

Шипачева О.Г.

# Электротехника и электроника



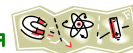
*Электронный конспект лекций  
для студентов специальности 190629  
Техническая эксплуатация подъемно-транспортных,  
строительных, дорожных машин и оборудования  
(по отраслям) (для железнодорожного транспорта)*



## Содержание

Введение.....	3
<b>Раздел 1 Электротехника</b>	
<i>Тема 1.1 Электрическое поле</i>	
Основные характеристики электрического поля.....	5
Проводники, полупроводники и диэлектрики.....	9
Электрическая емкость. Конденсаторы.....	11
<i>Тема 1.2 Электрические цепи постоянного тока</i>	
Электрический ток, сопротивление. Закон Ома.....	15
Электрическая энергия и мощность. КПД.....	19
Последовательное соединение резисторов.....	21
Параллельное соединение резисторов.....	23
<i>Тема 1.3 Электромагнетизм</i>	
Магнитное поле и его характеристики.....	26
Электромагнитная индукция.....	29
<i>Тема 1.4 Электрические цепи переменного тока</i>	
Основные характеристики цепей переменного тока.....	32
Цепь переменного тока с одним сопротивлением.....	34
Расчет цепи переменного тока.....	37
<i>Тема 1.5 Трехфазные цепи</i>	
Соединение обмоток трехфазного генератора.....	42
Соединение нагрузки «звездой», «треугольником».....	46
<i>Тема 1.6 Электрические измерения</i>	
Средства измерения электрических величин.....	49
Устройство электроизмерительных приборов.....	53
<i>Тема 1.7 Трансформаторы</i>	
Устройство и работа трансформатора.....	56
<i>Тема 1.8 Электрические машины переменного тока</i>	
Асинхронный двигатель.....	58
<i>Тема 1.9 Электрические машины постоянного тока</i>	
Генераторы и двигатели постоянного тока.....	61
<i>Тема 1.10 Передача и распределение электрической энергии</i>	
Схема электроснабжения. Заземление и зануление.....	63
<b>Раздел 2 Электроника</b>	
<i>Тема 2.1 Полупроводниковые приборы</i>	
Электрофизические свойства полупроводников.....	67
Устройство и работа диодов.....	70
Разновидности полупроводниковых приборов.....	73
<i>Тема 2.2 Выпрямители</i>	
Однофазные выпрямители.....	75
Трехфазные выпрямители.....	78
<i>Тема 2.3 Основы микроэлектроники</i>	
Классификация устройств микроэлектроники.....	80
Глоссарий.....	83
Информационное обеспечение.....	85





## ВВЕДЕНИЕ

Существование человеческого общества требует постоянных затрат энергии. Уровень производства и потребления энергии в значительной степени характеризует уровень производительных сил общества.

Электрическая энергия – вторичная форма энергии, не существующая в готовом виде в природе. Более 100 лет назад электротехника только зарождалась. Жизнь современного общества представить себе без применения электрической энергии невозможно.

Дисциплина «Электротехника и электроника» является базовой для изучения тем профессионального модуля, связанных с электрическими аппаратами, электронными устройствами, электрическими машинами.

**Электротехника** – отрасль науки и техники, связанная с получением, преобразованием и использованием электрической энергии в практической деятельности человека, охватывающая вопросы применения электромагнитных явлений в различных отраслях промышленности и в быту.

**Электроника** – отрасль науки и техники, связанная с созданием и описанием физических принципов работы новых электронных приборов и устройств или электронных схем на их основе.

Широкое распространение в современной промышленности и на транспорте электрическая энергия получила благодаря её преимуществам перед другими видами энергии:

- *любой вид энергии можно легко преобразовать в электрическую;*
- *электрическую энергию можно передавать на любые расстояния.* Это даёт возможность строить электростанции в тех местах, где имеются природные энергетические ресурсы, и передавать её в места, где расположены источники промышленного сырья, но нет местной энергетической базы;
- *возможность преобразования электрической энергии в другие виды энергии;*
- *процессы получения, передачи и потребления электроэнергии легко поддаются автоматизации;*
- *возможность трансформации электрической энергии;*
- *процессы, в которых используется электрическая энергия, допускают простое управление (нажатие кнопки выключателя и т.д.).*

Единственным недостатком электрической энергии является невозможность запастись её в больших количествах и сохранять эти запасы в течение длительного времени.

С электрическими явлениями люди были знакомы давно, но практическое использование их началось только в конце 19 века, после создания Дж. К. Максвеллом классической электродинамики. Изобретение радио А. С. Поповым и Г. Маркони — одно из важнейших применений принципов новой теории. Впервые в истории человечества научные исследования предшествовали техническим применениям. Если паровая машина была построена задолго до создания теории теплоты (термодинамики), то сконструировать электродвигатель или осуществить радиосвязь оказалось возможным только после открытия и изучения законов электродинамики.

Тогда в Европе появились первые электрические звонки, электрические утюги и т.д. В России электротехническая промышленность, электