

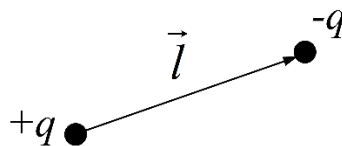


Рис. 4.1

В отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы вещества могут либо совпадать, либо могут быть сдвинутыми друг относительно друга. В последнем случае молекула эквивалентна электрическому диполю и называется *полярной*. Напомним, что диполь - это совокупность близко расположенных двух одинаковых по величине, но разных по знаку точечных зарядов  $+q$  и  $-q$  (рис. 4.1). Полярная молекула обладает собственным электрическим моментом  $\vec{p}$ :

$$\vec{p} = q\vec{l}, \quad (4.1)$$

где  $q$  - суммарный заряд всех сдвинутых внутри молекулы положительных элементарных зарядов, который равен сумме всех сдвинутых внутри молекулы отрицательных элементарных зарядов,  $\vec{l}$  - вектор, соединяющий центры тяжести всей совокупности смещенных положительных и всей совокупности смещенных отрицательных элементарных зарядов молекулы. При этом, несмотря на наличие электрического момента, молекула по своему электрическому заряду остается нейтральной.

Молекула, у которой центры тяжести зарядов разных знаков в отсутствие поля совмещены ( $l = 0$ ), собственным электрическим моментом не обладает. Такая молекула называется *неполярной*. Однако, под действием

внешнего электрического поля заряды в неполярной молекуле смещаются друг относительно друга: положительные по направлению поля, отрицательные против поля. В результате молекула приобретает электрический момент, величина которого, как показывает опыт, пропорциональна напряженности поля. Коэффициент пропорциональности записывают в виде  $\epsilon_0\beta$ , где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, а  $\beta$  – величина, называемая *поляризуемостью молекулы*. Учитывая, что направления  $\vec{p}$  и  $\vec{E}$  совпадают, можно написать

$$\vec{p} = \beta\epsilon_0\vec{E} \quad (4.2)$$

Процесс поляризации неполярной молекулы протекает так, как если бы положительные и отрицательные заряды молекулы были связаны друг с другом упругими силами. Поэтому говорят, что неполярная молекула ведет себя во внешнем поле как упругий диполь.

Действие внешнего поля на полярную молекулу сводится в основном к стремлению повернуть молекулу так, чтобы ее электрический момент установился по направлению поля. На величину электрического момента внешнее поле практически не влияет. Следовательно, полярная молекула ведет себя во внешнем поле как жесткий диполь.

Поскольку молекулы по электрическим свойствам эквивалентны диполям, для понимания явлений в диэлектриках нужно знать, как ведет себя диполь во внешнем электрическом поле.

### **Диполь в однородном электрическом поле**

Если диполь поместить в однородное электрическое поле, образующие диполь заряды  $+q$  и  $-q$  окажутся под действием равных по величине, но противоположных по направлению сил  $f_1$  и  $f_2$  (рис. 4.2). Эти силы образуют пару, плечо которой зависит от ориентации диполя относительно поля и равно  $l \sin \alpha$ .

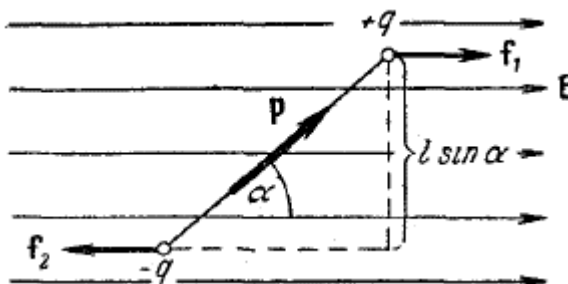


Рис. 4.2

Модуль каждой из сил равен  $qE$ . Умножив его на плечо, получим величину момента пары сил, действующих на диполь:

$$M = qEl \sin \alpha = pE \sin \alpha \quad (4.3)$$

где  $p$  – электрический момент диполя.

Формула (4.3), очевидно, может быть написана в векторном виде

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (4.4)$$

Момент сил (4.4) стремится повернуть диполь так, чтобы его электрический момент  $\vec{p}$  установился по направлению поля.

### **Поляризация диэлектриков**

В отсутствие внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика или равны нулю (неполярные молекулы), или распределены по направлениям в пространстве хаотическим образом (полярные молекулы). В обоих случаях суммарный электрический момент диэлектрика равен нулю. Под действием внешнего поля диэлектрик поляризуется. Это означает, что результирующий электрический момент диэлектрика становится отличным от нуля. В качестве величины, характеризующей степень поляризации диэлектрика, естественно взять электрический момент единицы объема. Если поле или диэлектрик (или оба они) неоднородны, степень поляризации в разных точках диэлектрика будет различна. Чтобы охарактеризовать поляризацию в данной точке, нужно выделить заключающий в себе эту точку физически бесконечно малый объем  $\Delta V$ , найти сумму  $\sum_{\Delta V} \vec{p}_i$  моментов, заключенных в этом объеме молекул, и взять отношение

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V} \quad (4.5)$$

Величина  $\vec{P}$ , определяемая формулой (4.5), называется *вектором поляризации диэлектрика*. У диэлектриков любого типа вектор поляризации связан с напряженностью поля в той же точке простым соотношением

$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.6)$$

где  $\chi$  – безразмерная, не зависящая от  $\vec{E}$  величина, называемая *диэлектрической восприимчивостью диэлектрика*. В то же время размерность



вектором поляризації діелектрика  $\vec{P}$  і напруженності електричного поля  $\vec{E}$  совпадають.

По суті, вектор поляризації характеризує додаткове електричне поле, виникає всередині діелектрика під дією зовнішнього електричного поля. Поляризовані під дією зовнішнього поля молекули вистраиваються таким чином, щоб негативна сторона молекули була направлена в сторону позитивного заряду, породжуючого зовнішнє поле, а позитивна сторона – відповідно до негативному заряду. Вектор  $\vec{P}$ , як уже було показано вище (4.5), – це усереднене по об'єму, середнє значення електричних моментів молекул-діполів в одиниці об'єму речовини діелектрика. Якщо дуже умовно представити цю одиницю об'єму речовини в формі деякого диполя, заряди якого розташовані по краях цього об'єму і розташовані на одній і тій же лінії напруженності, то ми побачимо, що ці два заряди диполя створюють власне електричне поле  $\vec{E}'$ , яке направлено проти зовнішнього  $\vec{E}_0$  (рис. 4.3).

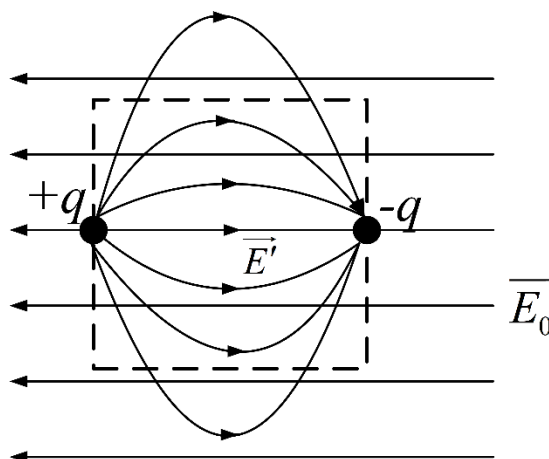


Рис. 4.3

То є, суммарне, діює всередині діелектрика електричне поле  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  є слабше, ніж зовнішнє поле, так як  $\vec{E}_0$  і  $\vec{E}'$  завжди направлено в протилежні сторони, зустрічно. Можна сказати і по-іншому: діює всередині діелектрика електричне поле завжди слабше того поля, яке діяло б, якби в цьому місці був вакуум, а не діелектрик. Таким чином, поляризація діелектриків призводить до ослаблення електричного поля. В фізиці встановлено, що величина, на яку ослабляється поле, дорівнює величині вектора поляризації діелектрика  $\vec{P}$ .

### Описание поля в диэлектрике

Введем понятие электрического смещения.

*Электрическим смещением* называется величина, определяемая соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4.7)$$

В вакууме, где отсутствует поляризация, смещение и напряженность электрического поля равны с точностью до множителя  $\varepsilon_0$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (4.8)$$

Электрическое смещение также иногда называют "электрической индукцией".

Очень важно отметить, что величина  $\vec{D}$  не зависит от того, где распространяется электрическое поле: в вакууме или в диэлектрике. В то время как напряженность зависит. Величина смещения напрямую связана с зарядом, который продуцирует электрическое поле и ни с чем другим. Эта связь определяется теоремой Гаусса для общего случая, охватывающего как вакуум, так и диэлектрики:

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum q_i \quad (4.9)$$

Формула (4.9) выражает **теорему Гаусса** для вектора электрического смещения: *поток вектора электрического смещения через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных зарядов.*

Если свободные заряды распределены внутри замкнутой поверхности непрерывно с объемной плотностью  $\rho$ , то формула (4.9) видоизменяется следующим образом:

$$\iint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum \iiint_V \rho dV \quad (4.10)$$

В вакууме  $\vec{P} = 0$ , а  $\vec{D}$  определяется выражением (4.8). Тогда формулы (4.9) и (4.10) переходят в формулы (2.14) и (2.15) из лекции №2.

Подставив в формулу (4.7) выражение (4.6) для  $\vec{P} = 0$ , получим

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (4.11)$$

Безразмерную величину

$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (4.12)$$

называют *относительной диэлектрической проницаемостью* или просто *диэлектрической проницаемостью среды*. Следовательно, соотношение (4.11) можно записать в виде

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (4.13)$$

Это самое простое и в то же время фундаментальное соотношение между векторами  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ , на основе которого описывается электрическое поле в общем случае: и в вакууме, и внутри диэлектрического вещества. Очевидно, что для вакуума  $\varepsilon = 1$ .

Единицей электрического смещения служит кулон на квадратный метр (Кл/м<sup>2</sup>).

Величину

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon \quad (4.14)$$

называют абсолютной диэлектрической проницаемостью среды. Очевидно, что абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума  $\varepsilon_a = \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

### **Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков**

<i>Твердые тела</i>		
Вещество	$\rho$ , Ом·см	$\varepsilon$
Бакелит	$10^{13} - 10^{14}$	4,5
Битум	$10^{15} - 10^{16}$	2,5–3
Бумага сухая	$10^{13} - 10^{14}$	2–2,5
Гетинакс	$10^{10} - 10^{11}$	5–6
Каучук	$10^{16}$	2,4
Кварц	$10^{14} - 10^{15}$	3,5–4,5
Керамика конденсаторная	$10^{11}$	10–200
Метатитанат бария	-	2000
Парафин	$3 \cdot 10^{18}$	2–2,3
Плексиглас (оргстекло)	$10^{13}$	3,5
Полистирол	$10^{17} - 10^{19}$	2,4–2,6

Полихлорвинил	$10^{16}$	3
Полиетилен	$10^{16}$	2,3–2,4
Сегнетова соль	-	500
Слюда	$10^{16}$	5,7–7
Стекло	$10^8–10^{17}$	4–16
Текстолит	$10^9–10^{10}$	-
Фарфор	$10^{15}$	4,5–4,7
Шеллак	$10^{15}–10^{16}$	3,5
Эбонит	$10^{15}–10^{16}$	2,5–3
Янтарь	$10^{17}–10^{20}$	2,8
<i>Жидкости</i>		
Бензин	$10^{12}$	2
Вода дистиллированная	$10^5–10^6$	81
Масло вазелиновое	$10^{16}$	2
Масло касторовое	$10^{11}$	4,6–4,8
Масло трансформаторное	$10^{12}–10^{15}$	2,2
Скипидар	$10^{13}$	2,2
Спирт этиловый	$10^6–10^7$	27
<i>Газы (760 мм рт. ст.)</i>		
Азот	-	1,00054
Воздух (сухой)	$10^{16}–10^{17}$ (в очень слабых полях)	1,00025
Гелий	-	1,00007
Кислород	-	1,00055
Углекислый газ	-	1,0009

### Сегнетоэлектрики

Существует группа веществ, которые могут обладать спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в отсутствие внешнего поля. Это явление было открыто первоначально для сегнетовой соли, в связи с чем все подобные вещества получили название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом характерных особенностей:

1. В то время как у обычных диэлектриков  $\epsilon$  составляет несколько единиц, достигая в виде исключения нескольких десятков (у воды, например,  $\epsilon = 81$ ), диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков бывает порядка нескольких тысяч.

2. Зависимость  $D$  от  $E$  не является линейной, следовательно, диэлектрическая проницаемость оказывается зависящей от напряженности поля (ветвь 1 на кривой рис. 4.4).

3. При изменениях поля значения вектора поляризации  $P$  (а следовательно, и  $D$ ) отстают от напряженности поля  $E$ , в результате чего  $P$  и  $E$  определяются не только величиной  $E$  в данный момент, но и предшествующими значениями  $E$ , т. е. зависят от предыстории диэлектрика. Это явление называется гистерезисом (от греческого «гистерезис» — запаздывание). При циклических изменениях поля зависимость  $P$  от  $E$  следует изображенной на рис. 4.4 кривой, называемой петлей гистерезиса.

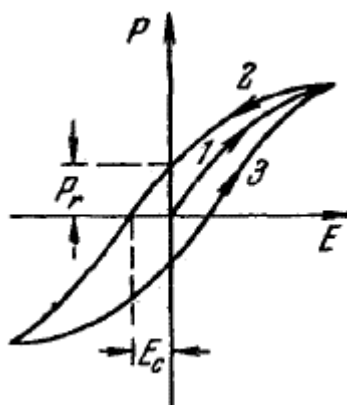


Рис. 4.4

Поведение поляризации сегнетоэлектриков аналогично поведению намагничения ферромагнетиков (о которых речь пойдет в последующих лекциях). По этой причине сегнетоэлектрики иногда называют ферроэлектриками.

Для каждого сегнетоэлектрика имеется температура, выше которой вещество утрачивает необычные свойства и становится нормальным диэлектриком. Эта температура называется точкой Кюри. Сегнетова соль имеет две точки Кюри: при  $-15^{\circ}\text{C}$  и  $+22,5^{\circ}\text{C}$ , причем она ведет себя как сегнетоэлектрик лишь в температурном интервале, ограниченном указанными значениями. При температуре ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  и выше  $+22,5^{\circ}\text{C}$  электрические свойства сегнетовой соли обычны.

Очень важное практическое значение имеет другой открытый сегнетоэлектрик — метатитанат бария, точка Кюри которого равна  $125^{\circ}\text{C}$ .

## Электрет

Электрет – диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к

поляризації (или заряджению) этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле.

### Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект

Некоторые кристаллы, не имеющие центра симметрии (в том числе все сегнетоэлектрики), при деформации поляризуются. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом или просто пьезоэлектрическим эффектом. Величина поляризации пропорциональна деформации, а, следовательно, в пределах упругости и механическому напряжению. При изменении знака деформации знак поляризации меняется также на обратный.

Важнейшими пьезоэлектриками (т. е. пьезоэлектрическими кристаллами) являются кварц, сегнетова соль, метатитанат бария и др.

Кристаллы кварца принадлежат к гексагональной системе. Если вырезать из кристалла кварца пластинку, перпендикулярную к кристаллографической оси  $a$ , и подвергнуть ее сжатию вдоль этой оси, то на гранях пластинки появляются связанные заряды (на рис. 4.5 пластинка расположена так, что кристаллографическая ось  $c$  направлена на нас). То же самое происходит, если пластинку подвергнуть растяжению вдоль оси  $OO$ , перпендикулярной к кристаллографическим направлениям  $a$  и  $c$ . В последнем случае эффект называют поперечным, в первом случае — продольным. При изменении знака деформации (т.е. при растяжении вдоль  $a$  или сжатии вдоль  $OO$ ) на гранях пластинки появляются связанные заряды другого знака. Для практического использования пьезоэлектрического эффекта на грани пластинки накладывают металлические обкладки. Если эти обкладки включить в замкнутую цепь, то при изменениях деформации кристалла в цепи будут возникать импульсы тока. Такие процессы протекают, например, в пьезоэлектрическом микрофоне — знакопеременная деформация пластинки под действием звуковой волны преобразуется в переменный ток той же частоты.

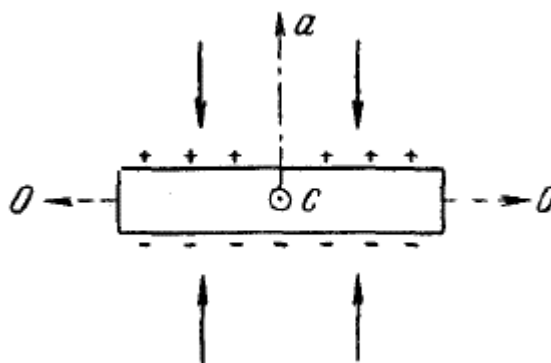


Рис 4.5

Наряду с описанным выше прямым эффектом, у пьезоэлектрических кристаллов наблюдается обратный эффект, заключающийся в том, что поляризация под действием электрического поля сопровождается механическими деформациями кристалла. Таким образом, если на металлические обкладки изображенной на рис. 4.5 пластинки подать переменное электрическое напряжение, то пластинка будет попеременно, растягиваться и сжиматься вдоль оси  $a$  (одновременно происходят сжатие и растяжение вдоль оси  $OO$ ), т. е. в ней возбуждятся механические колебания. Эти колебания станут особенно интенсивными, если частота переменного напряжения совпадает с собственной (резонансной) частотой пластинки.

Такие настроенные в резонанс пьезоэлектрические пластинки используются для возбуждения ультразвуковых волн, для стабилизации частоты генераторов электрических колебаний в радиотехнике и т. п.

## Контрольные вопросы по теме

---

### Уровень модуля

1. Какую молекулу называют полярной?
2. Какую молекулу называют неполярной?
3. Что называется диполем?
4. Что называют электрическим моментом диполя?
5. Как неполярные молекулы приобретают электрический момент?
6. Как связан электрический момент, приобретаемый неполярной молекулой в электрическом поле и напряженность этого поля?
7. Какую величину называют поляризуемостью молекулы?
8. Почему по отношению к неполярным молекулам применяют термин "упругий диполь"?
9. По отношению к каким молекулам применяется понятие "жесткий диполь"? Почему?
10. Приведите формулу, которая связывает момент пары сил, действующих на заряды диполя в электрическом поле, электрический момент диполя и напряженность электрического поля, вызывающего этот момент сил.
11. В каком направлении вращает диполь момент сил в электрическом поле?
12. Какой формулой можно выразить электрический момент единицы объема вещества диэлектрика в данной точке?
13. Какую величину называют вектором поляризации диэлектрика?
14. Каким образом связаны электрический момент единицы объема вещества диэлектрика и вектор поляризации диэлектрика?
15. Как в диэлектрике связаны вектор поляризации и вектор напряженности электрического поля в данной точке?
16. Какую величину называют диэлектрической восприимчивостью диэлектрика?
17. Поляризация диэлектрика приводит к усилению или ослаблению электрического поля?
18. По отношению к внешнему полю электрическое поле, возникающее вследствие поляризации диэлектрика, имеет направление:  
а) произвольное направление; б) под прямым углом;  
в) противоположное направление; г) то же направление, что и внешнее поле; д) электрическое поле вследствие поляризации диэлектрика не возникает?
19. Насколько, на какую величину ослабляется электрическое поле внутри диэлектрика вследствие его поляризации?



20. Как связаны векторы электрического смещения, напряженности и поляризации?
21. Как связаны векторы электрического смещения и напряженности в вакууме?
22. Каким образом величина электрического смещения от зависит от среды распространения электрического поля?
23. Зависит ли величина напряженности от свойств среды распространения электрического поля?
24. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
25. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора электрического смещения.
26. Запишите формулу, выражающую теорему Гаусса для вектора электрического смещения в случае наличия объемного заряда.
27. Какую величину называют относительной диэлектрической проницаемостью?
28. Какую величину называют диэлектрической проницаемостью среды?
29. Какое соотношение связывает электрическое смещение, напряженность электрического поля и относительную диэлектрическую проницаемость среды?
30. Чему равна относительная диэлектрическая проницаемость вакуума?
31. Чему равна абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума? Чему она равна численно?
32. В каких пределах находится значение относительной диэлектрической проницаемости обычных диэлектриков в твердом состоянии?
33. Какие жидкости отличаются высокой относительной диэлектрической проницаемостью?
34. Сколько единиц составляет относительная диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды?
35. Как можно охарактеризовать величину относительной диэлектрической проницаемости газов?
36. Какое явление характерно для поляризации сегнетоэлектриков?
37. Какова диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков?
38. Нарисуйте зависимость величины поляризации от напряженности электрического поля для сегнетоэлектриков.
39. Что называют точкой Кюри для сегнетоэлектриков?
40. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к сегнетоэлектрикам.
41. В чем состоит прямой пьезоэлектрический эффект?
42. В чем состоит обратный пьезоэлектрический эффект?
43. Назовите известные Вам вещества, относящиеся к пьезоэлектрикам.

44. В каком случае у пьезоэлектриков возникает резонанс?

45. Как на практике используются резонансные явления в пьезоэлектриках?

46. Какое вещество называют электрет?

### ***Уровень курса***

1. Полярные и неполярные молекулы диэлектрика. Диполь в однородном электрическом поле.
2. Поляризация диэлектриков.
3. Описание электрического поля в диэлектрике.
4. Свойства сегнетоэлектриков и электретов.
5. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект.

## Лекція № 14

**Тема:** Проводники в электрическом поле**Оглавление**

Проводники в электрическом поле .....	1
Равновесие зарядов на проводнике .....	2
Проводник во внешнем электрическом поле .....	4
Электрическая емкость.....	5
Конденсаторы .....	6
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	9

**Источники:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.

## Проводники в электрическом поле

### Равновесие зарядов на проводнике

Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому равновесие зарядов на проводнике может наблюдаться лишь при выполнении следующих условий (рис. 5.1):

1. Напряженность поля всюду внутри проводника должна быть равна нулю

$$E = 0 \quad (5.1)$$

Это означает, что потенциал внутри проводника должен быть постоянным ( $\varphi = const$ ).

2. Напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности

$$E = E_n \quad (5.2)$$

Следовательно, в случае равновесия зарядов поверхность проводника будет эквипотенциальной.

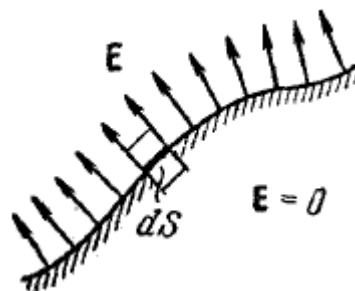


Рис. 5.1

Если проводящему телу сообщить некоторый заряд  $q$ , то он распределится так, чтобы соблюдались условия равновесия. Представим себе мысленно произвольную замкнутую поверхность, полностью заключенную в пределах тела. Поскольку при равновесии зарядов поле в каждой точке внутри проводника отсутствует, поток вектора электрического смещения через поверхность равен нулю. Согласно теореме Гаусса алгебраическая сумма зарядов внутри поверхности также будет равна нулю. Это справедливо для поверхности любых размеров, проведенной внутри проводника произвольным образом. Следовательно, при равновесии ни в каком месте внутри проводника не может быть избыточных зарядов – все они расположатся по поверхности проводника с некоторой плотностью  $\sigma$ .

Так как в состоянии равновесия внутри проводника избыточных зарядов нет, удаление вещества из некоторого объема, взятого внутри проводника, никак не отразится на равновесном расположении зарядов. Таким образом, избыточный заряд распределяется на полой проводнике так же, как и на сплошном, т. е. по его наружной поверхности. На поверхности полости в состоянии равновесия избыточные заряды располагаться не могут. Этот вывод вытекает также из того, что одноименные элементарные заряды, образующие данный заряд  $q$ , взаимно отталкиваются и, следовательно, стремятся расположиться на наибольшем расстоянии друг от друга.

Напряженность поля вблизи поверхности проводника

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, окружающей проводник.

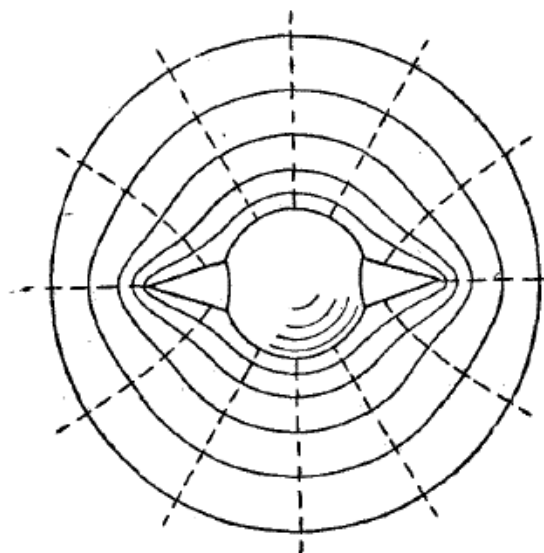


Рис. 5.2

Рассмотрим поле, создаваемое изображенным на рис. 5.2 заряженным проводником. На больших расстояниях от проводника эквипотенциальные поверхности имеют характерную для точечного заряда форму сферы (на рисунке для экономии места сферическая поверхность изображена на небольшом расстоянии от проводника; пунктиром показаны линии напряженности поля). По мере приближения к проводнику эквипотенциальные поверхности становятся все более сходными с поверхностью проводника, которая, как мы знаем, является эквипотенциальной. Вблизи выступов эквипотенциальные поверхности располагаются гуще, значит и напряженность поля здесь больше. Отсюда

согласно (5.3) получается, что плотность зарядов на выступах особенно велика. К тому же выводу можно прийти, учитывая, что из-за взаимного отталкивания заряды стремятся расположиться как можно дальше друг от друга.

Вблизи углублений в проводнике (рис. 5.3) эквипотенциальные поверхности расположены реже. Соответственно напряженность поля и плотность зарядов в этих местах будет меньше. Вообще, плотность зарядов при данном потенциале проводника определяется кривизной поверхности — она растет с увеличением положительной кривизны (выпуклости) и убывает с увеличением отрицательной кривизны (вогнутости). Особенно велика бывает плотность зарядов на остриях.

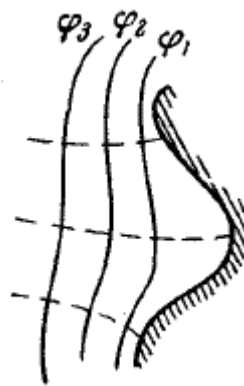


Рис. 5.3

Поэтому напряженность поля вблизи остриев может быть настолько большой, что происходит ионизация молекул газа, окружающего проводник. Ионы иного знака, чем  $q$ , притягиваются к проводнику и нейтрализуют его заряд. Ионы того же знака, что и  $q$ , начинают двигаться от проводника, увлекая с собой нейтральные молекулы газа. В результате возникает ощутимое движение газа, называемое электрическим ветром. Заряд проводника уменьшается, он как бы стекает с острия и уносится ветром. Поэтому такое явление называют истечением заряда с острия.

### **Проводник во внешнем электрическом поле**

При внесении незаряженного проводника в электрическое поле носители заряда приходят в движение: положительные в направлении вектора  $E$ , отрицательные — в противоположную сторону. В результате у концов проводника возникают заряды противоположного знака, называемые индуцированными зарядами (рис. 5.4; пунктиром показаны линии напряженности внешнего поля). Поле этих зарядов направлено противоположно внешнему полю. Таким образом, накапливание зарядов у

концов проводника приводит к ослаблению в нем поля. Перераспределение носителей заряда происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия (5.1) и (5.2), т. е. пока напряженность поля внутри проводника не станет равной нулю, а линии напряженности вне проводника перпендикулярными к его поверхности (рис. 5.4). Следовательно, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности – они заканчиваются на отрицательных индуцированных зарядах и вновь начинаются на положительных.

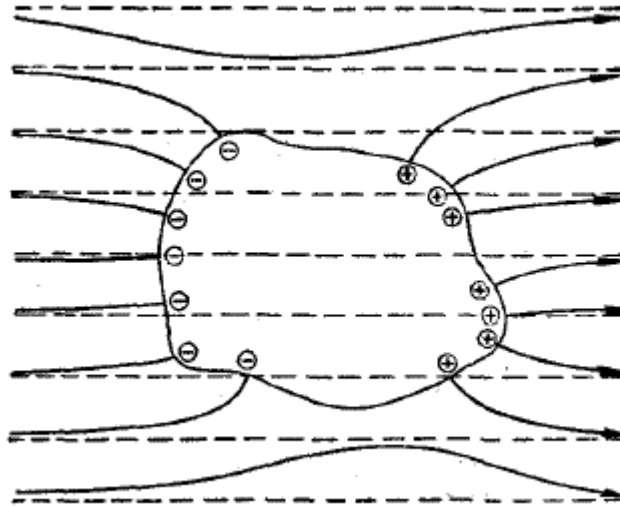


Рис. 5.4

Индукцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном распределении индуцированных зарядов поле внутри нее также обращается в нуль. На этом основывается электростатическая защита. Когда какой-то прибор хотят защитить от воздействия внешних полей, его окружают проводящим футляром (экраном). Внешнее поле компенсируется внутри экрана возникающими на его поверхности индуцированными зарядами. Подобный экран действует хорошо и в том случае, если его сделать не сплошным, а в виде густой сетки.

### **Электрическая емкость**

Сообщенный проводнику заряд распределяется по его поверхности так, чтобы напряженность поля внутри проводника была равна нулю. Если проводнику, уже несущему заряд  $q$ , сообщить еще заряд той же величины, то второй заряд должен распределиться по проводнику точно таким же образом, как и первый, в противном случае он создаст в проводнике поле, не равное нулю. Таким образом, различные по величине заряды распределяются на проводнике подобным образом, т. е. отношение плотностей заряда в двух

произвольных точках поверхности проводника при любой величине заряда будет одно и то же. Отсюда вытекает, что потенциал уединенного проводника пропорционален находящемуся на нем заряду. Действительно, увеличение в некоторое число раз заряда приводит к увеличению в то же число раз напряженности поля в каждой точке окружающего проводник пространства. Следовательно, в такое же число раз возрастет работа переноса по любому пути единичного заряда из бесконечности на поверхность проводника, т. е. потенциал проводника. Таким образом, для уединенного проводника

$$q = C\varphi \quad (5.4)$$

Коэффициент пропорциональности  $C$  между потенциалом и зарядом называется емкостью (электрической емкостью или просто емкостью) проводника. Из (5.4) следует, что

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (5.5)$$

Емкость численно равна заряду, сообщение которого проводнику повышает его потенциал на единицу.

Пользуясь приведенными ранее выражениями можно показать, что емкость уединенного шара радиуса  $R$ , погруженного в однородный безграничный диэлектрик с относительной проницаемостью  $\epsilon$ , равна

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R \quad (5.6)$$

За единицу емкости принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 вольт при сообщении ему заряда в 1 кулон. Эта единица емкости называется фарадой (Ф).

Емкостью в одну фараду обладал бы уединенный шар радиуса  $9 \cdot 10^9$  м, то есть радиусом, примерно в 1500 раз большим радиуса Земли. Таким образом, фарада – очень большая величина. Поэтому на практике пользуются единицами, равными долям фарады – микрофарадой (мкФ) и пикофарадой (пФ), которые определяются следующим образом:

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ ф},$$

$$1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

### **Конденсаторы**

Уединенные проводники обладают малой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь 700 мкФ. Вместе с тем на практике бывает потребность в устройствах, которые при небольшом относительно окружающих тел потенциале накапливали бы на себе



(«конденсировали») заметные по величине заряды. В основу таких устройств, называемых конденсаторами, положен тот факт, что емкость проводника возрастает при приближении к нему других тел. Действительно, под действием поля, создаваемого заряженным проводником, на поднесенном к нему теле возникают индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды. Заряды, противоположные по знаку заряду проводника  $q$ , располагаются ближе к проводнику, чем одноименные с  $q$ , и, следовательно, оказывают большее влияние на его потенциал. Поэтому при поднесении к заряженному проводнику какого-либо тела потенциал проводника уменьшается по абсолютной величине. Согласно формуле (5.5) это означает увеличение емкости проводника.

Конденсаторы делают в виде двух проводников, расположенных близко друг к другу. Образующие конденсатор проводники называют его обкладками. Чтобы внешние тела не оказывали воздействия на емкость конденсатора, обкладкам придают такую форму и так располагают их друг относительно друга, чтобы поле, создаваемое накапливаемыми на них зарядами, было полностью сосредоточено внутри конденсатора. Этому условию удовлетворяют две пластинки, расположенные близко друг к другу, два coaxialных цилиндра и две концентрические сферы. Соответственно бывают плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы.

Поскольку поле заключено внутри конденсатора, линии электрического смещения начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Следовательно, свободные заряды, возникающие на разных обкладках, имеют одинаковую величину  $q$  и различны по знаку. Под емкостью конденсатора понимается физическая величина, пропорциональная заряду  $q$  и обратно пропорциональная разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (5.7)$$

Емкость конденсатора измеряется в тех же единицах, что и емкость уединенного проводника.

Величина емкости определяется геометрией конденсатора (формой и размерами обкладок, а также величиной зазора между ними), а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками. Найдем формулу для емкости плоского конденсатора. Если площадь обкладки  $S$ , а заряд на ней  $q$ , то напряженность поля между обкладками равна

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S} \quad (5.8)$$

Мы воспользовались формулой (3.3) из предыдущей лекции и учли возможность наличия диэлектрика в зазоре между пластинками.

Разность потенциалов, как известно, есть работа поля по перемещению единичного заряда. В однородном поле, когда напряженность во всех точках поля одинакова, эта работа будет равна произведению величины напряженности  $E$  на расстояние, на которое перемещается единичный заряд. Если расстояние между обкладками конденсатора равно  $d$ , то разность потенциалов, то есть напряжение между этими обкладками

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{qd}{\varepsilon\varepsilon_0S} \quad (5.9)$$

откуда для емкости плоского конденсатора получается следующая формула:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0S}{d} \quad (5.10)$$

где  $S$  – площадь обкладки,  $d$  – величина зазора между обкладками,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор.

Из формулы (5.10) следует, что размерность электрической постоянной  $\varepsilon_0$  равна размерности емкости, деленной на размерность длины (напомним, что  $\varepsilon$  – безразмерная величина). В соответствии с этим единицы, в которых измеряется  $\varepsilon_0$ , носят название «фарада на метр» (Ф/м).

Из выражения (5.10) ясно, почему введение между обкладками прослойки из сегнетоэлектрика (например, метатитаната бария) позволяет получить при небольших размерах конденсатора большую емкость.

Помимо емкости, каждый конденсатор характеризуется предельным напряжением  $U_{\max}$ , которое можно прикладывать к обкладкам конденсатора, не опасаясь его пробоя. При превышении этого напряжения между обкладками проскакивает искра, в результате чего разрушается диэлектрик и конденсатор выходит из строя.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

1. Каковы условия равновесия зарядов в проводниках?
2. Насколько могут отличаться потенциалы различных точек поверхности заряженного проводника?
3. Как располагаются заряды внутри проводника?
4. Как располагаются заряды на поверхности проводника?
5. Как связаны напряженность поля вблизи поверхности проводника и поверхностная плотность заряда?
6. Где напряженность поля выше: на впадинах или на выступах заряженного тела из проводящего материала?
7. Что называют "электрическим ветром"?
8. Какой заряд называют "индуцированным"?
9. Где располагаются индуцированные заряды в теле из проводящего вещества?
10. Что называется электрической емкостью проводника?
11. Чему численно равна емкость?
12. В каких единицах измеряется емкость?
13. Какие дробные единицы измерения емкости Вам известны?
14. Какой формы обычно бывают конденсаторы?
15. Как рассчитывается емкость плоского конденсатора через его конструктивные параметры?
16. Почему использование сегнетоэлектриков позволяет создавать конденсаторы большой емкости?

### *Уровень курса*

1. Равновесие зарядов на проводнике.
2. Проводник во внешнем электрическом поле.
3. Электрическая емкость.
4. Конденсаторы.

## Лекція № 15

**Тема:** Емкостные преобразователи**Оглавление**

Принцип действия емкостного преобразователя.....	2
Конструкции емкостных преобразователей.....	4
Емкостной датчик давления.....	5
Емкостной измеритель уровня жидкости.....	6
Емкостной преобразователь для измерения толщины ленты из диэлектрика.....	7
Емкостной преобразователь для измерения угла поворота вала .....	7
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	9

**Источники:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.
2. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
3. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
4. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

### Принцип действия емкостного преобразователя

Емкостный преобразователь (ЕП) представляет собой конденсатор, электрические параметры которого изменяются под действием входной величины.

Конденсатор состоит из двух электродов, к которым подсоединены выводные концы. Пространство между электродами заполнено диэлектриком. При изменении взаимного положения электродов или при изменении диэлектрической проницаемости среды, заполняющей межэлектродное пространство, изменяется емкость конденсатора.

В качестве емкостного преобразователя широко используется плоский конденсатор. Его емкость определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \tag{15.1}$$

где  $d$  – расстояние между электродами;  $S$  - их площадь;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная проницаемость диэлектрика. Изменение любого из этих параметров изменяет емкость конденсатора.

Данная функциональная зависимость и положена в основу работы емкостных измерительных преобразователей перемещений, влияющих непосредственно на  $S$  или  $d$ , и диэлектрических свойств среды, воздействующих через  $\epsilon$ . Применение промежуточных измерительных преобразователей, в частности, механических упругих преобразователей статических сил, давлений, ускорений и т.д. в линейные или угловые перемещения значительно расширяет сферу применения емкостных датчиков (динамометры, манометры, виброметры, акселерометры и т.д.).

Воздействие через  $\epsilon$  используется в уровнемерах, анализаторах состава и, в частности, влажности и в других измерительных преобразователях.

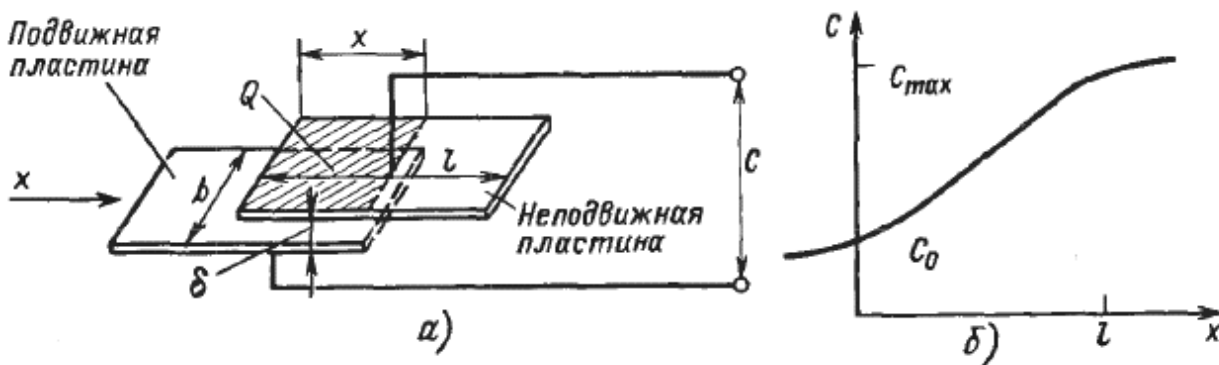


Рис. 1 – Измерение величины перемещения электродов

У преобразователя с прямоугольными электродами (рис. 1а)  $S = bx$  и имеется некоторый диапазон перемещения пластин  $x$ , в котором емкость линейно зависит от  $x$  (рис. 1б). Линейная зависимость искажается вследствие краевого эффекта. В области линейной зависимости чувствительность такого преобразователя

$$Q = dC/dx = \epsilon\epsilon_0 b/\delta \tag{15.2}$$

постоянна и увеличивается с уменьшением расстояния между электродами  $\delta$ .

Если изменяется расстояние  $\delta$  между электродами, функция преобразования  $C=f(x)$  представляет собой гиперболическую функцию. Чувствительность преобразователя

$$Q = dC/d\delta = \epsilon\epsilon_0 S/\delta^2 \tag{15.3}$$

сильнее, чем в предыдущем случае, зависит от расстояния между пластинами  $\delta$ . Для увеличения чувствительности  $Q$  целесообразно уменьшить  $\delta$ . Предельное его значение определяется технологическими соображениями и приложенным напряжением. Надо учитывать, что при малых  $\delta$  возможен электрический пробой между электродами.

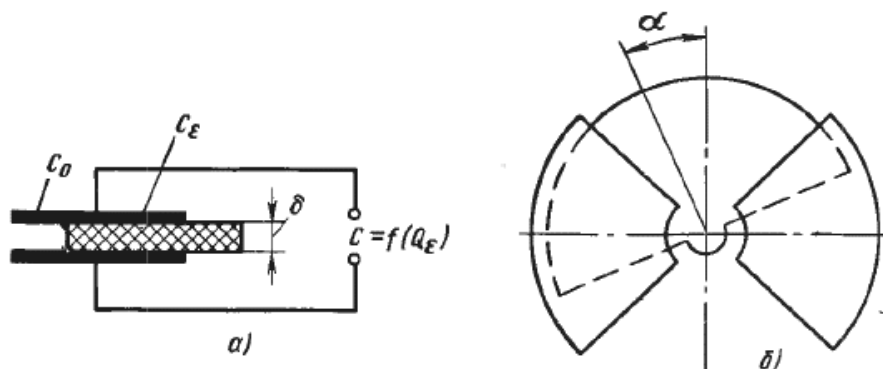


Рис. 2 – Измерение величины перемещения диэлектрической пластины

Если перемещать диэлектрическую пластину в зазоре плоского конденсатора (рис. 2а), то можно получить преобразователь с переменной диэлектрической проницаемостью. Емкость такого преобразователя определяется как емкость двух параллельно включенных конденсаторов. Один из них  $C_\epsilon$  образован частью электродов и диэлектрической пластиной, другой  $C_0$  – оставшейся частью электродов с межэлектродным пространством, не заполненным пластинкой. Если пластинка с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  имеет толщину  $\delta$ , равную расстоянию между электродами, то функция преобразования преобразователя описывается выражением

$$C = C_e + C_0 = \epsilon_0 [S + S_e(\epsilon - 1)]/\delta \quad (15.4)$$

где  $S$  - площадь электродов;  $S_e$  – часть площади диэлектрической пластины, находящаяся между электродами.

Емкостные преобразователи могут выполняться по дифференциальной схеме. Схема дифференциального преобразователя углового перемещения  $a$  с переменной площадью электродов приведена на рис. 2б. В таких преобразователях средний подвижный электрод обычно соединяется с экраном.

### Конструкции емкостных преобразователей

В целом, несмотря на большое разнообразие конструктивных разновидностей емкостных преобразователей, их можно объединить в три группы: датчики с плоскими электродами (рис. 3); с коаксиальными электродами (рис. 4 а,б) и с электродами произвольной формы (рис. 4в).

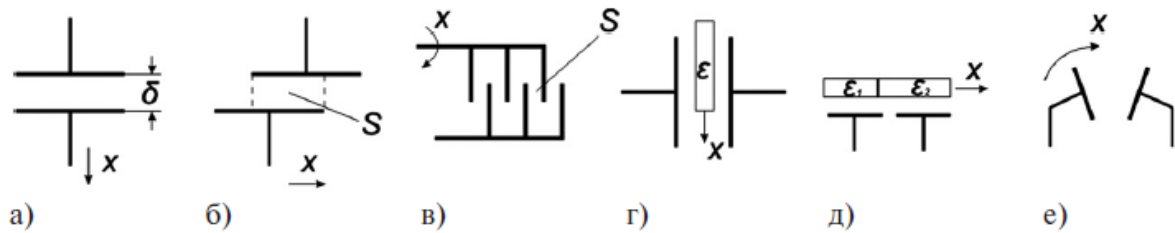


Рис. 3 – Емкостные преобразователи с плоскими электродами

Рис. 3 объясняет принцип построения емкостных преобразователей с плоскими электродами: а) и е) преобразователей с изменяющимся расстоянием между электродами; б) и в) преобразователей с изменяющейся площадью перекрытия электродов; г) и д) преобразователей с изменяющейся диэлектрической проницаемостью между электродами.

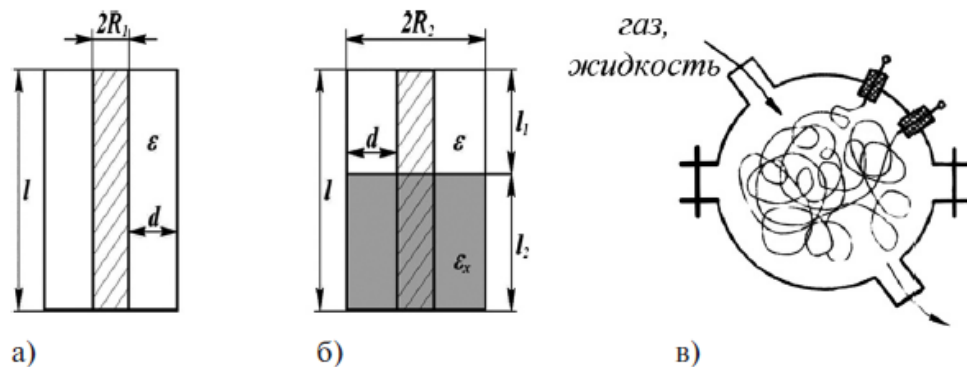


Рис. 4 – Разнообразие форм электродов емкостных преобразователей

Конструкции емкостных датчиков с электродами произвольной формы могут быть самыми разнообразными: кольцевые, сферические, конические и др. Это разнообразие диктуется спецификой конкретных условий измерений. В частности, на рис. 4в представлен возможный вариант датчика диэлектрических свойств жидкостей или газов. Electroдами такого датчика служат две гибкие проволоки (одножильные или многожильные). Хотя бы одна из них должна быть покрыта изоляцией. Проволоки укладываются в жгут и произвольно сминаются в клубок требуемой формы (сфера, тор, цилиндр и т.д.).

### Емкостной датчик давления

Чувствительными элементами емкостных датчиков давления являются мембраны и диафрагмы, преобразующие измеряемое давление в перемещение. При этом они могут быть одновременно использованы в качестве подвижного электрода емкостного датчика. Соотношение между относительным изменением емкости и измеряемым давлением  $P$  емкостного датчика давления с неподвижным плоским электродом 1 и подвижным электродом 2 в виде эластичной мембраны (рис. 5а) определяется линейной зависимостью.

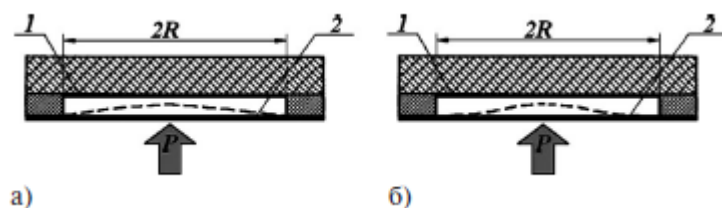


Рис. 5 — Чувствительные элементы емкостных датчиков давления

Чувствительность емкостного датчика давления с эластичной мембраной при малых ее прогибах пропорциональна приложенному давлению. Необходимо отметить, что пропорциональная зависимость распространяется только на статические отклонения, когда можно пренебречь амортизирующим действием тонкой воздушной прослойки между мембраной и неподвижным электродом. Эта воздушная подушка значительно увеличивает жесткость и снижает чувствительность к динамическим давлениям. Для снижения амортизирующего действия воздушной подушки до пренебрежимо малого значения неподвижный электрод перфорируют.

Датчики типа выпускаются как датчики абсолютного давления (рис. 6а) и как датчики относительного давления (рис. 6б). Конструктивно они почти не отличаются за исключением отверстия в основе корпуса датчика относительного давления, которое соединяет межэлектродную камеру с



атмосферой, обеспечивая в камере атмосферное давление. Такого отверстия в датчиках абсолютного давления нет, а в межэлектродном пространстве датчика создают вакуум.

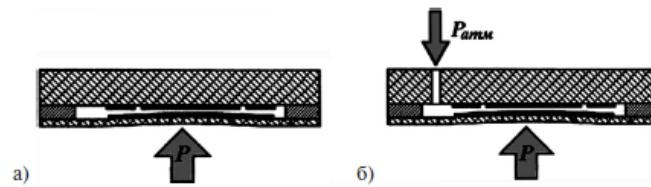


Рис. 6 – К принципу действия датчиков абсолютного и относительного давлений

Повышение чувствительности емкостных датчиков давления с упругим элементом в виде круглой мембраны постоянного сечения, жестко заделанной по контуру, можно получить, используя в качестве промежуточной физической величины не прогиб мембраны, а угол наклона воображаемой нормали к ее поверхности относительно оси круглой пластины.

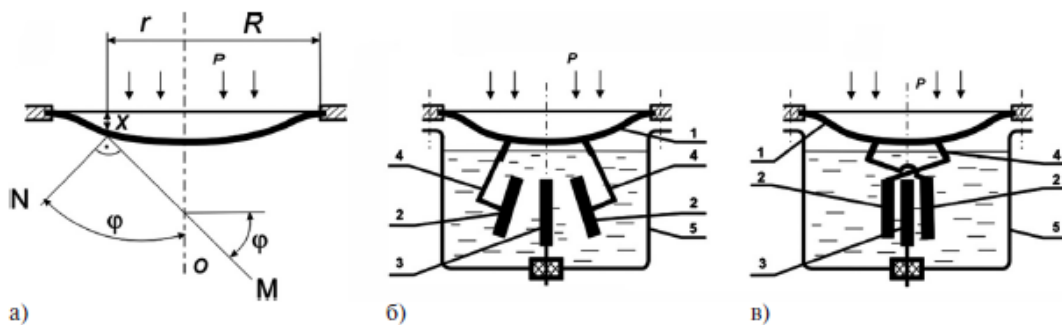
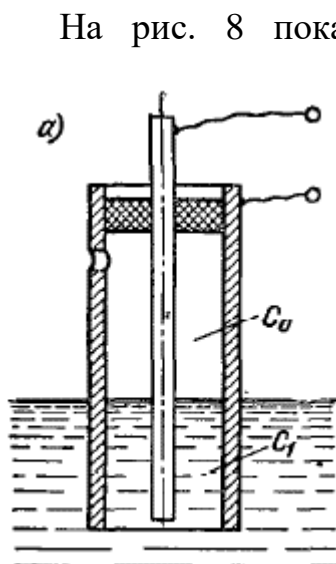


Рис. 7 – Емкостные датчики давления: а) – схема деформации круглой мембраны под действием давления P; б), в) – варианты исполнения датчиков

**Емкостной измеритель уровня жидкости**



На рис. 8 показано устройство емкостного преобразователя для измерения высоты уровня жидкости. Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор  $C_1$  образован частью электродов и диэлектриком – жидкостью, уровень которой измеряется, конденсатор  $C_0$  – остальной частью электродов и диэлектриком – воздухом. Емкость преобразователя

$$C = C_1 + C_0 = [l\varepsilon + (l_0 - l)\varepsilon_0] \frac{2\pi}{\ln R_1/R_2} \tag{15.5}$$

рис.8 Емкостной уровнемер

где  $l_0$  – полная длина цилиндра;  $l$  – длина, на которую цилиндр заполнен жидкостью;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость жидкости;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

### **Емкостной преобразователь для измерения толщины ленты из диэлектрика**

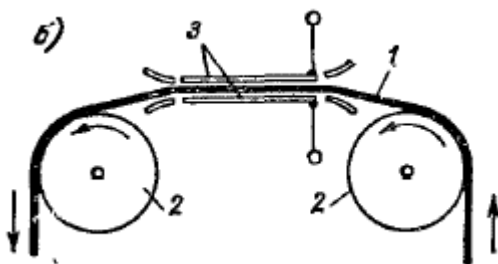


Рис. 9 – Измерение толщины диэлектрической ленты емкостным методом

На рис. 9 показан принцип устройства емкостного преобразователя для измерения толщины ленты из диэлектрика. Испытуемая лента 1 протягивается с помощью роликов 2 между обкладками 3 конденсатора. Если ширину зазора между обкладками конденсатора обозначить  $\delta$ , площадь обкладок  $S$ , толщину ленты  $\delta_d$  и ее диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_d$ , то емкость  $C$  можно выразить как

$$C = \frac{S}{(\delta - \delta_d)/\varepsilon_0 + \delta_d/\varepsilon_d} \quad (15.6)$$

### **Емкостной преобразователь для измерения угла поворота вала**

На рис. 10а показан принцип устройства емкостных преобразователей с переменной площадью пластин, используемых для измерения угла поворота вала. Ротор 1, жестко скрепленный с валом 2, перемещается относительно статора 3 так, что ширина зазора между ними сохраняется неизменной. Емкость преобразователя при повороте ротора изменяется от максимума (выступ ротора находится против выступа статора) до минимума, как показано на рис. 10б.

Достоинством емкостных преобразователей с переменной площадью пластин (рис. 11) является возможность соответствующим выбором формы подвижной 1 и неподвижной 2 пластин получить заданную функциональную зависимость между изменением емкости и входным угловым или линейным перемещением. Преобразователи с переменной площадью применяются для измерения перемещений, больших 1 мм.

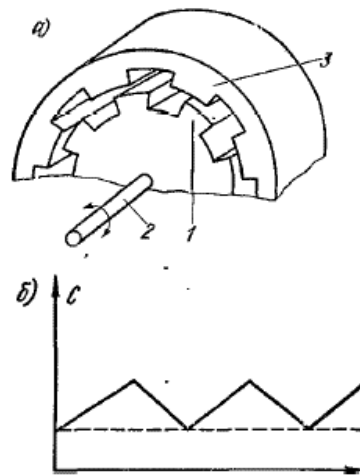


Рис. 10 – Измерение угла поворота вала

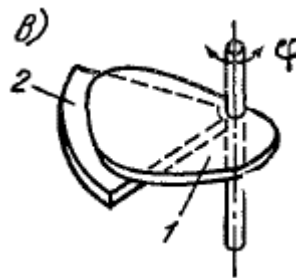


Рис. 11 – Емкостной преобразователь угла поворота вала с переменной площадью пластин

## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Принцип действия емкостного преобразователя.
2. Конструкции емкостных преобразователей.
3. Емкостной датчик давления.
4. Емкостной измеритель уровня жидкости.
5. Емкостной преобразователь для измерения угла поворота вала.

## Лекція № 16

**Тема:** Емкостные преобразователи (продолжение). Измерение емкости.

**Оглавление**

Емкостные преобразователи (продолжение) .....	3
Емкостные преобразователи для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий .....	3
Емкостные преобразователи для контроля твердых дисперсных материалов .....	3
Методы измерения емкости .....	4
Идеальный и реальный конденсатор .....	4
Применение мостовых схем для измерения емкости. Мост Вина... 6	
Мостовая цепь в неравновесном режиме .....	7
Трансформаторные мосты .....	8
Резонансный метод .....	9
Особенности применения емкостных преобразователей. ....	10
Контрольные вопросы по теме .....	11
Уровень модуля.....	11
Уровень курса.....	11

**Источники:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.
2. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
3. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
4. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.

5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## Емкостные преобразователи (продолжение)

### Емкостные преобразователи для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий

Для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий (например, проволоки, ленты, полосы, фольги, прутков и пр.) применяют проходные емкостные электрические преобразователи (ЭП). В зависимости от схемы включения электродов и объекта контроля конструкции ЭП бывают двух и трехжжимными (рис. 1). Их работа основана на измерении полной или частичной емкости. Контроль может осуществляться и по так называемой схеме с перекрестной емкостью (например, включение проходных ЭП по схеме, показанной на рис. 1, е, ж).

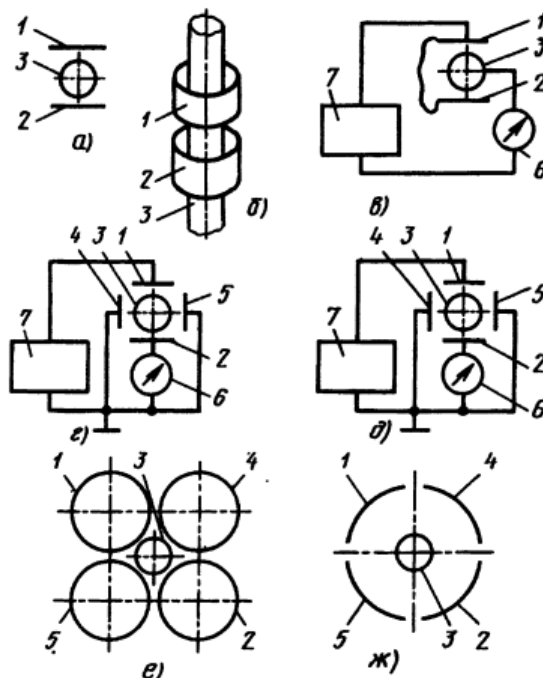


Рис. 1 – Конструкция проходных ЭП с измерением емкости:

*а-в* – полной; *г-д* – частичной; *е, ж* – перекрестной;

1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод;

3 – объект контроля; 4 и 5 – охранные электроды; 6 – индикатор;

7 – источник питания

### Емкостные преобразователи для контроля твердых дисперсных материалов

Контроль твердых дисперсных (сыпучих) материалов допускает большую свободу в выборе конструкции ЭП, так как контролируемая среда может принять любую форму в соответствии с применяемой конструкцией ЭП. Чаще всего ЭП выполняют в виде сосуда, заполняемого контролируемой

средой, или в виде преобразователя, погружаемого в эту среду. Несколько конструкций ЭП такого вида приведено на рис. 2. Контролируемыми параметрами в данном случае являются степень дисперсности среды, физико-механические параметры частиц (например, их состав, влажность), состав полидисперсных сред.

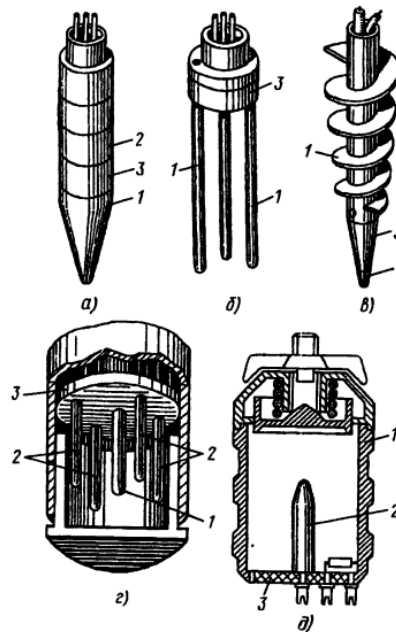


Рис. 2 – ЭП для контроля сыпучих материалов:

а-в – погружные; г– типа сосуда; д – типа сосуда с прессовым устройством для уплотнения пробы;

1 – низкопотенциальный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод;  
3 – изоляционное основание

### Методы измерения емкости

Емкостный преобразователь включается в измерительную цепь; при этом изменение его емкости преобразуется в изменение напряжения или тока либо в частоту синусоидального или импульсного тока. Существует довольно много различных измерительных цепей включения емкостных преобразователей. Рассмотрим некоторые из них. Но для начала вспомним некоторые сведения из теоретических основ электротехники относительно конденсаторов.

### Идеальный и реальный конденсатор

Схема идеального конденсатора, то есть устройства, обладающего исключительно емкостными свойствами, представлена на рисунке 3. Здесь же



представлена діаграма токів і напруг на конденсаторі, а також графік змінення току і напруги на ідеальному конденсаторі.

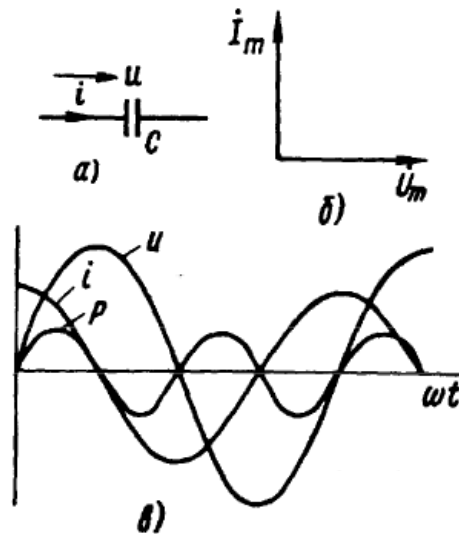


Рис. 3 – Идеальный конденсатор

Внутреннее активное сопротивление конденсатора равно бесконечности. У реального конденсатора это не так. Активное сопротивление реального конденсатора хоть и имеет очень высокую величину, но тем не менее оно не бесконечно. То есть, реальный конденсатор обладает как емкостью, так и активным сопротивлением, что отображается эквивалентной схемой реального конденсатора (рис.4):

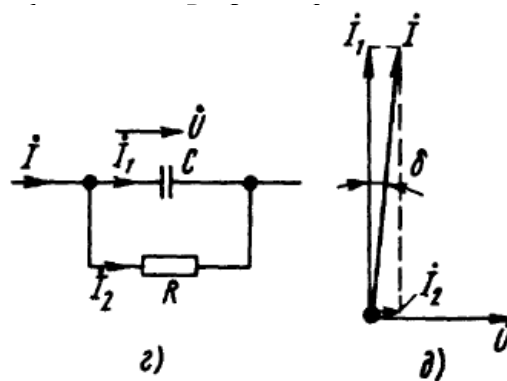


Рис. 4 – Реальный конденсатор

На эквивалентной схеме реального конденсатора его емкость и его сопротивление соединены параллельно. Напряжение и ток на реальном конденсаторе имеют разность фаз не 90 градусов, а меньше. Отличие этой разности фаз от 90 градусов (величина угла  $\delta$  на рисунке 4) характеризует величину активного сопротивления конденсатора, и, чем оно больше, тем

больше активные потери мощности на конденсаторе. Поэтому угол  $\delta$  называют углом потерь. Его величина определяется через тангенс отношения активной  $1/R$  и реактивной  $\omega C$  составляющей комплексной проводимости конденсатора:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1/R}{\omega C} = \frac{1}{\omega RC}$$

Тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$  зависит от типа диэлектрика и от частоты. Угол потерь для разных конденсаторов может составлять от нескольких секунд до нескольких градусов.

Емкостные преобразователи: емкостные датчики давления, емкостные датчики перемещения, емкостные датчики измерения угла поворота и все другие виды емкостных датчиков, безусловно, относятся к категории реальных конденсаторов. Их активное сопротивление не бесконечно, а тангенс угла потерь отличен от нуля.

### **Применение мостовых схем для измерения емкости. Мост Вина**

В лекции 10 было рассказано о мостовых схемах и их применении для проведения измерений параметров элементов цепи. В частности, указывалось, что для измерения реактивных сопротивлений используются мосты переменного тока (рис. 5).

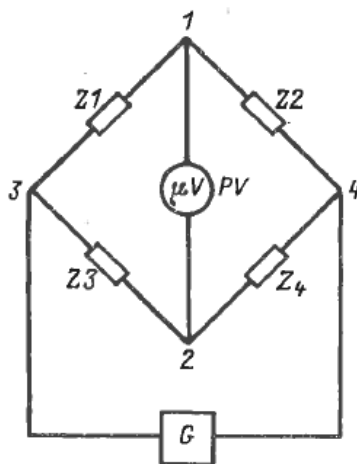


Рис. 5 – Мост переменного тока

Условие равновесия одинарного моста переменного тока имеет вид

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

где  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  и  $Z_4$  – комплексные сопротивления плеч.

Когда нуль-индикатор PV на рис. 6 показывает  $U_n = 0$ , то это означает, что выполнено соотношение

$$Z_1 = Z_2 Z_3 / Z_4$$

Неизвестное полное сопротивление  $Z_X$  здесь играет роль  $Z_1$ . Остальные полные сопротивления, входящие в схему, следует выбирать так, чтобы они обеспечивали возможность выполнения вышеприведенного равенства по величине и фазе. Кроме того, схема должна включать и известное образцовое полное сопротивление. Эти условия позволяют создать весьма многочисленные варианты мостов переменного тока. На рис. 6 показан вариант, часто применяемый для измерения емкости конденсаторов – так называемый мост Вина. Неизвестное полное сопротивление, соответствующее емкости  $C_x$  с углом потерь  $\delta$ , может быть легко определено по образцовой емкости с минимальными потерями  $C_N$ , калиброванному резистору с сопротивлением потерь  $R_\delta$  и калиброванному отношению сопротивлений  $R_2/R_1$ . При этом:

$$C_x = C_N (R_2/R_1); \quad \operatorname{tg} \delta_x = 1/(\omega C_N R_\delta)$$

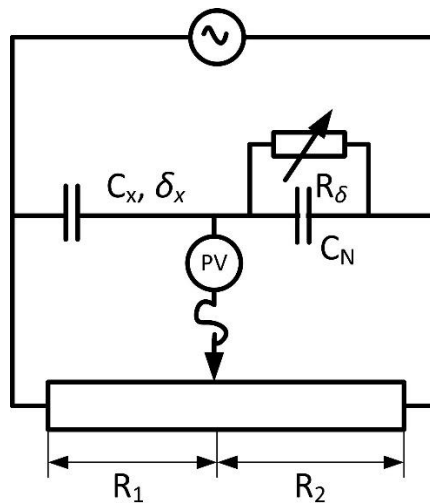


Рис. 6 – Мост Вина

### **Мостовая цепь в неравновесном режиме**

Для включения дифференциального емкостного преобразователя может быть использована мостовая цепь (рис. 7), работающая в неравновесном режиме.

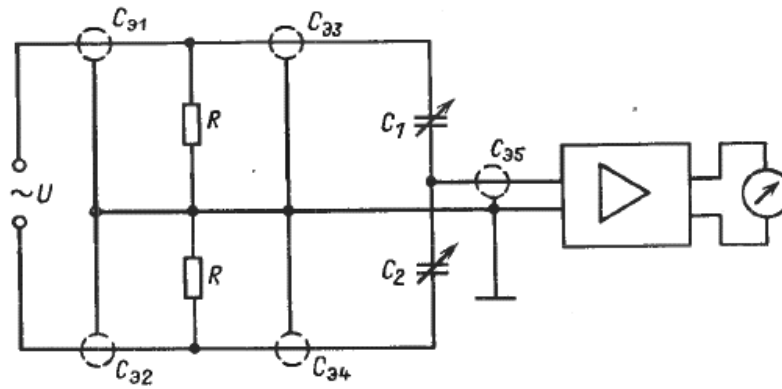


Рис. 7 – Мостовая цепь в неравновесном режиме

В этой цепи емкости  $C_1$  и  $C_2$  – дифференциальный преобразователь. На схеме показано также экранирование соединительных проводов и диагоналей мостовой цепи.  $C_{э1}$ ,  $C_{э2}$ ,  $C_{э3}$ ,  $C_{э4}$  – емкости соответствующих экранов. Эти емкости включены параллельно активным сопротивлениям и входят в полные сопротивления плеч моста. Эквивалентные емкости экранов могут несколько изменяться при работе прибора. Для того чтобы их изменения мало влияли на выходное напряжение моста, сопротивления резисторов  $R$  должны быть малыми. Емкость  $C_{э5}$  не входит в уравнение равновесия моста, и ее изменение значительно меньше влияет на его выходное напряжение.

### Трансформаторные мосты

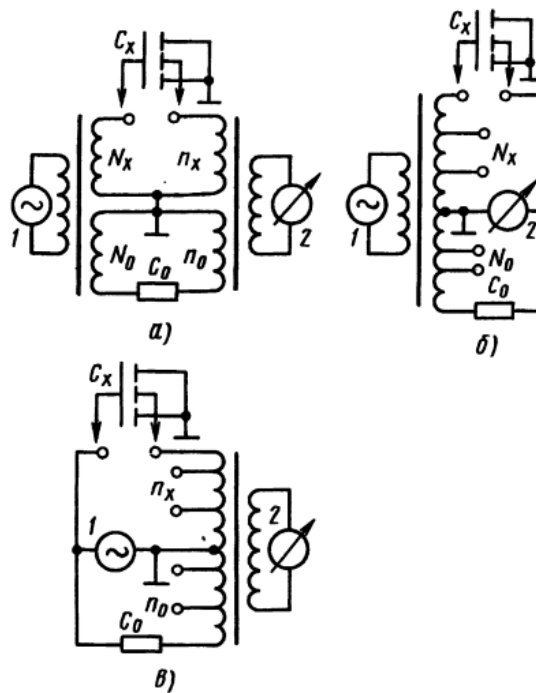


Рис. 8 – Трансформаторные мосты: мосты с индуктивно связанными плечами; 1 – генератор; 2 – индикатор

Несколько разновидностей таких схем приведено на рис. 8а - 8в.  
Условия равновесия для приведенных схем:

а)  $\frac{C_x}{C_0} = \frac{N_0 n_0}{N_x n_x}$

б)  $\frac{C_x}{C_0} = \frac{N_0}{N_x}$

в)  $\frac{C_x}{C_0} = \frac{n_0}{n_x}$

Основными преимуществами данного типа трансформаторных мостов являются:

- малая чувствительность к паразитным емкостям, включенным параллельно индуктивным плечам, что позволяет проводить измерения при наличии длинных соединительных проводов;
- возможность построения мостов с широким диапазоном измерений при применении многосекционированных трансформаторов при малом числе образцовых мер;
- возможность выбора образцовой меры такого значения, при котором можно ожидать наибольшую стабильность и точность измерений.

**Резонансный метод**

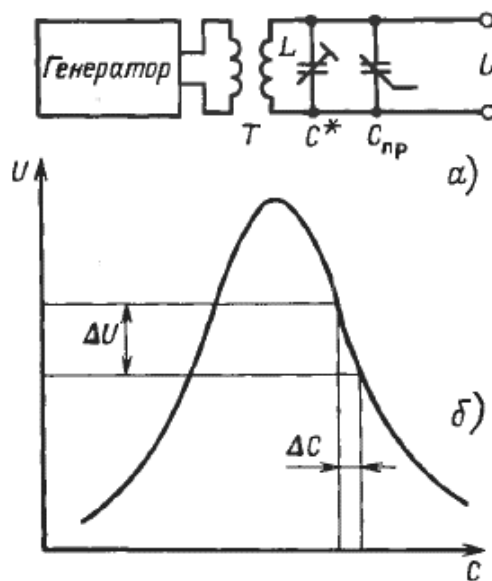


Рис. 9 – Резонансный метод измерения емкости

Для включения недифференциального преобразователя может использоваться резонансная цепь (рис.9а). Генератор через разделительный трансформатор T питает резонансный RC- контур. Емкость контура состоит из емкости преобразователя Cпр и подстроечного конденсатора емкостью C, частота и значение напряжения генератора постоянны. При изменении

емкости напряжение на контуре изменяется по резонансной кривой, как показано на рис. 9б. При изменении емкости преобразователя на  $\Delta C$  напряжение на контуре изменяется на  $\Delta U$ . Подстроечный конденсатор служит для настройки контура так, чтобы чувствительность измерительной цепи  $Q = \Delta U / \Delta C$  была максимальной.

Чувствительность резонансной цепи довольно высока и увеличивается с увеличением добротности контура.

### **Особенности применения емкостных преобразователей.**

---

Емкостные преобразователи имеют ряд специфических достоинств и недостатков, определяющих область их применения. Конструкция емкостного датчика проста, он имеет малые массу и размеры. Его подвижные электроды могут быть достаточно жесткими, с высокой собственной частотой, что дает возможность измерять быстропеременные величины. Емкостные преобразователи можно выполнять с заданной (линейной или нелинейной) функцией преобразования. Для получения требуемой функции преобразования часто достаточно изменить форму электродов. Отличительной особенностью является малая сила притяжения электродов.

Основным недостатком емкостных преобразователей является малая их емкость и высокое сопротивление. Для уменьшения последнего преобразователи питаются напряжением высокой частоты. Однако это обуславливает другой недостаток — сложность вторичных преобразователей. Недостатком является и то, что результат измерения зависит от изменения параметров кабеля.

Для уменьшения погрешности измерительную цепь и вторичный прибор располагают вблизи датчика.

Емкостные преобразователи широко применяются в научно-исследовательской работе, где имеется высококвалифицированный персонал для разработки, эксплуатации и ремонта датчиков и вторичных приборов. В условиях научного эксперимента ценным свойством датчиков является простота их конструкции и технологии.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Емкостные преобразователи для контроля размеров поперечного сечения линейно-протяжных изделий.
2. Емкостные преобразователи для контроля твердых дисперсных материалов.
3. Идеальный и реальный конденсатор.
4. Применение мостовых схем для измерения емкости. Мост Вина.
5. Мостовая цепь в неравновесном режиме для измерения емкости.
6. Применение трансформаторных мостов для измерения емкости.
7. Резонансный метод измерения емкости.

## Лекція № 17

**Тема:** Физические основы измерения высоты уровня жидкости**Оглавление**

Измерение количества жидкости внутри емкости .....	3
Методы измерения уровня жидкости .....	3
Типы первичных преобразователей .....	4
Физические основы и принцип действия преобразователей для измерения уровня жидкости .....	5
Визуальные уровнемеры .....	5
Поплавковые датчики уровня.....	6
Буйковые уровнемеры .....	6
Гидростатические уровнемеры.....	7
Вибрационные сигнализаторы уровня.....	8
Емкостные уровнемеры.....	9
Кондуктометрические уровнемеры .....	10
Акустические и ультразвуковые уровнемеры .....	10
Микроволновые радарные уровнемеры .....	11
Радиоизотопные уровнемеры .....	12
Контрольные вопросы по теме .....	13
Уровень модуля.....	13
Уровень курса.....	13

**Источники:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1987 - 445 с.
2. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.



3. Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 5-е, перераб.и доп. Л., «Энергия», 1975.
4. Измерения в промышленности. Справ, изд. В 3-х кн. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. 492 с.
5. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., 151Ж 978-5-94836-316-5

## **Измерение количества жидкости внутри емкости**

---

Потребность в определении количества жидкости внутри емкости существует в самых различных отраслях промышленности, а также в сельском хозяйстве и на транспорте. Наиболее применяемым методом ее определения является использование датчиков измерения высоты уровня поверхности жидкости внутри емкости с последующим пересчетом измеренной высоты уровня в объем жидкости через градуированные таблицы или функции, полученные заранее для данной конкретной емкости. При наличии данных о плотности можно перейти к массе жидкости, находящейся в емкости. Как было указано в предыдущих лекциях, доля измерений, приходящихся на измерение высоты уровня, составляет около 5% от всех измерений, выполняемых в промышленности.

Существуют и другие методы определения количества жидкости внутри емкости. Например, с помощью расходомеров, которые измеряют расход, с которой жидкость поступает в емкость, или выходит из нее, и проведением непрерывного интегрирования текущего значения расхода во времени. Этот метод является менее точным и менее надежным, чем измерения уровня, поэтому используется в случаях, когда непосредственное измерение уровня внутри емкости невозможно, или же по экономическим соображениям, когда высокая точность получаемых данных не требуется.

Еще одним методом является использование мерных емкостей. Мерные емкости используются для достижения высокой точности измерения, но этот метод является достаточно затратным, и существенно проигрывает в технологичности другим. Измерить количество вещества в емкости можно также и весовым методом, в этом случае емкость должна находиться на весах. Отметим, что метод мерных емкостей и весовой метод не используются на транспорте. Тем не менее, из-за высокой точности измерений, обеспечиваемой этими двумя методами, именно они применяются при проведении градуировки датчиков уровня совместно с емкостями.

## **Методы измерения уровня жидкости**

---

Под измерением уровня понимается индикация положения раздела двух сред различной плотности относительно какой-либо горизонтальной плоскости, принятой за начало отсчета.

Средства измерений уровня называются уровнемерами. Как и все средства измерений, уровнемеры состоят из совокупности измерительных преобразователей и вспомогательных устройств, необходимых для осуществления процесса измерений (устройств для линеаризации функций преобразования, отсчетных устройств и т. д.).

Первичный преобразователь (датчик) воспринимает измеряемую величину — уровень — и преобразует ее в выходной сигнал (электрический, пневматический, частотный), поступающий на последующие преобразователи, или в показания, отсчитываемые по шкале уровнемера.

Принцип действия первичных преобразователей уровнемеров основан на различии физических свойств веществ, образующих границу раздела. В зависимости от того, различие каких физических свойств веществ воспринимает первичный преобразователь, уровнемеры подразделяют на механические, акустические, электрические, оптические и тепловые.

Известно достаточно большое количество методов измерения уровня жидкости. Все они основаны на различии свойств вещества жидкой среды и свойств вещества газообразной среды. Каждый метод использует различие в каком-либо свойстве, как правило - в одном, например плотности или проводимости. Название метода в большинстве случаев отражает название свойства вещества, положенного в основу измерений. Наибольшее распространение получили такие методы измерения уровня как визуальные, гидростатические, емкостные, поплавковые, кондуктометрические, высокочастотные, сверхвысокочастотные, акустические (в том числе ультразвуковые), вибрационные, радиоизотопные, тепловые, оптические, волоконно-оптические.

### **Типы первичных преобразователей**

---

В ряде отраслей промышленности, например, в химической и пищевой, в промышленности строительных материалов или в области подъемно-транспортной техники, к приборам для измерения уровня заполнения емкостей и сосудов или уровнемерам предъявляют различные требования. В ряде случаев требуется только сигнализация определенного предельного уровня; в других случаях необходимо непрерывное измерение уровня заполнения.

Имеется три типа первичных измерительных преобразователей:

Сигнализаторы уровня – устройство для фиксации прохождения уровнем жидкости заданной точки.

Непрерывные датчики уровня – устройства для непрерывного (по высоте емкости) измерения уровня жидкости.

Дискретные датчики уровня – устройство, формирующее информацию об уровне жидкости по показаниям в отдельных точках, расположенных равномерно по высоте емкости.

При выборе уровнемера необходимо учитывать такие физические и химические свойства материала, как температура, абразивные свойства,

вязкость, электрическая Проводимость, радиоактивность, химическая агрессивность и т. д. Кроме того, следует принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или около него: давление, вакуум, нагревание, охлаждение, способ заполнения или опорожнения (пневматический или механический) резервуара, наличие мешалки, огнеопасность и взрывоопасность.

Независимо от области применения уровнемеров к ним предъявляются следующие требования:

- высокая чувствительность показаний,
- направленность действия,
- высокая избирательность,
- надежность,
- технологичность конструкции.

В отдельных случаях датчиков уровня (например, для летательных аппаратов), кроме того, требуется:

- повышенная точность при минимальных габаритах и весе,
- способность к работе в агрессивных и взрывоопасных средах,
- повышенные требования к надежности,
- способность к работе в условиях колебаний поверхности жидкости.

### **Физические основы и принцип действия преобразователей для измерения уровня жидкости**

---

В данном разделе рассмотрены уровнемеры следующих видов:

- визуальные;
- поплавковые и буйковые;
- гидростатические:
- электрические;
- акустические (ультразвуковые);
- микроволновые радарные уровнемеры;
- радиоизотопные уровнемеры.

#### **Визуальные уровнемеры**

Визуальные уровнемеры выполняются в виде мерных линеек, реек, рулеток и уровнемерных стекол. Наибольшее распространение получили уровнемерные стекла (рис.1), основанные на законе сообщающихся сосудов. Их изготавливают в виде стеклянной трубки, соединенной с аппаратом. Наблюдая за уровнем жидкости в трубке, судят о величине уровня в емкости.

Уровнемерные стекла применяют для местного измерения уровня в аппаратах, работающих при атмосферном или избыточном давлениях.

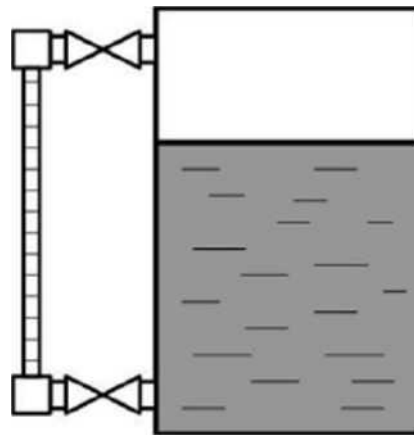


Рис. 1 – Использование уровнемерного стекла.

### **Поплавковые датчики уровня**

Поплавковые датчики уровня (рис.2) одни из самых недорогих и, вместе с тем, надежных устройств для измерения уровня жидкостей. В этих приборах чувствительным элементом является плавающий поплавок, плотность которого меньше плотности жидкости, при этом поплавок следит за уровнем жидкости.

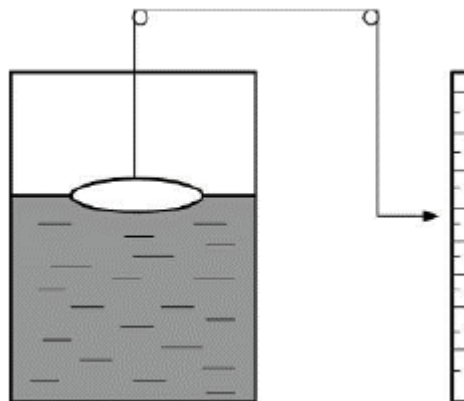


Рис. 2 – Поплавковый уровнемер.

### **Буйковые уровнемеры**

Буйковые уровнемеры (рис. 3) имеют погруженный буюк, плотность которого больше, чем плотность жидкости. Он работает по принципу изменения выталкивающей (архимедовой) силы, действующей на буюк, который удерживается в подвешенном состоянии упругим элементом (пружиной).

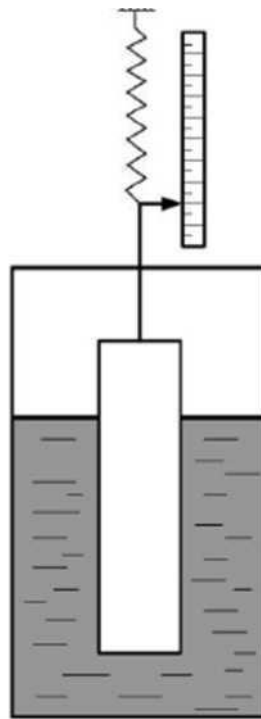


Рис. 3 – Буйковый уровнемер

### **Гидростатические уровнемеры.**

Гидростатические уровнемеры. Их действие основано на взаимосвязи гидростатического давления столба жидкости  $P$  и измеряемого уровня  $h$  при постоянной плотности  $\rho$ .

$$P = \rho gh$$

Различают следующие виды гидростатических уровнемеров:

1) с манометром, подключенным к емкости на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня (рис.4а)

2) с дифференциальным манометром, подключенным к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня и к уравнительной емкости. Для измерения уровня в открытых резервуарах, находящихся под атмосферным давлением, используется схема (рис. 4б), а в аппаратах под давлением – (рис. 4в). В дифференциальных манометрических уровнемерах уровень жидкости определяется по перепаду давлении столбов жидкости в аппарате и в уравнительном сосуде.

3) пневматические, действие которых (рис.4г) основано на измерении давления воздуха или газа, прокачиваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, уровень которой измеряют.

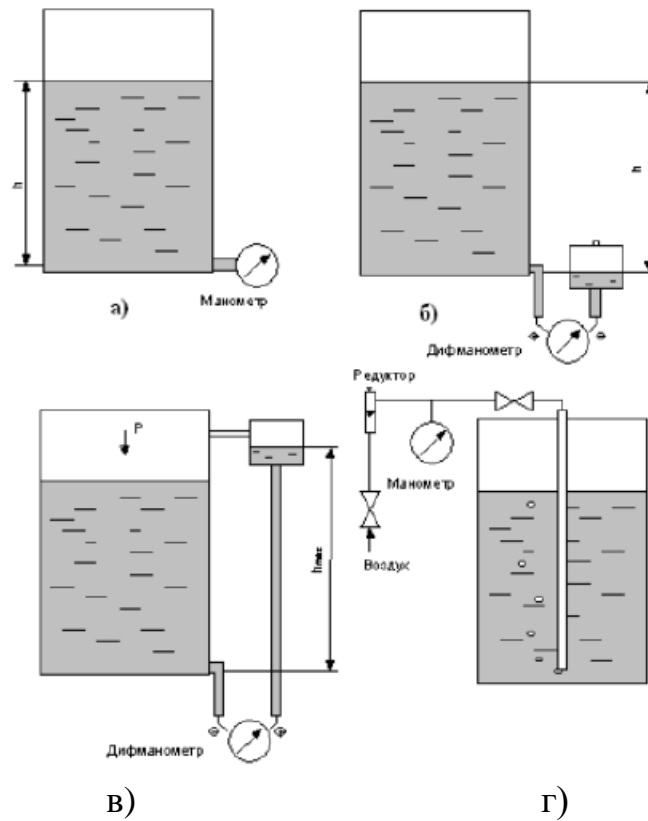


Рис. 4 – Гидростатические уровнемеры.

### **Вибрационные сигнализаторы уровня**

Вибрационные датчики уровня используются в качестве надежных сигнализаторов уровня жидких и сыпучих веществ различной плотности и вязкости в широком диапазоне давлений и температур (рис. 22, 23, 24).



Рис. 5 – Вибрационные сигнализаторы уровня

Принцип действия датчика - вибрационный, основанный на различии резонансных колебаний чувствительного элемента - камертонного резонатора в газовой (воздушной) среде и в жидкости (сыпучем материале). Пьезоэлектрический кристалл при подаче на него напряжения создает

колебания чувствительной вибрационной вилки с частотой – 1300 Гц. Изменения этой частоты колебаний камертонного резонатора в свободном и задемпфированном материалом состоянии отслеживаются электроникой в непрерывном режиме. При погружении вилки в жидкость или сыпучий продукт частота колебания вилки уменьшаются, что приводит к переключению контактов сигнализатора. Аналогично при снижении уровня жидкости или сыпучего продукта вилка переходит в состояние «сухой контакт», при этом частота колебаний вилки увеличивается, что приводит к обратному переключению контактов. Сигнал об изменении состояния контактов подается в систему управления или на исполнительные механизмы (насосы, клапаны и т. п.).

### **Емкостные уровнемеры**

Электрические уровнемеры. По виду чувствительного элемента электрические средства измерения уровня подразделяют на емкостные и кондуктометрические (омические).

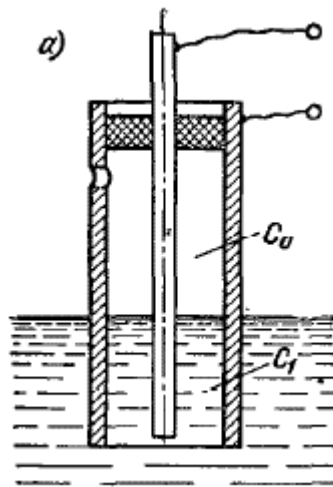


Рис.6 – Емкостной уровнемер

Для измерения уровня жидких диэлектриков применяют емкостные уровнемеры (рис.6). Чувствительным элементом последних служит конденсатор, между вертикально установленными обкладками которого находится измеряемая среда. Емкость электрического конденсатора зависит от коэффициента диэлектрической проницаемости. У измеряемой среды и газа над ней эти коэффициенты существенно различны. Изменение уровня приводит к изменению общего коэффициента диэлектрической проницаемости и емкости чувствительного элемента. Значение этой емкости преобразуется в пропорциональный сигнал с помощью электронного преобразователя. Емкостные уровнемеры можно также использовать для



измерения уровня как жидких, так и сыпучих сред. Для измерения уровня электропроводных жидкостей один из электродов датчика покрывают фторопластовой изоляцией.

Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов: конденсатор  $C_1$  образован частью электродов и диэлектриком – жидкостью, уровень которой измеряется, конденсатор  $C_0$  – остальной частью электродов и диэлектриком – воздухом. Емкость преобразователя

$$C = C_1 + C_0 = [l\varepsilon + (l_0 - l)\varepsilon_0] \frac{2\pi}{\ln R_1/R_2} \quad (15.1)$$

где  $l_0$  – полная длина цилиндра;  $l$  – длина, на которую цилиндр заполнен жидкостью;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость жидкости;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

### **Кондуктометрические уровнемеры**

Кондуктометрические уровнемеры (рис. 7) предназначены для сигнализации уровня электропроводящих жидких и сыпучих сред с удельной проводимостью более  $10^{-3}$  См/м. При достижении уровнем заданного значения ( $h$ ) замыкается электрическая цепь между двумя электродами. При этом срабатывает реле, контакты которого включены в схему сигнализации.

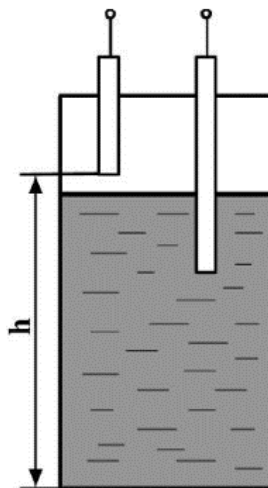


Рис. 7 – Кондуктометрический уровнемер

### **Акустические и ультразвуковые уровнемеры**

Этот метод позволяет измерять уровень при отсутствии контакта с контролируемой средой и в труднодоступных местах. В настоящее время предложены различные принципы построения акустических уровнемеров, из которых широкое распространение получил принцип локации. В соответствии с этим принципом измерение уровня осуществляют по времени прохождения акустическими колебаниями расстояния от излучателя до границы раздела

двух сред и обратно до приёмника излучения (рис. 8). То есть, уровень среды  $h$  в резервуаре определяется по времени запаздывания  $\tau$  отраженного сигнала относительно посланного при известной скорости распространения звука  $a$  в рабочей среде:

$$\tau = 2h/a$$

Локация границы раздела двух сред осуществляется либо со стороны газа, либо со стороны рабочей среды (жидкости или сыпучего материала). Уровнемеры, в которых локация границы раздела двух сред осуществляется через газ, называют акустическими, а уровнемеры с локацией границы раздела двух сред через слой рабочей среды – ультразвуковыми.

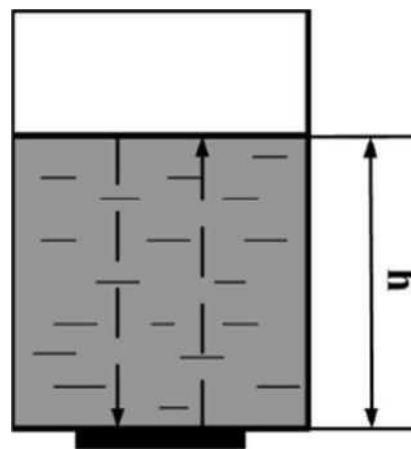


Рис. 8 – Ультразвуковой уровнемер.

### **Микроволновые радарные уровнемеры**

Радарные уровнемеры - наиболее универсальные средства измерения уровня и подобно акустическим уровнемерам, используют явление отражения электромагнитных колебаний от плоскости раздела сред жидкость-газ (рис. 9). Датчик уровня построен по принципу радиолокатора. Это один из классических методов радарного (радиолокационного) измерения расстояния позволяющий минимизировать влияние паразитных помех и помех, связанных с неровностями (волнениями) поверхности измеряемого объекта.

Радарные датчики уровня не имеют контакта с измеряемым объектом. Это позволяет использовать их в сложных условиях, в частности, при высоком давлении, высоких температурах, при нахождении паров и газов над поверхностью. Также они могут применяться для измерения уровня агрессивных, вязких, неоднородных жидких и сыпучих материалов.

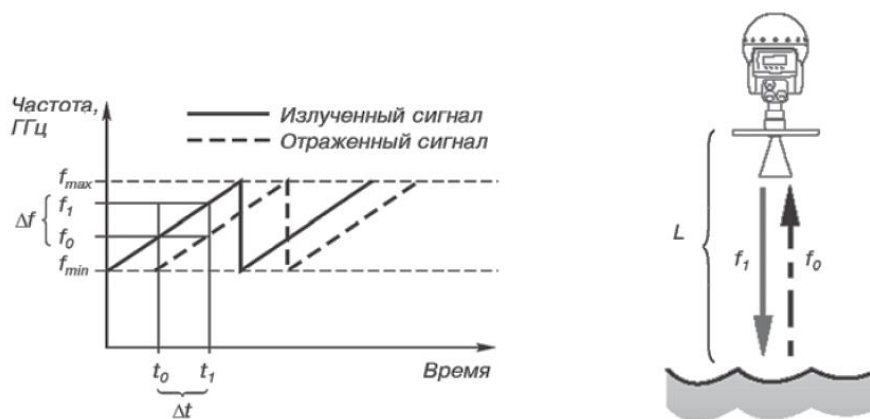


Рис. 9 – Принцип измерения расстояния до поверхности

**Радиоизотопные уровнемеры**

Измерение уровня жидкости этими приборами основано на изменении интенсивности радиоактивного излучения при прохождении его через слой жидкости. Источник и приемник излучения расположены снаружи с противоположных сторон аппарата, уровень жидкости в котором измеряется. Если уровень жидкости изменяется относительно линии, соединяющей источник и приемник излучения, то последний фиксирует изменение интенсивности излучения. Это изменение преобразуется в электронном блоке в электрический сигнал, который измеряется вторичным прибором.

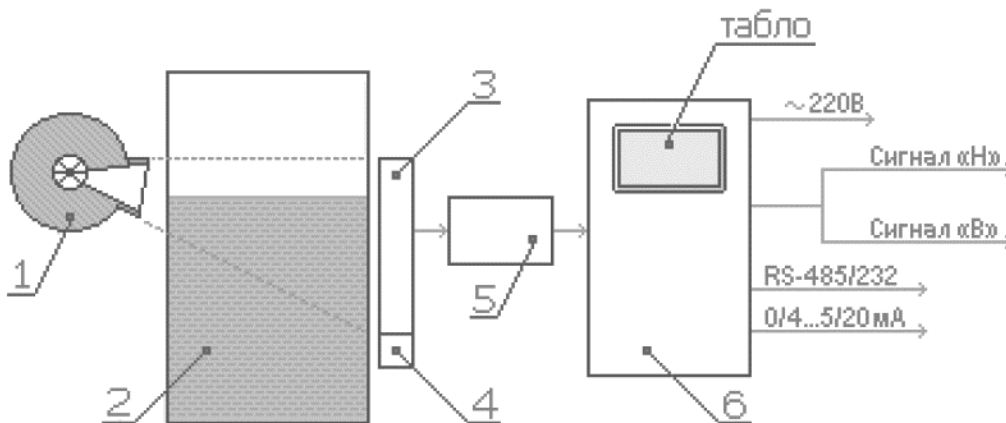


Рис. 10 – Измерение уровня с использованием блока гамма источника:

- 1 - блок гамма источника; 2 - емкость, бункер (аппарат);
- 3 - блок детектирования; 4 - преобразователь температуры;
- 5 - блок согласования; 6-устройство индикации

Радиоизотопные уровнемеры применяют для измерения уровня в закрытых резервуарах, заполненных агрессивной или легковоспламеняющейся жидкостью, а также жидкостью под высоким давлением или при высокой температуре (расплавленные металлы).

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Измерение количества жидкости внутри емкости.
2. Методы измерения уровня жидкости.
3. Типы первичных преобразователей для измерения уровня жидкости.
4. Визуальные, поплавковые и буйковые уровнемеры. Физические основы и принцип действия.
5. Гидростатические уровнемеры. Физические основы и принцип действия.
6. Вибрационные сигнализаторы уровня. Физические основы и принцип действия.
7. Кондуктометрические уровнемеры. Физические основы и принцип действия.
8. Акустические и ультразвуковые уровнемеры. Физические основы и принцип действия.
9. Микроволновые радарные уровнемеры. Физические основы и принцип действия.
10. Радиоизотопные уровнемеры. Физические основы и принцип действия.

## Лекція № 18

**Тема:** Физическая природа воздействий на объект управления.  
Исполнительные устройства

**Оглавление**

Исполнительные устройства и механизмы .....	2
Параметры состояния объекта.....	3
Физическая природа воздействия на объект управления .....	4
Классификация исполнительных механизмов по принципу действия	5
Классификация регулирующих органов, применяемых в системах подачи и перемещения жидких .....	6
Примеры гидравлических регулирующих органов.....	8
Дисковый затвор .....	8
Устройство трёхходового клапана .....	9
Контрольные вопросы по теме .....	12
Уровень модуля.....	12
Уровень курса.....	12

**Источники:**

1. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
2. Рекомендации по Межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения
3. ДСТУ 3651.0-97 ОСНОВНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ. Основні положення, назви та позначення.
4. ДСТУ 3651.1-97 ПОХІДНІ ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ ТА ПОЗАСИСТЕМНІ ОДИНИЦІ. Основні поняття, назви та позначення.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»  
<http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1314-18>

## **Исполнительные устройства и механизмы**

Вспомним, что управление – это деятельность субъекта по изменению объекта для достижения некоторой цели.

Для управления необходимо выполнять следующие три действия:

1. Получать информацию о состоянии объекта, то есть выполнять измерения.
2. Принимать решение о необходимости изменения состояния объекта, выбирать способ воздействия на объект и определять характеристики необходимого управляющего воздействия.
3. Воздействовать на объект.

Для выполнения указанных функций в состав любой системы управления должны входить:

- датчики,
- управляющая система (решающее устройство),
- исполнительные устройства.

В предыдущих лекциях были рассмотрены физические основы явлений, позволяющих получать информацию о состоянии объекта, и принципы действия всех типов параметрических датчиков: резистивных, индуктивных, емкостных, а также некоторых типов генераторных датчиков, в частности, термоэлектрических и пьезоэлектрических.

Рассмотрение процесса выработки решений и алгоритмов формирования управляющих воздействий не входит в рамки настоящего курса. Этому предмету посвящены дисциплины, которые будут изучаться в последующем. Одной из таких дисциплин является "Теория автоматического управления".

В этой лекции мы приступаем к рассмотрению исполнительных устройств. Точнее, к рассмотрению физических принципов, положенных в основу функционирования исполнительных устройств.

**Исполнительные устройства** – это устройства, воздействующие на физические процессы в соответствии с поступающим командными сигналами. Также, как и датчики, исполнительные устройства подбираются для каждой конкретной задачи с учетом необходимой выходной мощности и быстродействия.

**Исполнительные механизмы** – это устройства, которые механически воздействуют на объект контроля путем преобразования электрических сигналов в требуемое управляющее механическое воздействие.

Существуют устройства, которые также оказывают физическое воздействие на объект, но это воздействие не является механическим. К таким воздействиям относятся тепловое воздействие, различные виды облучений: оптическое, радиоактивное, акустическое и другие. Эти воздействия на

объект оказывают путем применения соответствующих элементов. Например, нагрев производят нагревательные элементы, акустическое воздействие выполняют пьезоэлементы, а световое облучение получаем за счет включения осветителей. Весь класс устройств, оказывающих воздействие на объект путем исполнения команд от компьютерно-интегрированных систем, называют исполнительными элементами, исполнительными органами или исполнительными устройствами. Отдельным подклассом этих устройств являются исполнительные механизмы.

### **Параметры состояния объекта**

Какие свойства объекта подвергаются воздействию в ходе управления? Какие параметры, характеризующие состояния объекта, могут быть изменены субъектом? В целом состояние объекта описывается такими основными параметрами:

- Положение объекта (например самолета) в пространстве, а именно:
  - положение центра масс объекта в трех координатах
  - угловое положение объекта относительно трех осей вращения
- Производные от параметров, характеризующих положение:
  - скорость перемещения центра масс объекта в трех направлениях
  - угловая скорость объекта относительно трех осей вращения
  - ускорение центра масс объекта в трех направлениях
  - угловое ускорение объекта относительно трех осей вращения
- Сила, создаваемая или прикладываемая к объекту (например, сила прижатия роликов при производстве листового проката)
- Температура объекта
- Количество вещества внутри объекта
- Скорость изменения количество вещества (расход)
- Давление
- Состав или концентрация веществ

Следует учитывать, что объект управления чаще всего представляет собой систему, то есть состоит из отдельных, связанных частей (Например, в автомобиле: четыре или более колес, двигатель, фары, руль, радиатор и т.д и т.п.). Поэтому, каждая составляющая часть объекта обладает собственными параметрами, характеризующими состояние именно этой части объекта, а общее число параметров состояния объекта пропорционально количеству входящих в систему составных частей. Однако, пропорциональность эта вовсе не является прямой. Почему? Потому что составные части системы связаны друг с другом, поэтому отдельные параметры состояния одной части объекта оказываются связаны с параметрами состояния другой части объекта или даже

объекта в целом. Например, количество оборотов колеса автомобиля точно связано с пройденным расстоянием, то есть, положением автомобиля. Хотя на положение автомобиля в пространстве влияет не только пройденное расстояние, но и углы поворота колес в процессе движения (может даже оказаться, что автомобиль находится на том же месте, где был в начале движения).

Объектом управления может быть довольно сложная система, такая как автомобиль или самолет, или ракета, а может быть цех химического производства или, например, целая атомная станция. А может быть и более простая система: утюг, обогреватель, автоматическая дверь и т.д. Однако, все эти объекты представляют собой системы, состоящие из отдельных, связанных между собой частей.

### **Физическая природа воздействий на объект управления**

---

Несмотря на большое разнообразие параметров состояния объекта все способы воздействия на эти параметры могут быть сведены к следующим:

- создание поступательного движения с изменяемой скоростью движения
- создание вращательного движения с изменяемой скоростью вращения
- подача электрического тока изменяемой силы
- подача жидкого вещества с изменяемым расходом
- подача газообразного вещества с изменяемым расходом
- подача сыпучего вещества с изменяемым расходом.

Например:

Перемещение автомобиля производится за счет создания вращательного движения колеса.

Скорость вращения колеса автомобиля регулируется расходом топлива, подаваемого в двигатель.

Сила прижатия роликов к листу регулируется поступательным перемещением роликов в направлении, перпендикулярном поверхности листа.

Температура объекта регулируется путем изменения силы тока, пропускаемого через нагреватели или изменением скорости подачи жидкого теплоносителя.

Количество вещества в емкости регулируется за счет расхода, с которым вещество поступает в емкость, путем изменения скорости вращения оси насоса или изменением поперечного сечения магистрали подачи вещества (дросселированием)



## Классификация исполнительных механизмов по принципу действия

Классификация исполнительных механизмов (рис. 1) производится в первую очередь по виду энергии, создающей усилие (момент) перемещения регулирующего органа. Соответственно, ИМ бывают пневматические, гидравлические и электрические.

В **пневматических** ИМ усилие перемещения создается за счет давления сжатого воздуха на мембрану, поршень или сильфон.

В **гидравлических** ИМ усилие перемещения создается за счет давления жидкости на мембрану, поршень или лопасть; давление жидкости в них обычно находится в пределах  $(2,5-20)10^3$  кПа.

Пневматические и гидравлические мембранные и поршневые ИМ подразделяются на *пружинные* и *беспружинные*. В пружинных ИМ усилие перемещения в одном направлении создается давлением в рабочей полости ИМ, а в обратном направлении – силой упругости сжатой пружины. В беспружинных ИМ усилие перемещения в обоих направлениях создается перепадом давления на рабочем органе механизма.

**Электрические** ИМ по принципу действия подразделяются на электродвигательные (электромашинные) и электромагнитные.

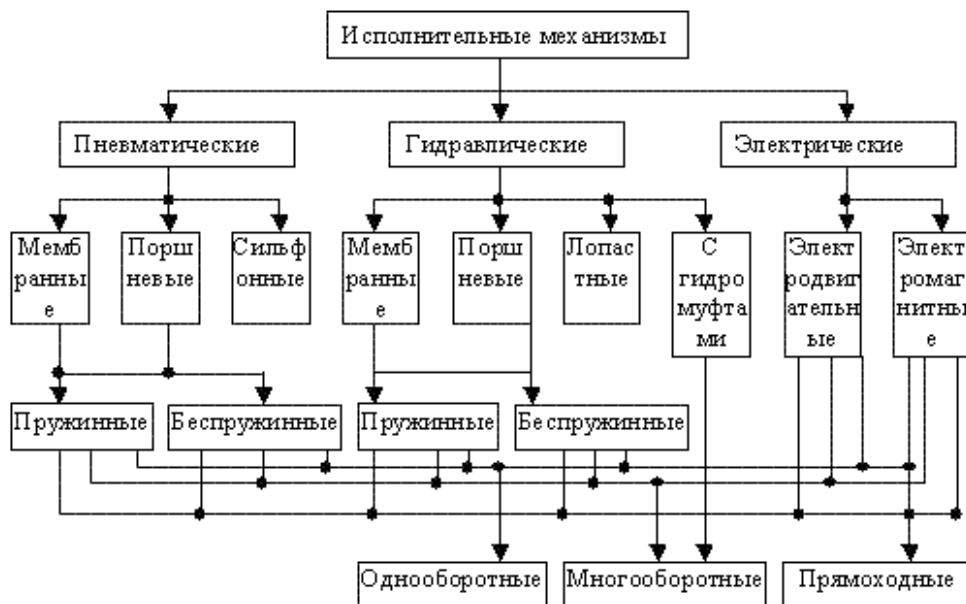


Рис. 1 – Классификация исполнительных механизмов

По характеру движения выходного элемента большинство ИМ подразделяются на: *прямоходные* с поступательным движением выходного элемента, *поворотные* с вращательным движением до  $360^\circ$  (*однооборотные*) и с *вращательным движением* на угол более  $360^\circ$  (*многооборотные*).

Существуют ИМ, в которых используются одновременно два вида энергии: электропневматические, электрогидравлические и пневмогидравлические. Вид энергии управляющего сигнала может отличаться от вида энергии, создающей усилие перемещения.

В электрических системах автоматизации и управления наиболее широко применяются электромашинные и электромагнитные исполнительные механизмы.

Множество регулирующих органов также многообразно, как многообразны объекты управления. В качестве примера можно привести основные типы РО, применяемых в системах подачи и перемещения жидких, газообразных и сыпучих материалов. По виду воздействия на объект их можно подразделить на два основных типа: *дросселирующие* и *дозировующие*.

**Дросселирующие РО** изменяют сопротивление (гидравлическое, аэродинамическое) в системе путем изменения своего проходного сечения, воздействуя на расход вещества. Примерами таких РО являются заслонки, диафрагмы, задвижки, краны, клапаны.

**Дозировующие РО** выполняют заданное дозирование поступающего вещества или энергии за счет изменения производительности определенных агрегатов: дозаторов, насосов, компрессоров, питателей, электрических усилителей мощности.

### **Классификация регулирующих органов, применяемых в системах подачи и перемещения жидких**

Более полная классификация исполнительных механизмов может быть представлена следующим образом:

<b>Классификационный признак</b>	<b>Краткие характеристики классификационного признака</b>
1. По назначению работы	- Запорные (отсечные, предохранительные) - Регулирующие (задвижки) - Запорно-регулирующие клапаны (КЗР)
2. По типу рабочего регулирующего органа	- Седельные (односедельные, двухседельные, трехходовые) - Заслоночные (с диафрагменной заслонкой) - Клеточные - Шаровые - Пробковые - Дисковые поворотные затворы и заслонки - Пилотные
3. По виду перемещения регулирующего органа	- Однооборотные (МЭО рычажные), неполноповоротные (0,25 - 0,63 об.) фланцевые (МЭОФ) - Многооборотные регулирующие задвижки с постоянной скоростью (МЭМ)

	- Прямоходные поступательного действия для прямолинейного перемещения регулирующих органов с постоянной скоростью (МЭП, МЭПК, КЗР, краны)
4. По управлению направлениями потоков	- Прямые - Угловые
5. По типу управления потоками	- Двухходовые (запорные) - Трехходовые (распределительные, смесительные) - Четырехходовые (распределительные, смесительные)
6. По типу управляющего сигнала	- Пневматические - Электрические, электропневматические - Гидравлические
7. По типу привода	- Механический - Электромеханический - Электропневматический - Пневматический (мембранный, поршневой, лопастный) - Пневмомеханический - Пневмогидравлический - Гидравлический
8. По исполнению вида исполнительного устройства	- НО - нормально открытые - НЗ - нормально закрытые - произвольного положения
9. По пропускной характеристике $K_v$ (сигнал - положение ИМ)	- Линейные. Обеспечивается пропорциональная зависимость между пропускной способностью клапана и ходом плунжера (затвора) - Равнопроцентные (экспоненциальные, логарифмические). Обеспечивается приращение пропускной способности клапана пропорционально текущему значению пропускной способности клапана, т.е. чем больше ход клапана, тем больше увеличивается $K_v$ на единицу хода
10. По виду управляющего сигнала	- Аналоговые - Дискретные 2-х позиционные (статические и динамические) - Дискретные 3-х позиционные (статические и динамические)
11. По оснащению дополнительным оборудованием	- МПУ (HART, интерфейс), команда (управление, конфигурация) - состояние (оборудования) - Позиционер (пропорциональный ИМ) - Пилотный механизм - Ручной дублер (для ручного управления регулирующим органом) - Указатель положения регулирующего органа индуктивный, реостатный, токовый - Датчики крайних положений, блоки концевых выключателей

## Примеры гидравлических регулирующих органов

Для ознакомления рассмотрим принцип действия гидравлических регулирующих органов на двух примерах.

### *Дисковый затвор*



Рис. 2 – Дисковый затвор

Дисковый затвор – тип трубопроводной арматуры, в котором запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды. Также эти устройства называют заслонками, поворотными затворами, герметичными клапанами, гермоклапанами. Наиболее часто такая арматура применяется при больших диаметрах трубопроводов, малых давлениях среды и пониженных требованиях к герметичности рабочего органа, в основном в качестве запорной арматуры.

В дисковых затворах запирающий элемент, то есть затвор, имеет форму диска, который может перекрывать проход рабочей среде через кольцевое седло в корпусе путём поворота (как правило на  $90^\circ$ ) затвора вокруг оси, перпендикулярной направлению потока среды, при этом ось вращения диска может являться его собственной осью (осевые дисковые затворы) или же не совпадать с осью (эксцентриковые дисковые затворы). В связи с некоторой схожестью формы затвора с бабочкой, в англоязычных странах дисковые затворы носят название butterfly valve.

**Применение:**

- для систем водо- и теплоснабжения;
- в гидроэнергетике и гидротехнике;
- вентиляции и кондиционирования;
- газоснабжения и газораспределения;
- на спец. среды (абразивные среды, слабоагрессивные среды, бензин, морская вода и т.д.)
- для систем пожаротушения.

**Устройство трёхходового клапана**

Рис. 3 –Трёхходовой клапан седельной конструкции

**Устройство трёхходового клапана седельной конструкции.** На поступательно перемещающемся штоке закреплен затвор, который в крайнем верхнем положении перекрывает патрубок А, полностью открывая патрубок В, а в крайнем нижнем положении перекрывает патрубок В, полностью открывая патрубок А. Независимо от положения штока, расход теплоносителя через патрубок АВ не изменяется (при условии правильного подбора клапана).

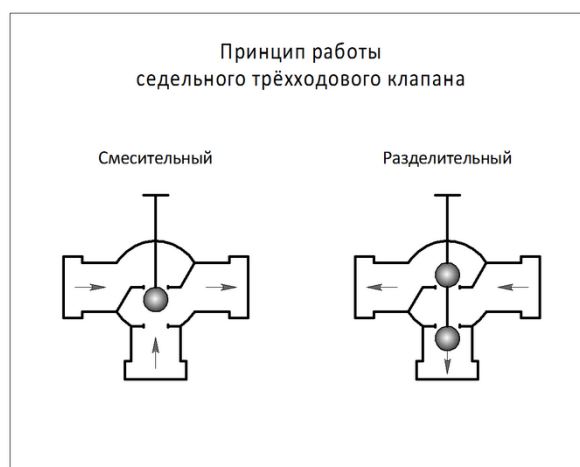


Рис. 4 – Принцип действия трёхходового клапана седельной конструкции

Седельные трёхходовые клапаны управляются линейными электроприводами с поступательно перемещающимся штоком. Выбирая привод регулирующего клапана, следует иметь в виду, что у большинства седельных клапанов при перемещении штока вниз, прямой ход (А) - открывается, а байпасный (В) - закрывается.

Конструкция затвора седельного клапана зависит от необходимого закона регулирования по каждому из ходов и от того, предназначен ли клапан для разделения, либо для смешения потока.

Порты В и А в седельных клапанах, могут иметь различную конфигурацию пары затвор – седло, что позволяет создать различную регулировочную характеристику для каждого из портов в зависимости от потребности объекта регулирования.

По сравнению с поворотным, седельный трёхходовой клапан обеспечивает более высокую точность регулирования, большую плотность перекрытия потока, способен работать при высоких температурах и перепадах давления регулируемого потока, но и цена его значительно выше.



Рис. 5 – Принцип действия трёхходового клапана поворотной конструкции

**Устройство трёхходового клапана поворотной конструкции.** На радиально вращающемся штоке с углом поворота  $90^\circ$  закреплён затвор, перекрывающий в крайнем левом положении порт В, а в крайнем правом – порт А. Независимо от положения штока, расход теплоносителя через порт АВ остаётся постоянным (при условии правильного подбора клапана).

Поворотные трёхходовые клапаны управляются ротационными приводами с радиально вращающимся штоком.

В конструкции трёхходового клапана предусмотрено три патрубка (хода):

1. Прямой ход, обозначается литерой - А – расход воды может изменяться в пределах от нулевого до максимального (АВ) – патрубок может быть полностью перекрыт;

2. Байпасный ход (перпендикулярный), обозначается литерой – В – расход воды может изменяться в пределах от нулевого до максимального (АВ) – патрубок может быть полностью перекрыт;

3. Общий вход/выход, обозначается литерами - АВ – расход воды изменяется в зависимости от состояния клапана, но полностью патрубок перекрыт быть не может.

По типу присоединения к трубопроводу выпускают фланцевые трёхходовые клапаны и резьбовые. На трубопроводах с диаметром условного прохода до 65 мм, рабочим давлением до 16 бар и температурой до 130°C, как правило, устанавливают клапаны с резьбовым присоединением, а в остальных случаях с фланцевым.

## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Исполнительные устройства и механизмы.
2. Параметры состояния объекта.
3. Физическая природа воздействий на объект управления.
4. Классификация исполнительных механизмов по принципу действия.



## Лекція № 19

**Тема:** Электрические исполнительные механизмы**Оглавление**

Назначение, устройство и принцип действия электрических исполнительных механизмов.....	2
Классификация электрических исполнительных механизмов.....	3
Основные группы электрических исполнительных механизмов ....	3
Контактное и бесконтактное управление электрическими исполнительными механизмами.....	4
Разделение электрических исполнительных механизмов по характеру движения и характеру действия .....	5
Виды управляющих сигналов.....	6
Контрольные вопросы по теме .....	9
Уровень модуля.....	9
Уровень курса.....	9

**Источники:**

1. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. 6-е изд. — СПб.: Питер, 2013. — 816 с.: ил.  
<https://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=4956359>
2. Бабак В.П. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Ерёменко и др. – К., 2014. – 832 с.

## Назначение, устройство и принцип действия электрических исполнительных механизмов

Электрическим исполнительным механизмом в системах управления обычно называют устройство, предназначенное для перемещения рабочего органа в соответствии с сигналами, поступающими от управляющего устройства.

Рабочими органами могут быть различного рода дроссельные заслонки, клапаны, задвижки, шиберы, направляющие аппараты и другие регулирующие и запорные органы, способные производить изменение количества энергии или рабочего вещества, поступающего в объект управления. При этом перемещение рабочих органов может быть как поступательным, так и вращательным в пределах одного или нескольких оборотов. Следовательно, исполнительный механизм с помощью рабочего органа осуществляет непосредственное воздействие на управляемый объект.

В общем случае электрический исполнительный механизм состоит из электропривода, редуктора, узла обратной связи, датчика указателя положения выходного элемента и конечных выключателей.



В качестве электропривода в исполнительных механизмах используются либо электромагниты, либо электродвигатели с понижающим редуктором для снижения скорости перемещения выходного элемента до величины, обеспечивающей возможность непосредственного соединения этого элемента (вала или штока) с рабочим органом.

Узлы обратной связи предназначены для введения в контур регулирования воздействия, пропорционального величине перемещения выходного элемента исполнительного механизма, а, следовательно, и сочлененного с ним рабочего органа. С помощью конечных выключателей производится отключение электропривода исполнительного механизма при достижении рабочим органом своих конечных положений во избежание возможных повреждений механических звеньев, а также для ограничения перемещения рабочего органа.

Как правило, мощность сигнала, вырабатываемого регулирующим устройством, бывает недостаточной для непосредственного перемещения рабочего органа, поэтому исполнительный механизм можно рассматривать как усилитель мощности, в котором слабый входной сигнал, усиливаясь во много раз, передается на рабочий орган.

## Классификация электрических исполнительных механизмов

### Основные группы электрических исполнительных механизмов

Все электрические исполнительные механизмы, нашедшие широкое применение в самых различных отраслях современной техники автоматизации производственных процессов, можно разделить на две основные группы:



- 1) электромагнитные
- 2) электродвигательные.

К первой группе относятся прежде всего **соленоидные электроприводы**, предназначенные для управления различного рода регулирующими и запорными клапанами, вентилями, золотниками и т. п. Сюда же можно отнести исполнительные механизмы с различными видами электромагнитных муфт. Характерная особенность электрических исполнительных механизмов этой группы состоит в том, что необходимое для перестановки рабочего органа усилие создается за счет электромагнита, являющегося неотъемлемой частью исполнительного механизма.



Рисунок 19.1 Классификация электрических исполнительных механизмов

Для целей регулирования соленоидные механизмы обычно применяются только в системах двухпозиционного регулирования. В системах автоматического управления в качестве исполнительных элементов часто

используются электромагнитные муфты, которые подразделяются на муфты трения и муфты скольжения.

Ко *второй*, наиболее распространенной в настоящее время группе относятся электрические исполнительные механизмы *с электродвигателями* различных типов и конструкций.

Электродвигательные исполнительные механизмы обычно состоят из двигателя, редуктора и тормоза (последнего иногда может и не быть). Сигнал управления поступает одновременно к двигателю и тормозу, механизм растормаживается и двигатель приводит в движение выходной орган. При исчезновении сигнала двигатель выключается, а тормоз останавливает механизм. Простота схемы, малое число элементов, участвующих в формировании регулирующего воздействия, и высокие эксплуатационные свойства сделали исполнительные механизмы с управляемыми двигателями основой для создания исполнительных устройств современных промышленных систем автоматического регулирования.

Существуют, хотя и не получили широкого распространения, исполнительные механизмы с неуправляемыми двигателями, которые содержат управляемую электрическим сигналом механическую, электрическую либо гидравлическую муфту. Характерной их особенностью является то, что двигатель в них работает непрерывно все время работы системы регулирования, а сигнал управления от регулирующего прибора передается рабочему органу через управляемую муфту

### ***Контактное и бесконтактное управление электрическими исполнительными механизмами***

Исполнительные механизмы с управляемыми двигателями в свою очередь можно разделить по способу построения системы управления на механизмы с контактным и бесконтактным управлением.

Включение, отключение и реверсирование электродвигателей исполнительных механизмов с **контактным управлением** производится с помощью различной релейной или контактной аппаратуры. Это определяет основную отличительную особенность исполнительных механизмов с контактным управлением: у таких механизмов скорость выходного органа не зависит от величины управляющего сигнала, подаваемого на вход исполнительного устройства, а направление перемещения определяется знаком (или фазой) этого сигнала. Поэтому исполнительные механизмы с контактным управлением относят обычно к



исполнительным устройствам с постоянной скоростью перемещения рабочего органа.

Для получения средней переменной скорости перемещения выходного органа исполнительного механизма при контактном управлении широко используется импульсный режим работы его электродвигателя.

В большинстве исполнительных механизмов, предназначенных для работы в схемах с контактном управлением, используются реверсивные электродвигатели. Применение электродвигателей, вращающихся только в одну сторону, весьма ограничено, но все же имеет место.

**Бесконтактные** электрические исполнительные механизмы отличаются повышенной надежностью и позволяющие относительно просто получать как постоянную, так и переменную скорость перемещения выходного органа. Для бесконтактного управления исполнительными механизмами используются электронные, магнитные или полупроводниковые усилители, а также их сочетание. При работе управляющих усилителей в релейном режиме скорость перемещения выходного органа исполнительных механизмов постоянна.

### ***Разделение электрических исполнительных механизмов по характеру движения и характеру действия***

Как электрические исполнительные механизмы с контактном управлением, так и бесконтактные можно подразделять также по следующим признакам.

- По характеру движения: однооборотные, многооборотные, прямоходные.
- По характеру действия: позиционного действия; пропорционального действия.
- По исполнению: в нормальном исполнении, в специальном исполнении (пылеводозащищенном, взрывозащищенном, тропическом, морском и т. п.).

Выходной вал **однооборотных** исполнительных механизмов может вращаться в пределах одного полного оборота. Такие механизмы характеризуются величиной крутящего момента на выходном валу и временем его полного оборота.

В отличие от однооборотных **многооборотных механизмов**, выходной вал которых может осуществлять перемещение в пределах нескольких, иногда значительного количества, оборотов, характеризуются также полным числом оборотов выходного вала.



**Прямоходные** механизмы имеют поступательное движение выходного штока и оцениваются усилием на штоке, величиной полного хода штока, временем его перемещения на участке полного хода и по скорости движения выходного органа в оборотах в минуту для однооборотных и многооборотных и в миллиметрах в секунду для прямоходных механизмов.

Конструкция исполнительных механизмов **позиционного** действия такова, что с их помощью рабочие органы можно устанавливать только в определенные фиксированные положения. Чаще всего таких положений бывает два: «открыто» и «закрыто». В общем случае возможно существование и многопозиционных механизмов. Исполнительные механизмы позиционного действия обычно не имеют устройств для получения сигнала обратной связи по положению выходного органа.

Исполнительные механизмы **пропорционального** действия конструктивно таковы, что обеспечивают в заданных пределах установку рабочего органа в любое промежуточное положение в зависимости от величины и длительности управляющего сигнала. Подобные исполнительные механизмы широко используются в системах автоматического регулирования с пропорциональным, пропорционально-интегральным и пропорционально-интегрально-дифференциальным законом управления.

### **Виды управляющих сигналов**

Простейшим управляющим сигналом является релейный сигнал, который имеет самые разнообразные названия: "**открыт-закрыт**", "вкл-выкл", "on-off", "0-1", двухточечный, двухпозиционный сигнал и т.д. Этот сигнал применяется для управления пружинными механизмами, которые могут находиться только в двух состояниях, например, "открыто" (1) или "закрыто" (0). Для того чтобы установить сигнал в положение "открыто" (1) необходимо подать заданное напряжение (это может быть 5В или 10В, или 30В или 220В – зависит от самого устройства, которым управляют) достаточной мощности. Если напряжение снять (снять сигнал), то пружина вернет исполнительный механизм в закрытое состояние (0).

Другим видом сигнала является так называемый **трехточечный** сигнал (иначе: трехпозиционный, плавающий сигнал и др.), который тоже является релейным, так как имеет только два уровня напряжения: 0 и высокое (это может быть 5В или 10В, или 30В или 220В – зависит от самого устройства,

которым управляют). Двигатель 3-точечного исполнительного механизма вращается в оба направления (по часовой и против часовой стрелки) под воздействием электрических сигналов, определяющих открытие или закрытие. Как только выходное напряжение реле пропадает, исполнительный механизм останавливает свою работу и сохраняет позицию на момент остановки. Стабильность в данной позиции обеспечивается самоблокирующимся устройством.

**Пропорциональный** сигнал – сигнал переменной величины, который несет в себе информацию о требуемом угле поворота ИМ или скорости его вращения. Сигнал обычно имеет так называемую стандартную форму, например, 0-10В или 4-20мА. Исполнительный механизм переходит в позицию, заданную управляющим сигналом или же начинает вращаться с заданной скоростью.

Сигналы **ШИМ** – сигналы с широтно-импульсной модуляцией. Широтно-импульсная модуляция – процесс управления мощностью, подводимой к нагрузке, путём изменения скважности импульсов, при постоянной частоте.

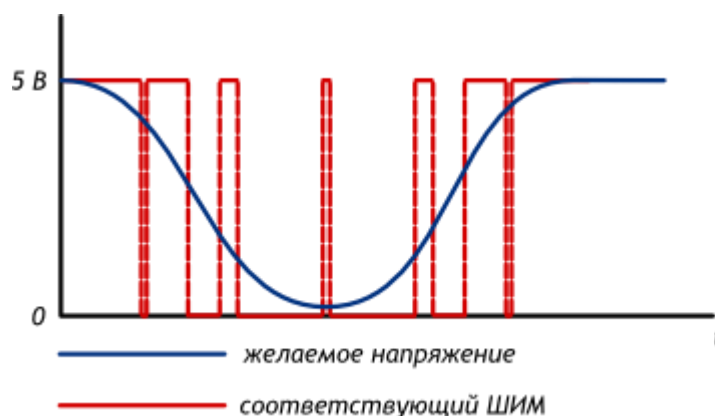


Рисунок 19.2 Широтно-импульсная модуляция.

При помощи ШИМ легко управлять количеством тепла, отдаваемого нагревателем. ШИМ часто используется для управления скоростью вращения вала двигателя. В этом случае частоту вращения двигателя регулируют не величиной постоянно подводимого напряжения, а длительностью питания двигателя номинальным напряжением. Одна из возможных схем импульсного управления приведена на рис. 19.3, а. Там же (рис. 19.3, б) показаны графики скорости при различных  $t$ .

В период, когда электронный ключ открыт, питающее напряжение полностью подается на двигатель, ток якоря увеличивается, двигатель развивает положительный момент и частота вращения возрастает; когда электронный ключ закрыт, ток под действием запаса электромагнитной энергии продолжает протекать в том же направлении, но через обратный диод.

При этом ток уменьшается, момент двигателя уменьшается, угловая скорость вращения падает.

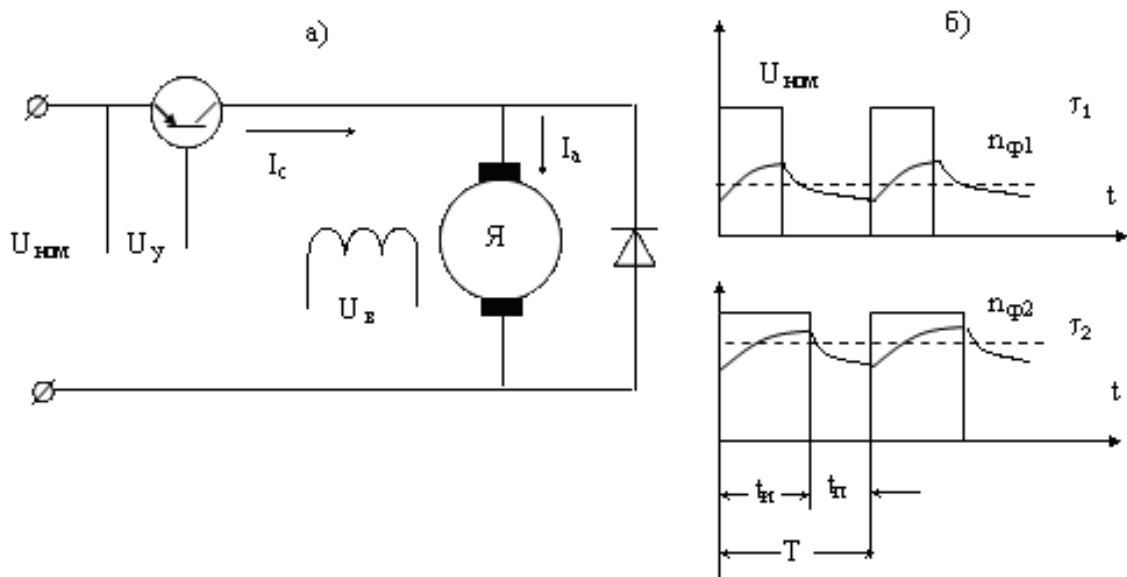


Рис. 19.3. Схема импульсного управления (а), графики скорости вращения (б) при разных  $\tau$  ( $\tau_2 > \tau_1$ ).

Работа двигателя состоит из чередующихся периодов разгона и торможения. И, если эти периоды малы по сравнению с электромагнитной постоянной времени якорной цепи, устанавливается некая средняя скорость, однозначно определяемая относительной продолжительностью включения (скважностью)  $t = t_u/T$ , где  $t_u$  - длительность импульса напряжения;  $T$  - период.



## **Контрольные вопросы по теме**

---

### ***Уровень модуля***

### ***Уровень курса***

1. Назначение, устройство и принцип действия электрических исполнительных механизмов.
2. Основные группы электрических исполнительных механизмов.
3. Контактное и бесконтактное управление электрическими исполнительными механизмами.
4. Разделение электрических исполнительных механизмов по характеру движения и характеру действия.
5. Виды управляющих сигналов.

## Лекція № 20

**Тема:** Физические основы управления электрическими двигателями

## Содержание

Электродвигатели .....	2
Конструкция электродвигателя .....	3
Основные типы электродвигателей .....	4
Коллекторные электродвигатели .....	4
Коллекторный электродвигатель постоянного тока .....	4
Бесколлекторные электродвигатели .....	6
Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором .....	6
Перечень применяемых типов электродвигателей.....	7
Основные параметры электродвигателя.....	7
Принципы управления коллекторными электродвигателями постоянного тока.....	9
Импульсное управление.....	10
Схема прямого включения асинхронного электродвигателя.....	11
Схема реверсивного включения электродвигателя.....	13
Принцип действия частотного преобразователя .....	14
Физические основы функционирования шаговых электрических двигателей.....	16
Физические основы функционирования пьезоэлектрических двигателей.....	17
Контрольные вопросы по теме .....	19
Уровень модуля.....	19
Уровень курса.....	19

**Источники:**

## Электродвигатели

### Назначение

Электрический двигатель, сокращенно электродвигатель – электрическая машина, с помощью которой электрическая энергия преобразуется в механическую, для приведения в движение различных механизмов. Электродвигатель является основным элементом электропривода.

В некоторых режимах работы электропривода электродвигатель осуществляет обратное преобразование энергии, то есть работает в режиме электрического генератора.

По виду создаваемого механического движения электродвигатели бывают вращающиеся, линейные и др. Под электродвигателем чаще всего подразумевается вращающийся электродвигатель, так как он получил наибольшее применение.

### Области применения электродвигателей

Электродвигатели являются крупнейшими потребителями электроэнергии в мире, на них приходится около 45% от всей потребляемой электроэнергии.

Электродвигатели используются повсеместно, основные области применения:

- промышленность: насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры, движущая сила для других машин и др.
- строительство: насосы, вентиляторы, конвейеры, лифты, системы отопления, вентиляции и кондиционирование воздуха и др.
- потребительские устройства: холодильники, кондиционеры, персональные компьютеры и ноутбуки (жесткие диски, вентиляторы), пылесосы, стиральные машинки, миксеры и др.

ЭД	Функции	Области применения
Вращающиеся электродвигатели	Насосы	Системы водоснабжения и водоотведения Системы перекачки охлажденной или нагретой воды, системы отопления, системы полива Системы канализации Перекачка нефтепродуктов
	Вентиляторы	Приточно-вытяжная вентиляция, вентиляторы
	Компрессоры	Системы вентиляции, холодильные и морозильные установки Накопление и распределение сжатого воздуха, пневматические системы

		Системы сжижения газа, системы перекачки природного газа
	Вращение, смешивание, движение	Прокатный стан, станки: обработка металла, камня, пластика Прессовое оборудование: обработка алюминия, пластиков Обработка текстиля: ткачество, стирка, сушка Смешивание, взбалтывание: еда, краски, пластики
	Транспорт	Пассажирские лифты, эскалаторы, конвейеры Грузовые лифты, подъемные краны, подъемники, конвейеры, лебедки Транспортные средства: поезда, трамваи, троллейбусы, автомобили, электромобили, автобусы, мотоциклы, велосипеды, зубчатая железная дорога, канатная дорога
	Угловые перемещения (шаговые двигатели, серводвигатели)	Вентили (открыть/закрыть) Серво (установка положения)
Линейные электродвигатели	Открыть/закрыть Сортировка Хватать и перемещать	Вентили Производство Роботы

### Конструкция электродвигателя

Основными компонентами вращающегося электродвигателя являются статор и ротор. Статор - неподвижная часть, ротор - вращающаяся часть.

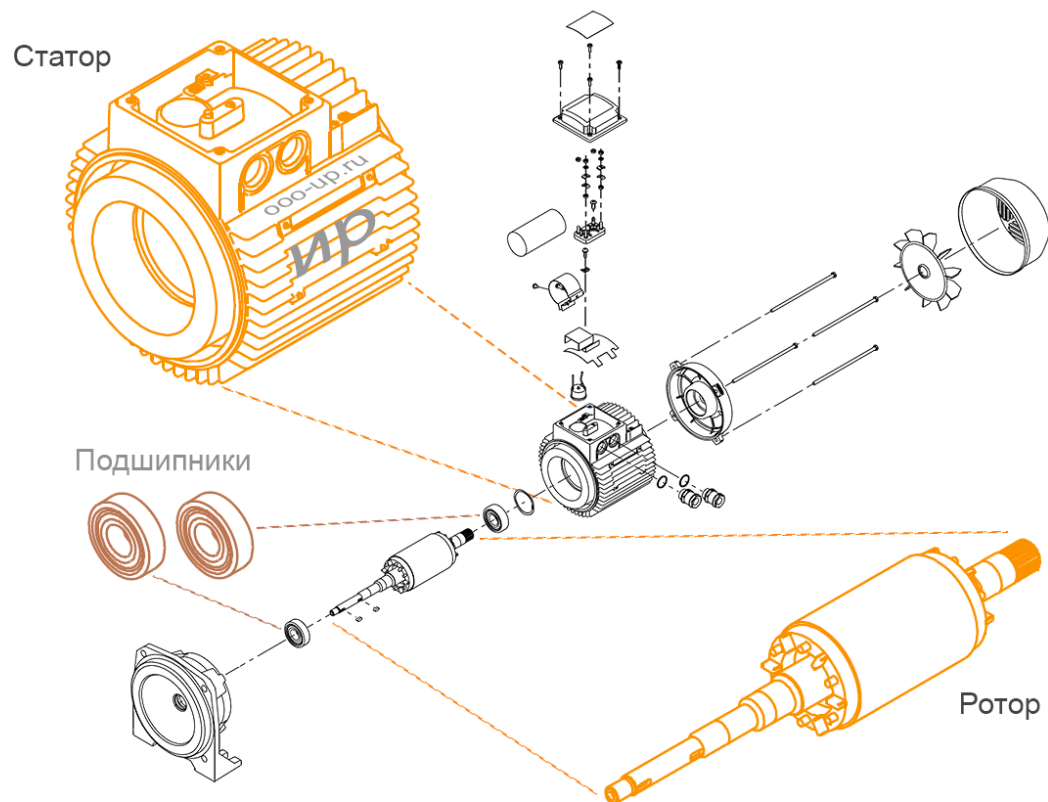


Рис. 1 – Стандартная конструкция вращающегося электродвигателя

У большей части электродвигателей ротор располагается внутри статора. Электродвигатели, у которых ротор находится снаружи статора называются электродвигателями обращенного типа.

## Основные типы электродвигателей

### ***Коллекторные электродвигатели***

Коллекторная машина - вращающаяся электрическая машина, у которой хотя бы одна из обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, соединена с коллектором. В коллекторном двигателе щеточно-коллекторный узел выполняет функцию датчика положения ротора и переключателя тока в обмотках.

### ***Коллекторный электродвигатель постоянного тока***

Коллекторный электродвигатель постоянного тока – вращающаяся электрическая машина постоянного тока, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию, у которой хотя бы одна из обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, соединена с коллектором. Преимуществами электродвигателя постоянного тока являются: высокий пусковой момент, быстрдействие, возможность плавного управления частотой вращения, простота устройства и управления.

Недостатком двигателя является необходимость обслуживания коллекторно-щеточных узлов и ограниченный срок службы из-за износа коллектора.

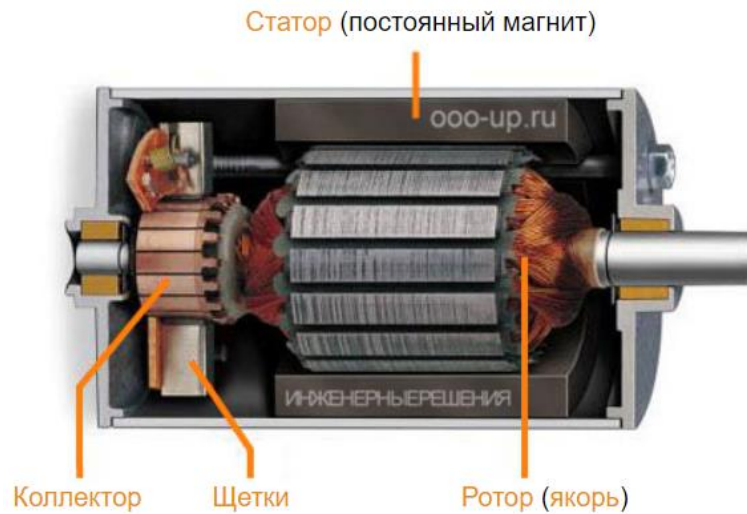


Рис. 2 – Электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами в разрезе

**Ротор** – вращающаяся часть электрической машины.

**Статор** – неподвижная часть двигателя.

**Индуктор** (система возбуждения) – часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, создающая магнитный поток для образования момента. Индуктор обязательно включает либо постоянные магниты, либо обмотку возбуждения. Индуктор может быть частью как ротора, так и статора. В двигателе, изображенном на рис. 1, система возбуждения состоит из двух постоянных магнитов и входит в состав статора.

**Якорь** – часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки. В качестве якоря может выступать как ротор, так и статор. В двигателе, показанном на рис. 1, ротор является якорем.

**Щетки** – часть электрической цепи, по которой от источника питания электрический ток передается к якорю. Щетки изготавливаются из графита или других материалов. Двигатель постоянного тока содержит одну пару щеток или более. Одна из двух щеток соединяется с положительным, а другая – с отрицательным выводом источника питания.

**Коллектор** – часть двигателя, контактирующая со щетками. С помощью щеток и коллектора электрический ток распределяется по катушкам обмотки якоря.

### **Бесколлекторные электродвигатели**

У бесколлекторных электродвигателей могут быть контактные кольца с щетками, таким образом не надо путать бесколлекторные и бесщеточные электродвигатели.

Бесщеточная машина - вращающаяся электрическая машина, в которой все электрические связи обмоток, участвующих в основном процессе преобразования энергии, осуществляются без скользящих электрических контактов.

Трехфазный асинхронный электродвигатель – это асинхронный электродвигатель, который имеет трехфазную обмотку статора.

### **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.

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.



Рис. 3 – Статор асинхронного двигателя



Рис. 4 – 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.

**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.

### **Перечень применяемых типов электродвигателей**

- КДПТ - коллекторный двигатель постоянного тока
- БДПТ - бесколлекторный двигатель постоянного тока
- АДКР - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
- АДФР - асинхронный двигатель с фазным ротором
- СДОВ - синхронный двигатель с обмоткой возбуждения
- СДПМ - синхронный двигатель с постоянными магнитами
- СДПМП - синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов
- СДПМВ - синхронный двигатель со встроенными постоянными магнитами
- СРД - синхронный реактивный двигатель

### **Основные параметры электродвигателя**

#### **Момент электродвигателя**

Вращающий момент (синонимы: вращательный момент, крутящий момент, момент силы) - векторная физическая величина, равная произведению радиус вектора, проведенного от оси вращения к точке приложения силы, на вектор этой силы.

$$M = Fr,$$

где  $M$  – вращающий момент, Нм,

$F$  – сила, Н,

$r$  – радиус-вектор, м

Номинальный вращающий момент  $M_{\text{ном}}$ , Нм, определяют по формуле

$$M_{\text{ном}} = \frac{30P_{\text{ном}}}{\pi \cdot n_{\text{ном}}},$$



где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность двигателя, Вт,

$n_{\text{ном}}$  - номинальная частота вращения, мин<sup>-1</sup>

Начальный пусковой момент - момент электродвигателя при пуске.

### **Мощность электродвигателя**

Мощность электродвигателя – это полезная механическая мощность на валу электродвигателя. Мощность – физическая величина, показывающая какую работу механизм совершает в единицу времени.

$$P = \frac{dA}{dt},$$

где  $P$  – мощность, Вт,

$A$  – работа, Дж,

$t$  - время, с

Работа - скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на направление  $F$  и пути  $s$ , проходимого точкой приложения силы.

$$dA = Fds,$$

где  $s$  – расстояние, м

Для вращательного движения

$$ds = rd\theta,$$

где  $\theta$  – угол, рад,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt},$$

где  $\omega$  – угловая частота, рад/с,

Таким образом можно вычислить значение механической мощности на валу вращающегося электродвигателя

$$P = M\omega$$

Номинальное значение - значение параметра электротехнического изделия (устройства), указанное изготовителем, при котором оно должно работать, являющееся исходным для отсчета отклонений.

### **Коэффициент полезного действия электродвигателя**

Коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя – характеристика эффективности машины в отношении преобразования электрической энергии в механическую.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия электродвигателя,  
 $P_1$  - подводенная мощность (электрическая), Вт,  
 $P_2$  - полезная мощность (механическая), Вт  
 КПД электродвигателя может варьироваться от 10 до 99% в зависимости от типа и конструкции.

### ***Частота вращения***

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}$$

где n - частота вращения электродвигателя, об/мин

### ***Номинальное напряжение***

Номинальное напряжение (англ. rated voltage) - напряжение на которое спроектирована сеть или оборудование и к которому относят их рабочие характеристики.

### ***Электрическая постоянная времени***

Электрическая постоянная времени – это время, отсчитываемое с момента подачи постоянного напряжения на электродвигатель, за которое ток достигает уровня в 63,21% от своего конечного значения.

$$\tau_e = \frac{L}{R},$$

где  $\tau_e$  – постоянная времени, с

### ***Механическая характеристика***

Механическая характеристика двигателя представляет собой графически выраженную зависимость частоты вращения вала от электромагнитного момента при неизменном напряжении питания.

## **Принципы управления коллекторными электродвигателями постоянного тока**

Управление двигателем постоянного тока подразумевает либо изменение скорости вращения пропорционально некоторому сигналу управления, либо поддержание этой скорости неизменной при воздействии внешних дестабилизирующих факторов.

Из уравнения скорости электродвигателя постоянного тока видно, что частота вращения коллекторного электродвигателя постоянного тока напрямую связана с величиной напряжения питания, прикладываемого к двигателю и момента нагрузки.

$$\omega = \frac{U}{K_E} - \frac{M}{\beta}$$

где  $\omega$  - угловая частота, рад/с,  
 $U$  - напряжение питания, В,  
 $K_E$  – постоянная ЭДС, В·с/рад,  
 $M$  - момент электродвигателя, Н·м,  
 $\beta$  - механическая жесткость двигателя.

Таким образом скорость вращения коллекторного двигателя постоянного тока изменяется посредством изменения величины напряжения питания.

### Импульсное управление

На двигатель с помощью импульсного прерывателя подаются импульсы напряжения, модулированные (Широтно-импульсная модуляция – ШИМ) в соответствии с управляющим напряжением.

Таким образом, изменение скорости вращения якоря достигается не за счет изменения напряжения управления, а путем изменения времени, в течение которого к двигателю подводится номинальное напряжение. Очевидно, что работа двигателя состоит из чередующихся периодов разгона и торможения (см. рисунок).

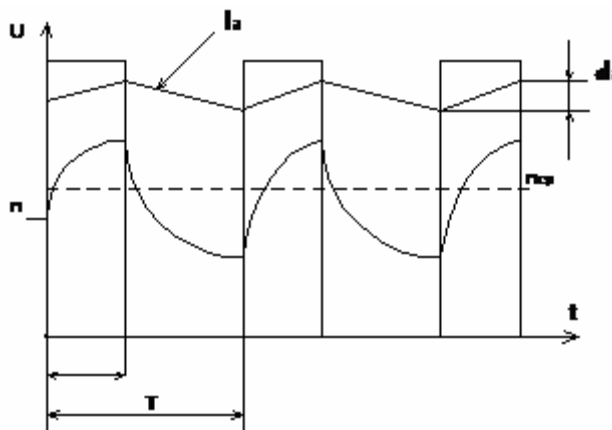


Рис. 5 – Широтно-импульсная модуляция

Если эти периоды малы по сравнению с полным временем разгона и остановки якоря, то скорость  $n$  не успевает к концу каждого периода достигать установившихся значений  $n_{ном}$  при разгоне или  $n = 0$  при торможении, и устанавливается некоторая средняя скорость  $n_{ср}$ , величина которой определяется относительной продолжительностью включения.

Поэтому для управления двигателем требуется схема управления, назначение которой – преобразование постоянного или изменяющегося сигнала управления в последовательность управляющих импульсов с относительной продолжительностью включения, являющейся заданной

функцией величины этого сигнала. В качестве элементов коммутации используются силовые полупроводниковые приборы – полевые и биполярные транзисторы, тиристоры.

### **Схема прямого включения асинхронного электродвигателя**

Асинхронные электрические двигатели с короткозамкнутым ротором (на рисунке обозначен М) включаются в сеть при помощи магнитного пускателя (КМ1), который обеспечивает одновременное включение всех трех фаз электродвигателя. Защита двигателя и цепей питания от короткого замыкания выполняется при помощи автоматического выключателя (QR), номинальный ток срабатывания которого в 1,6 – 1,7 раза больше номинального тока электродвигателя. Защита двигателя от перегрузки производится путем введения в схему теплового реле (Р), которое срабатывает при длительном превышении потребляемого электродвигателем тока номинального значения.



Рис. 6 – Трехполюсный автоматический выключатель



Рис. 7 – Кнопочный пост на две кнопки

Пускатель управляется при помощи кнопочного поста. Он может быть двух видов. Либо только с кнопками «Пуск» и «Стоп» (С), либо с кнопками «Вперед» (Пуск1), «Стоп» (КС) и «Назад» (Пуск2). Если реверс не используется, то применяется кнопочный пост на две кнопки.

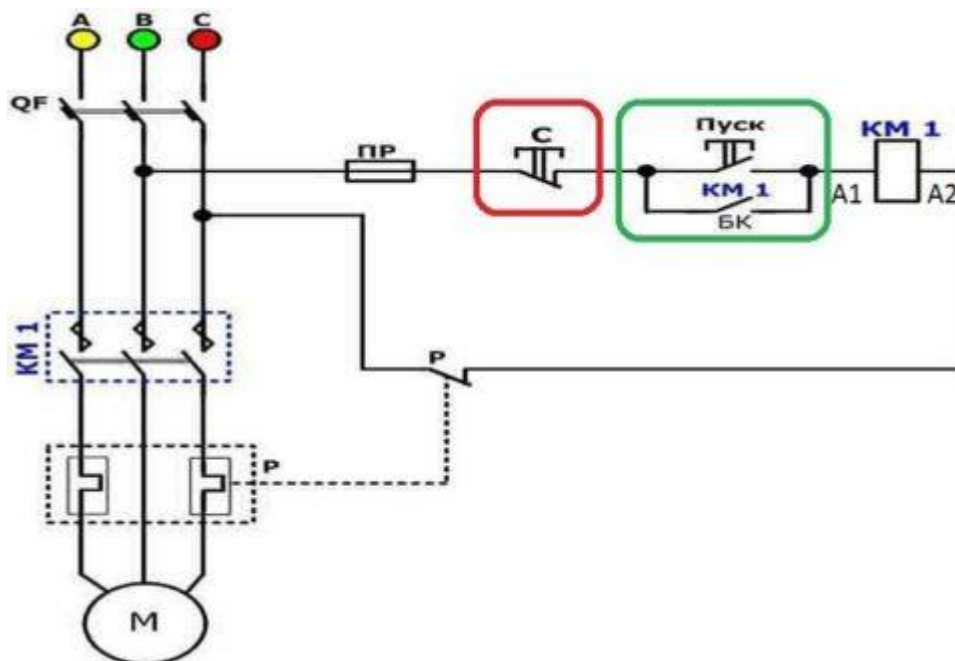


Рис. 8 – Схема прямого подключения асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором



Рис. 9 – Расположение элементов пускателя

Магнитный пускатель в дополнение к трем основным силовым контактам (через которые трехфазный ток поступает на обмотки двигателя) содержат в своем составе еще и так называемые блок-контакты – набор нормально закрытых и нормально открытых контактов. Нормально закрытым (разомкнутым) называется контакт, который при отключенном положении

пускателя – замкнут. Соответственно нормально открытый (замкнутый) контакт в этот момент разомкнут.

При включении пускателя нормально замкнутые контакты размыкаются, а нормально разомкнутые контакты замыкаются

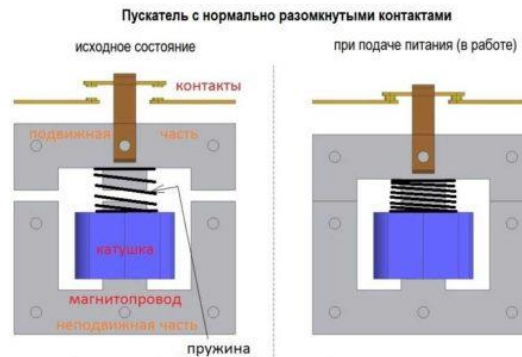


Рис. 10 – Нормально разомкнутые контакты магнитного пускателя

После первого включения проверяется направление вращения двигателя и если вращение неправильное, то производится изменение подключения двух силовых проводов на выводах пускателя.

### Схема реверсивного включения электродвигателя

Распространенным вариантом подключения асинхронного электродвигателя является вариант с использованием реверса. Такой режим может потребоваться в случаях, когда необходимо изменять направление вращения двигателя в процессе эксплуатации. В этом случае используется два пускателя КМ1 и КМ2.

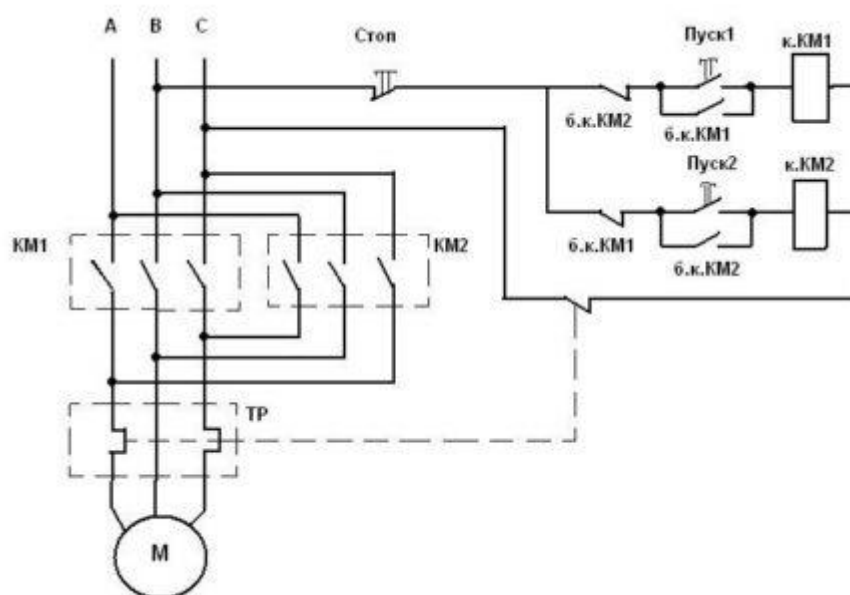


Рис. 11 – Схема реверсивного подключения электродвигателя с катушкой пускателя на 220В

## Принцип действия частотного преобразователя

Для регулирования скорости вращения и момента асинхронного двигателя используют частотный преобразователь. Принцип действия частотного преобразователя основан на изменении частоты и напряжения переменного тока.

Использование частотного преобразователя позволяет:

- уменьшить энергопотребление электродвигателя;
- управлять скоростью вращения электродвигателя (плавный запуск и остановка, регулировка скорости во время работы);
- избежать перегрузок электродвигателя и тем самым увеличить его срок службы.



Рис. 12 – Функциональная схема частотно-регулируемого привода

Частотный преобразователь, или преобразователь частоты - электротехническое устройство (система управления), используемое для контроля скорости и/или момента двигателей переменного тока путем изменения частоты и напряжения питания электродвигателя.

Согласно ГОСТ 23414-84 полупроводниковый преобразователь частоты - полупроводниковый преобразователь переменного тока, осуществляющий преобразование переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты

**Частотный преобразователь** – это устройство, используемое для того, чтобы обеспечить непрерывное управление процессом. Обычно частотный преобразователь способен управлять скоростью и моментом асинхронных и/или синхронных двигателей.



Рис. 13 – Частотный преобразователь небольшой мощности



Рис. 14 – Высоковольтный преобразователь

Преобразователи частоты находят все более широкое применение в различных приложениях промышленности и транспорта. Благодаря развитию силовых полупроводниковых элементов, **инверторы** напряжения и инверторы тока с ШИМ управлением получают все более широкое распространение. Устройства, которые преобразуют постоянный сигнал в переменный, с желаемым напряжением и частотой, называются инверторами. Такое преобразование может быть осуществлено с помощью электронных ключей (BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, GTO) и тиристоров в зависимости от задачи.

На данный момент основная часть всей производимой электрической энергии в мире используется для работы электрических двигателей. Преобразование электрической мощности в механическую мощность осуществляется с помощью электродвигателей мощностью от меньше ватта до нескольких десятков мегаватт.

Современные электроприводы должны отвечать различным требованиям таким как:

максимальный КПД;



широкий диапазон плавной установки скорости вращения, момента, ускорения, угла и линейного положения;

быстрое удаление ошибок при изменении управляющих сигналов и/или помех;

максимальное использование мощности двигателя во время сниженного напряжения или тока;

надежность, интуитивное управление.

### ***Конструкция частотного преобразователя***

Основными элементами частотного преобразователя являются силовая часть (преобразователь электрической энергии) и управляющее устройство (контроллер). Современные частотные преобразователи обычно имеют модульную архитектуру, что позволяет расширять возможности устройства. Также зачастую имеется возможность установки дополнительных интерфейсных модулей и модулей расширения каналов ввода/вывода.

## **Физические основы функционирования шаговых электрических двигателей**

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 электродвигателя

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

### **Физические основы функционирования пьезоэлектрических двигателей**

---

Пьезоэлектрические двигатели основаны на применении одного из многих известных конструктивных принципов реализации процесса преобразования электрической энергии в механическую, по которому накоплен опыт теоретических и экспериментальных исследований, достаточный для промышленного освоения и серийного производства, для внедрения в технику.

Статор двигателя содержит пьезокерамическое кольцо, на котором укреплены толкатели, упирающиеся на внутреннюю поверхность ротора, выполненного в виде цилиндрической чашки, закрепленной на валу. На торцевые поверхности пьезокерамического кольца нанесены электроды, подключаемые к генератору ультразвуковых колебаний. Частота генератора соответствует одной из частот собственных механических колебаний пьезокерамического кольца в радиальном направлении. Процесс преобразования колебаний пьезокерамического кольца в поступательное (вращательное) движение ротора (механическое детектирование) осуществляется следующим образом:

- 1) при включении генератора механические колебания пьезокерамического кольца через толкатели передаются на ротор;
- 2) в области фрикционного контакта толкателей с ротором векторы сил, передаваемых толкателями, раскладываются на

составляющие — составляющую вдоль радиуса ротора и составляющую, направленную по касательной к окружности ротора;

- 3) последняя составляющая приводит ротор во вращательное движение, скорость вращения ротора при этом пропорциональна амплитуде механических колебаний кольца.



Рис. 15 – Пьезоэлектрические двигатели

Преимущества пьезоэлектрических двигателей перед электромагнитными:

- широкий диапазон регулировки частот вращения (0 - 300 об/мин);
- возможность малых, в пределах оборота вала, перемещений (доли угловых секунд);
- высокий момент на валу;
- малое энергопотребление;
- искровзрывобезопасность;
- большой тормозной момент на валу в обесточенном состоянии;
- безинерционность;
- бесшумная работа;
- малые масса и габариты.

Область применения пьезодвигателей:

- жесткие безлюфтовые безредукторные электромеханические исполнительные механизмы с низкой скоростью перемещений;
- высококачественный жесткий безлюфтовый и безредукторный привод систем автоматического регулирования скорости и перемещений;
- электромеханические устройства, эффективно заменяющие силовые электромагниты.

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Электродвигатели: назначение и область применения.
2. Основные параметры электродвигателя.
3. Принципы управления коллекторными электродвигателями постоянного тока.
4. Схема прямого включения асинхронного электродвигателя.
5. Принцип действия частотного преобразователя.
6. Физические основы функционирования шаговых электрических двигателей.
7. Физические основы функционирования пьезоэлектрических двигателей.

## Лекція № 21

**Тема:** Физические основы функционирования гидравлических и пневматических приводов.

## Содержание

Некоторые сведения из гидравлики .....	2
Гидромеханика .....	2
Гидростатика .....	2
Давление.....	2
Давление под воздействием внешних сил.....	3
Передача силы .....	3
Передача давления .....	5
Гидроприводы .....	6
Важнейшие характеристики гидроприводов .....	6
Преобразование, передача и управление энергией в гидроприводе	6
Основные устройства и схемы построения гидропривода.....	7
Простейший гидропривод.....	7
Применение обратного клапана в гидроприводе .....	9
Применение предохранительного клапана в гидроприводе.....	9
Обеспечение реверсивного движения поршня гидроцилиндра.....	11
Регулирование скорости перемещения поршня гидроцилиндра...	12
Контрольные вопросы по теме .....	15
Уровень модуля.....	15
Уровень курса.....	15

**Источники:**

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х томах. Том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика – М.: Наука, 1987 - 611 с.
2. Экснер Х., Фрейтаг Р. и др. Гидропривод. Основы и компоненты. Том 1. Издатель: Бош Рексрот АГ Сервис Автоматизация Дидактика 64711 г. Эрбах Германия, 2003. - 323 с.

## Некоторые сведения из гидравлики

### Гидромеханика

Гидромеханика имеет дело с физическими характеристиками и поведением жидкостей в неподвижном (гидростатика) и подвижном (гидрокинетика) состояниях.

Различие между жидкими и твердыми телами состоит в том, что частицы, из которых состоят жидкости, могут свободно перемещаться внутри занимаемого объема. Следовательно, жидкости не имеют специфической формы, они принимают форму содержащего их сосуда.

По контрасту с газами жидкости практически не сжимаются.

### Гидростатика

Строго говоря, законы гидростатики относятся только к идеальным жидкостям, которые рассматриваются без массы, трения и сжимаемости.

В этой связи возможно сделать заключение о поведении идеальных, т.е. свободных от трения систем циркуляции. Тем не менее, потери в той или иной форме присущи всем компонентам жидкостных систем. В компонентах, работающих по дроссельному принципу, потери действительно определяют их функционирование.

### Давление

Если сосуды различной формы с одинаковой площадью дна ( $A_1 = A_2 = A_3$ ) заполнены жидкостью до одного и того же уровня  $h$ , то давления на дно будут равны ( $p_1 = p_2 = p_3$ ) и действующие силы будут равны также ( $F_1 = F_2 = F_3$ ).

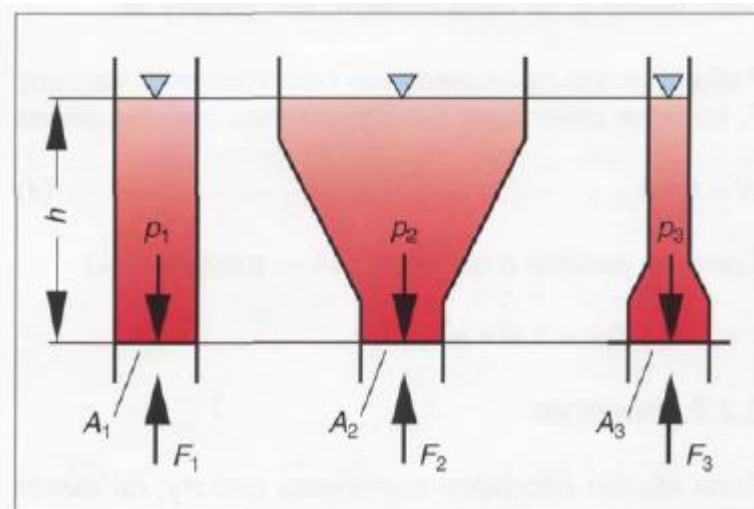


Рис. 21.1 – Гидростатический парадокс

## Давление под воздействием внешних сил

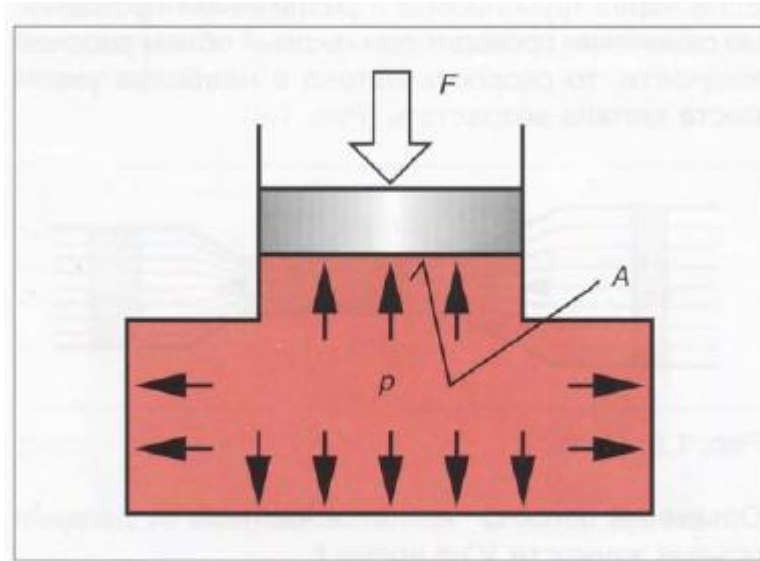


Рис. 21.2 – Закон Паскаля

Основой для гидростатики является закон Паскаля:

«Воздействие силы на неподвижную жидкость распространяется по всем направлениям внутри жидкости. Величина давления в жидкости равна нагрузке, соотнесенной с площадью, на которую она действует».

То есть, передача давления во всех направлениях происходит одинаково.

Данный закон действителен только для жидкостей и газов. Дело в том, что молекулы жидких и газообразных веществ под давлением ведут себя совсем не так, как молекулы твердых тел. Их движение отличается друг от друга. Если молекулы жидкости и газа движутся относительно свободно, то молекулы твердых тел такой свободой не обладают. Они лишь слегка колеблются, немного отклоняясь от исходного положения. И благодаря относительно свободному передвижению молекулы газа и жидкости оказывают давление во всех направлениях.

Кроме того, давление распространяется равномерно во все стороны. Если не принимать во внимание давление силы тяжести, то давление одинаково по величине во всех точках (Рис. 21.2).

Учитывая давления, которые используются в современных гидроприводах, влиянием давления силы тяжести можно пренебречь.

### Передача силы

Так как давление распространяется равномерно во всех направлениях, форма сосуда не имеет никакого значения.

Пример использования гидростатического давления иллюстрирует Рис. 21.3.

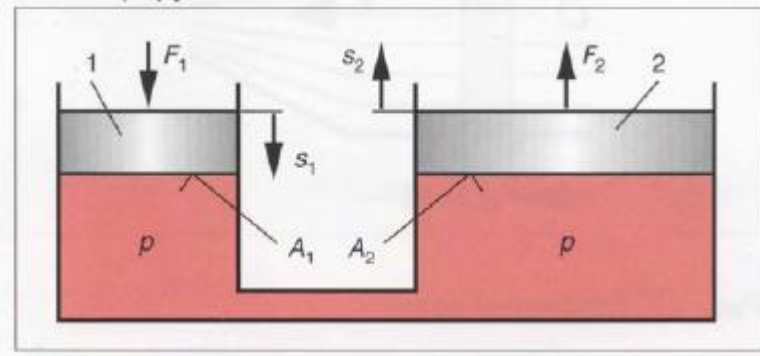


Рис. 21.3 – Пример передачи силы

Если сила  $F_1$  воздействует на площадь  $A_1$  возникает давление

$$p = \frac{F_1}{A_1} \quad (21.1)$$

Давление  $p$  оказывает воздействие на каждую точку системы, в том числе на поверхность  $A_2$ . Достигаемая сила  $F_2$  (сила, поднимающая нагрузку) равна

$$F_2 = pA_2 \quad (21.2)$$

Таким образом

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (21.3)$$

или

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (21.4)$$

Отношение сил равно отношению площадей.

Давление  $p$  в подобной системе всегда соответствует величине силы  $F$  и эффективной площади  $A$ . Это значит, что давление возрастает до тех пор, пока оно не сможет преодолеть сопротивление движению жидкости.

Если с помощью силы  $F_1$  и площади  $A_1$  возможно достичь величины давления, достаточной для преодоления нагрузки  $F_2$  (через площадь  $A_2$ ), нагрузка  $F_2$  может быть поднята (силами трения пренебрегаем).

Перемещения  $s_1$ , и  $s_2$  обоих поршней обратно пропорциональны их площадям

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (21.5)$$



Работа силового поршня (1)  $W_1$  равна работе нагрузочного поршня (2)  
 $W_2$

$$\begin{aligned} W_1 &= F_1 s_1 \\ W_2 &= F_2 s_2 \end{aligned} \quad (21.6)$$

### Передача давления

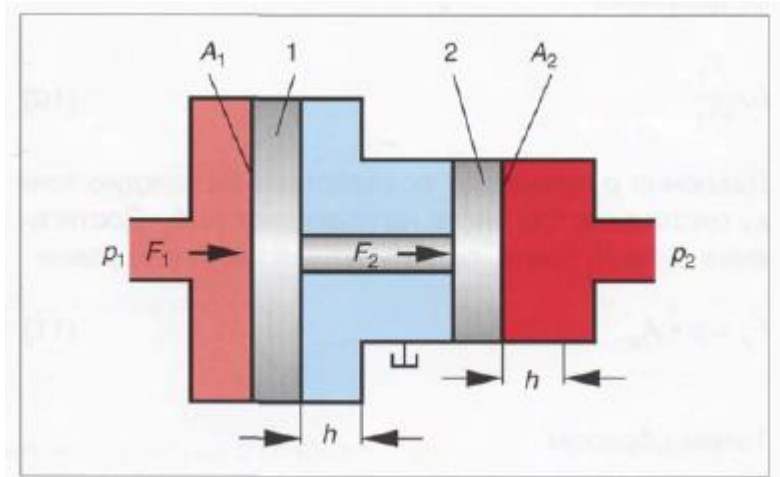


Рис. 21.4 – Передача давления

На Рис. 21.4 два различных по размеру поршня (1) и (2) жестко соединены между собой с помощью штока. Если на площадь  $A_1$  действует давление  $p_1$  то на поршне (1) появляется сила  $F_1$  которая через шток передается на площадь  $A_2$  поршня (2) и создает там давление  $p_2$ .

Если не учитывать силы трения, действительны следующие соотношения:

$$F_1 = F_2 \text{ и } p_1 A_1 = p_2 A_2$$

Поскольку  $p_1 A_1 = F_1$  и  $p_2 A_2 = F_2$  получаем:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (21.7)$$

Для подобных устройств давления обратно пропорциональны площадям.

## Гидроприводы

### *Важнейшие характеристики гидроприводов*

- Передача больших сил (крутящих моментов) при относительно небольших габаритных размерах.
- Работа на полную мощность возможна сразу после запуска.
- Бесступенчатая настройка в системах без обратной связи или с обратной связью, легко достигается регулировка:
  - скорости
  - крутящего момента
  - силы.
- Простота защиты от перегрузки.
- Широкий диапазон регулирования: возможность контролируемых движений с большой или предельно малой скоростью.
- Возможность аккумулирования энергии.
- Простое централизованное управление.
- Возможность децентрализованного преобразования гидравлической энергии в механическую.

### *Преобразование, передача и управление энергией в гидроприводе*

В гидроприводах механическая энергия преобразуется в гидравлическую, в этой форме перемещается, управляется или регулируется и затем снова преобразуется в механическую энергию.



Рис. 21.5 – Передача энергии в гидроприводе

В первую очередь для преобразования энергии служат насосы, а во вторую - гидроцилиндры и гидромоторы.

Гидравлическая энергия и сопровождающая ее передача мощности в гидроприводах характеризуется давлением и потоком (расходом). Их величина и направление действия определяются регулируемыми насосами или гидроаппаратами, реализующими управление без обратной связи или с обратной связью.

Рабочая жидкость, которая проходит через трубопроводы, шланги, отверстия в блоках управления или гидроаппаратах, транспортирует энергию или только трансформирует давление.

Для пополнения запасов и ухода за рабочей жидкостью требуется целый ряд специальных устройств, таких как резервуары, фильтры, охладители, нагреватели, измерительные и тестирующие приборы.

## Основные устройства и схемы построения гидропривода

### Простейший гидропривод

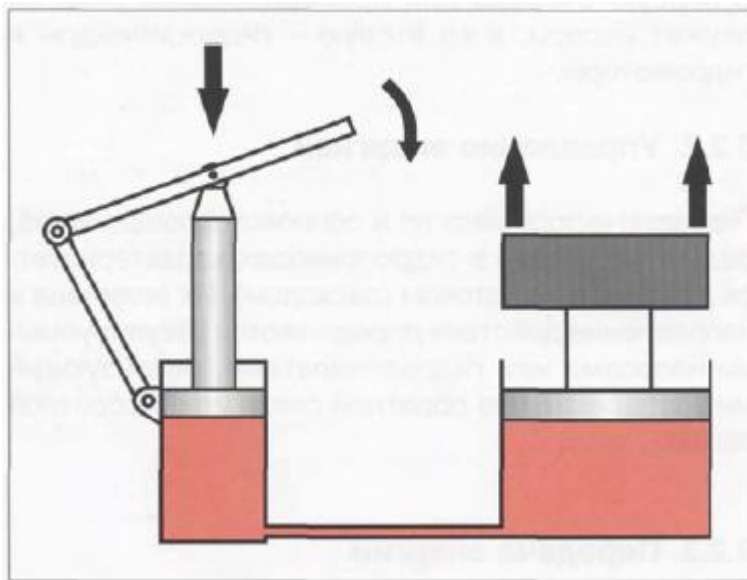


Рис. 21.6 – Принцип работы гидропривода

На поршень ручного насоса воздействует сила (Рис. 21.6). В результате деления этой силы на площадь поршня возникает давление ( $p = F/A$ ).

Чем сильнее давят на поршень, тем выше становится давление.

Однако давление повышается только до того уровня, при котором оно способно преодолеть сопротивление нагрузки с учетом рабочей площади гидроцилиндра ( $F = p \cdot A$ ).

После этого давление более не повышается при остающейся постоянной нагрузке. Оно становится равным в конце концов сопротивлению, которое противодействует течению жидкости.

Установленный на поршень груз начнет подниматься, если сумеет подвести необходимое для этого давление. Скорость подъема при этом

зависит от величины объемного потока, подводимого к гидроцилиндру. Возвращаясь к Рис. 21.6, можно заметить, что чем быстрее поршень ручного насоса движется вниз, тем больше жидкости подводится к гидроцилиндру за единицу времени, и тем быстрее будет подниматься груз.

В качестве второго примера рассмотрим еще один простейший гидропривод.

При этом шаг за шагом вводятся дополнительные устройства, которые:

- управляют изменением направления движения (гидрораспределитель),
- воздействуют на скорость движения гидроцилиндра (дроссель),
- ограничивают нагрузку на гидроцилиндре (предохранительный клапан),
- предотвращают движение нагруженного гидроцилиндра в обратном направлении при отключении насоса (обратный клапан).

Гидроцилиндр (5) нагружен силой  $F$  и должен обеспечить движение в обе стороны. В отличие от Рис. 21.6 насос (1) приводится здесь во вращение с помощью мотора (электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания).

Основы конструкции, показанной на Рис. 21.6, отображены на принципиальной схеме Рис. 21.7.

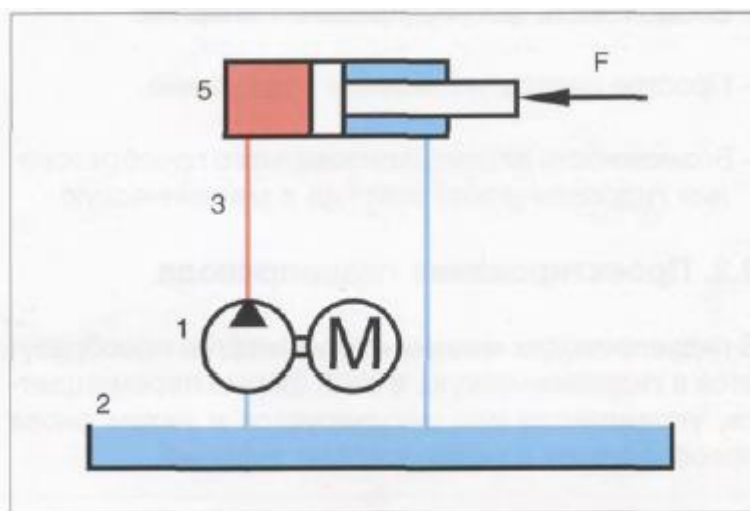


Рис. 21.7

Гидравлический насос (1), приводимый во вращение мотором  $M$ , всасывает жидкость из бака (2) и подает ее в трубопроводы (3) гидропривода вплоть до гидроцилиндра (5). Пока жидкость не встречает сопротивления, она только проталкивается через трубопровод.

Нагруженный силой  $F$  гидроцилиндр (5), установленный на конце трубопровода, представляет для жидкости препятствие, которое оказывает

сопротивление. В результате давление возрастает до тех пор, пока препятствие не будет преодолено, т.е. пока поршень гидроцилиндра не начнет двигаться.

Однако, если выключить мотор, сила  $F$  будет вдвигать поршень гидроцилиндра в исходное положение (шток вытягивается), а насос (1) будет работать как двигатель – его вал будет вращаться самостоятельно и при этом крутить вал присоединенного к нему выключенного мотора.

### **Применение обратного клапана в гидроприводе**

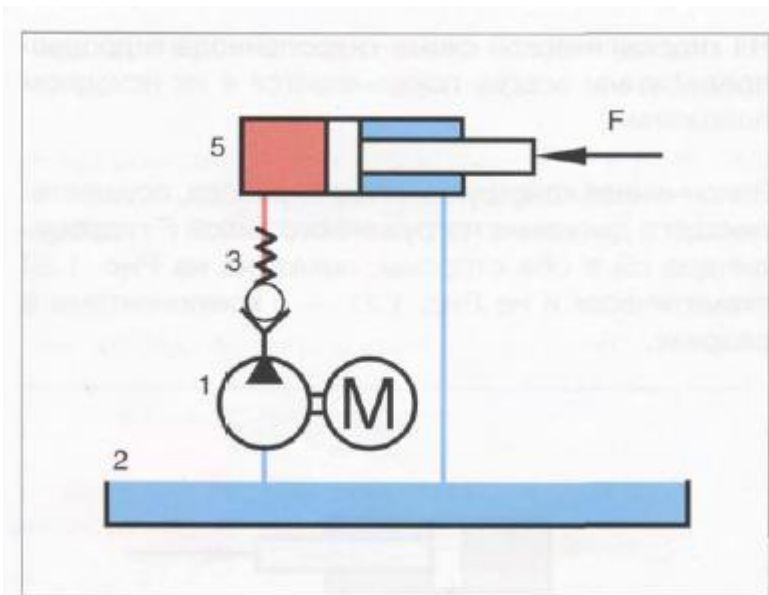


Рис. 21.8

Путем установки обратного клапана (3) в напорной линии насоса (1) исключается возможность слива жидкости из гидроцилиндра (5) и, следовательно, предотвращается обратное движение штока (см. Рис. 21.8). *Обратный клапан* – это устройство, которое позволяет жидкости или газу проходить только в одном, *прямом* направлении. В случае, если жидкость или газ начинают течь в противоположном, *обратном* направлении, клапан запирается – перекрывает магистраль и прекращает движение жидкости (газа).

После внесения дополнений в конструкцию гидропривода мы можем удерживать гидроцилиндр (5) в любом нужном положении за счет выключения мотора.

### **Применение предохранительного клапана в гидроприводе**

Если поршень полностью выдвигается, т.е. упирается в крышку гидроцилиндра, давление возрастает до тех пор, пока не произойдет разрушение гидропривода.

Эта опасность исключается предохранительным клапаном (4), показанным на Рис. 21.9.

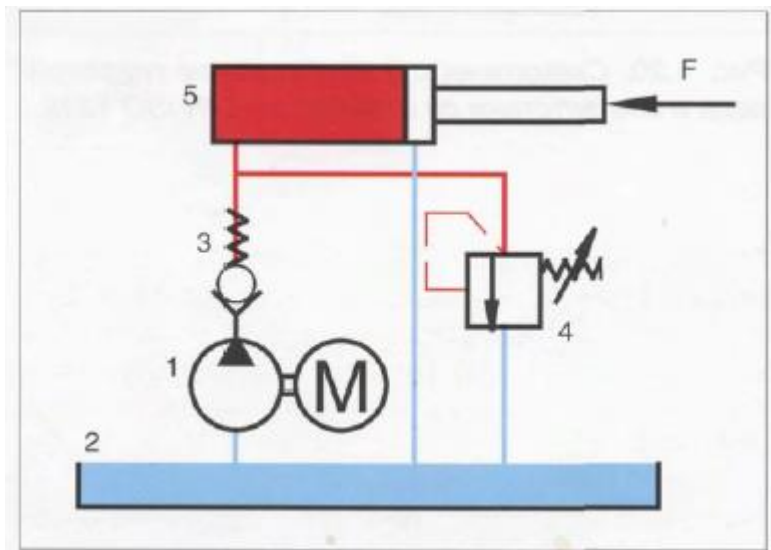


Рис. 21.9

Чтобы защитить гидропривод от чрезмерного нарастания давления (от перегрузки), необходимо ограничить максимально допустимое давление с помощью предохранительного клапана.

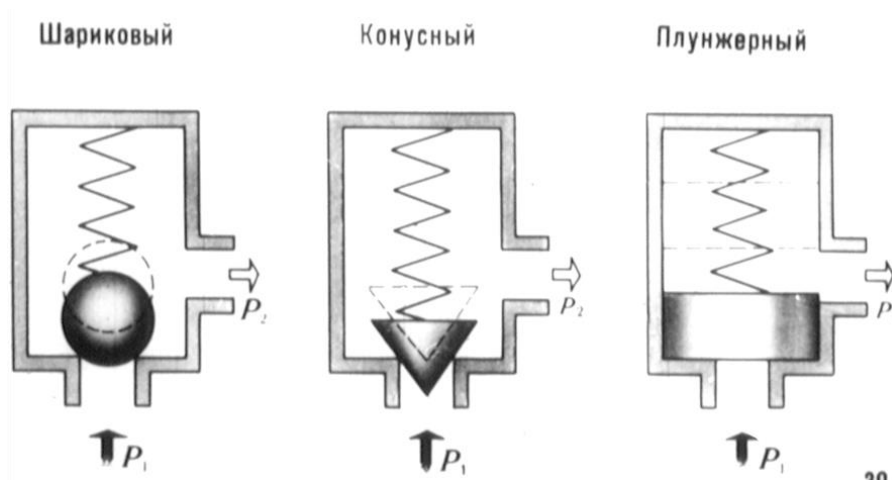


Рис. 21.10 – Принцип действия предохранительного клапана с затвором в виде шарика, конуса или диска

В предохранительном клапане механическая сила пружины воздействует на затвор, прижатый к седлу (Рис. 21.10). Имеющееся в трубопроводе давление  $F = p \cdot A$  действует на затвор, стремясь оторвать его от седла. Если сила от давления превышает усилие пружины, затвор отходит от поверхности седла. Одна из существующих конструкций предохранительного клапана представлена на Рис. 21.11.

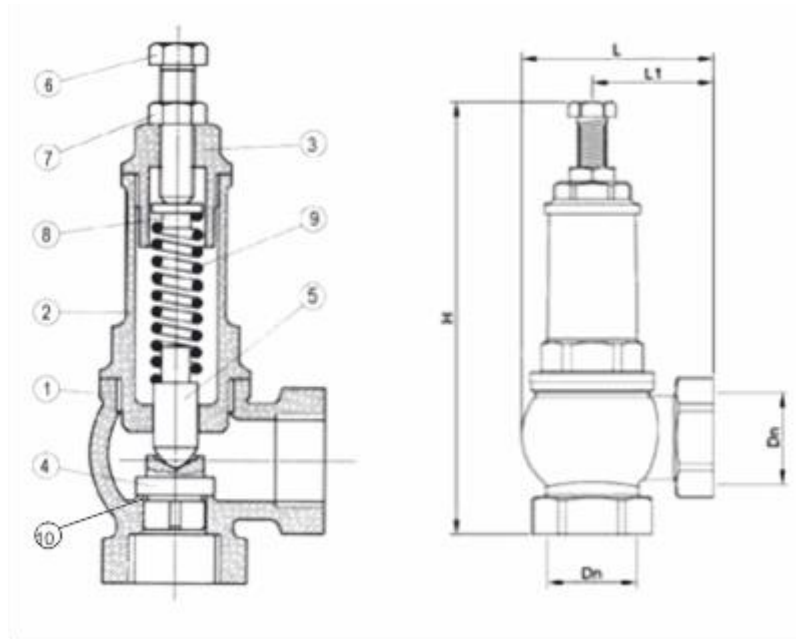


Рис. 21.11 – Конструкція предохранительного клапана  
 1 – корпус, 2 – кожух, 3 – крышка, 4 – диск, 5 – стержень,  
 6 – винт регулировки, 7 – гайка, 8 – шайба, 9 – пружина, 10 – седло

Далее давление уже не возрастает, а объемный расход, подаваемый насосом (1), сливается в резервуар (2) через предохранительный клапан (4).

### **Обеспечение реверсивного движения поршня гидроцилиндра**

Таким образом, наш гидропривод уже способен полностью выдвигать шток гидроцилиндра. За счет установки гидрораспределителя (6) можно обеспечить реверс движения гидроцилиндра, т.е. возможность обратного втягивания штока.

Гидравлический распределитель (гидрораспределитель) – устройство, предназначенное для управления гидравлическими потоками в гидросистеме с помощью внешнего воздействия (сигнала). Гидрораспределитель управляет движением выходного звена гидродвигателя путём перенаправления потоков рабочей жидкости.

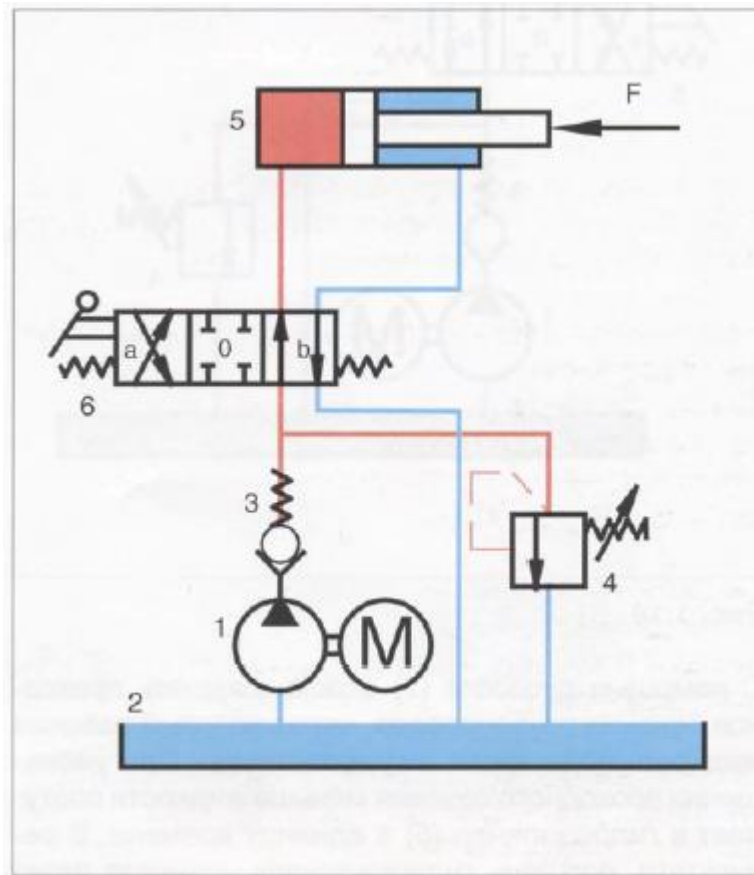


Рис. 21.12

На Рис. 21.12 показан гидрораспределитель (6) в позиции *b*. В этом положении не получилось нового качества по сравнению с Рис. 21.9. Мысленно переключим гидрораспределитель (6) в каждое из его трех возможных положений (позиций). Для этого сместим вправо в зону гидролиний подвода квадратики *0* или *a*:

- позиция *a*: шток гидроцилиндра втягивается
- позиция *0*: все линии заперты, и шток гидроцилиндра неподвижен
- позиция *b*: шток гидроцилиндра выдвигается.

### ***Регулирование скорости перемещения поршня гидроцилиндра***

Чтобы иметь возможность изменения скорости перемещения поршня в гидроцилиндре (5), необходимо изменять величину подаваемого в гидроцилиндр объемного потока (расхода) жидкости.

Для этой цели устанавливается дроссель (7), как это показано на Рис. 21.13.



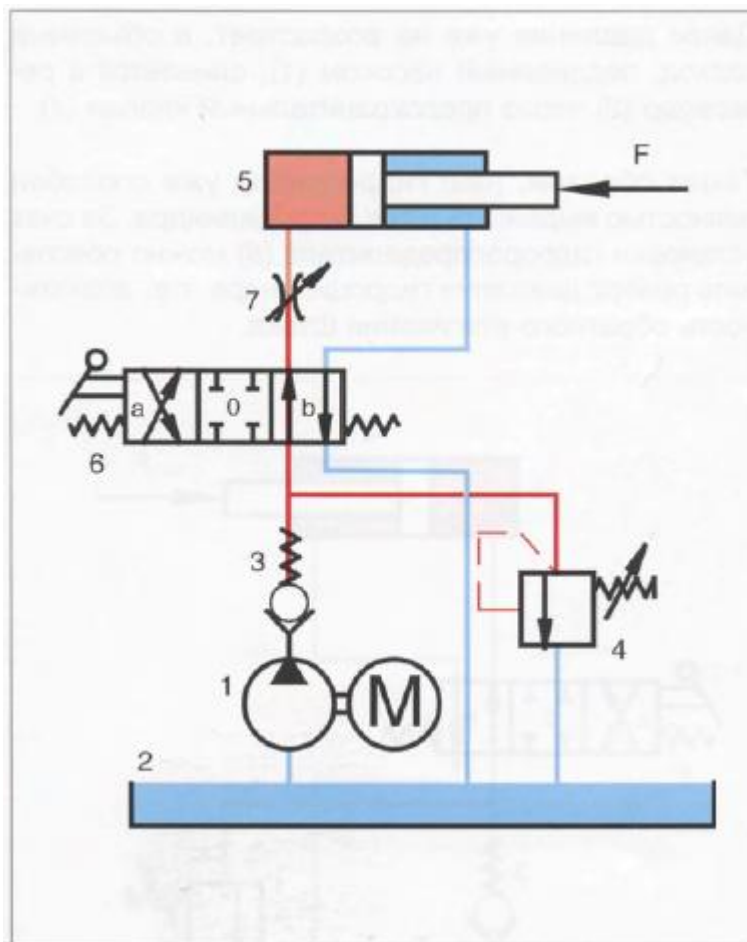


Рис. 21.13 – Схематическое изображение гидропривода в соответствии со стандартом DIN ISO 1219

С помощью дросселя (7) можно изменять проходное сечение трубопровода, через который рабочая жидкость подводится в гидроцилиндр. При уменьшении проходного сечения меньше жидкости поступает в гидроцилиндр (5) в единицу времени. В результате, поршень гидроцилиндра начинает перемещаться медленнее. При этом оставшаяся часть подаваемой насосом жидкости сливается в бак (2) через предохранительный клапан (4).

При выдвигении штока гидроцилиндра в гидроприводе действуют следующие давления:

- между насосом (1) и дросселем (7) – давление, на которое настроен предохранительный клапан (4);
- между дросселем (7) и гидроцилиндром (5) – давление, соответствующее нагрузке  $F$ .

На гидравлической схеме гидропривода гидрораспределители всегда показываются в их исходном положении.

Законченная конструкция гидропривода, осуществляющего движение нагруженного силой  $P$  гидроцилиндра (5) в обе стороны, показана на Рис. 21.13 схематически и на Рис. 21.14 – с компонентами в разрезе.

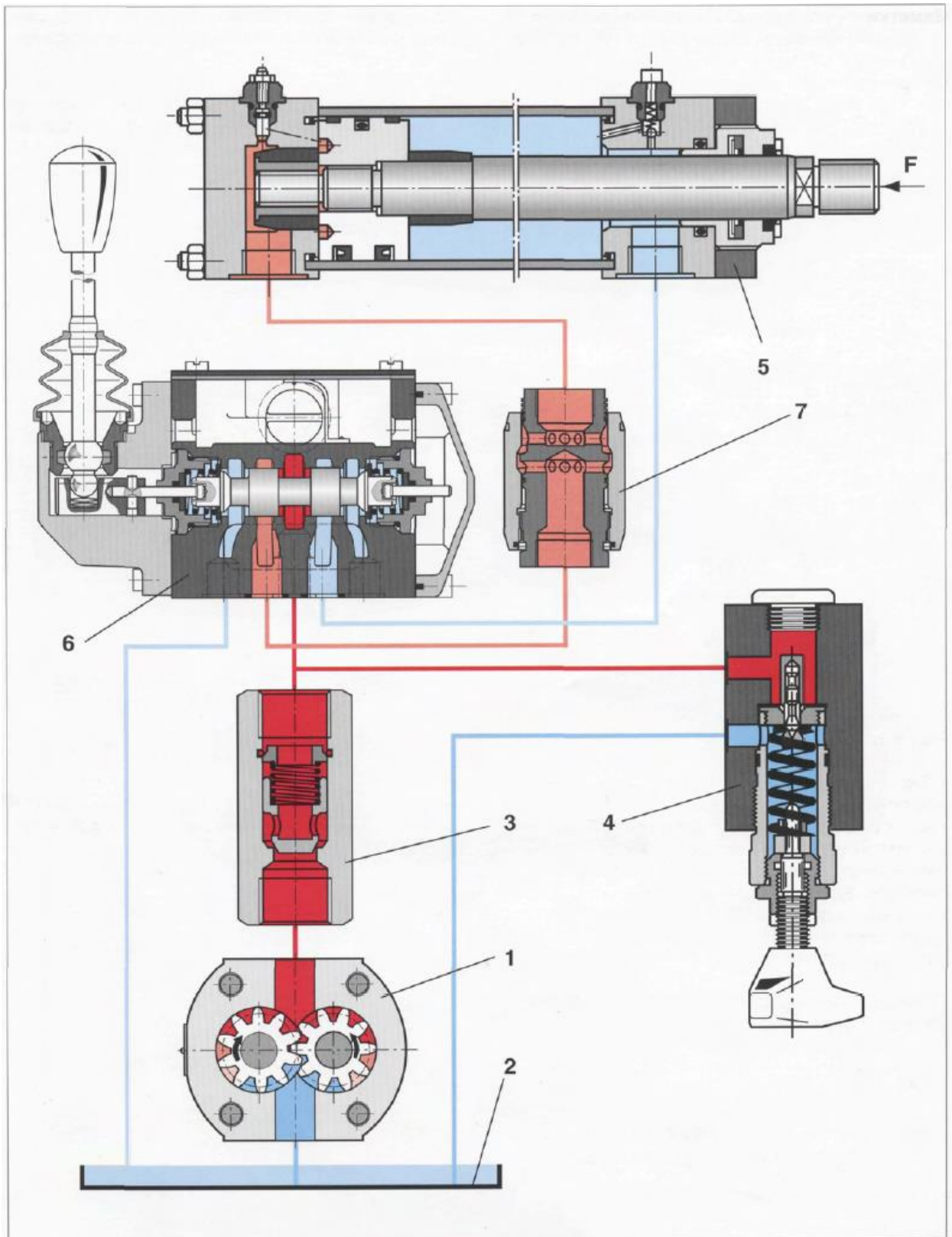


Рис. 21.14 – Гидропривод с компонентами, показанными в разрезе

## Контрольные вопросы по теме

---

### *Уровень модуля*

### *Уровень курса*

1. Гидравлика: давление под воздействием внешних сил.
2. Гидравлика: передача силы.
3. Гидравлика: передача давления.
4. Важнейшие характеристики гидроприводов.
5. Преобразование, передача и управление энергией в гидроприводе.
6. Схема и принцип действия простейшего гидропривода.
7. Применение обратного и предохранительного клапанов в гидравлическом приводе.
8. Обеспечение реверсивного движения поршня гидроцилиндра в гидроприводе.
9. Регулирование скорости перемещения поршня гидроцилиндра.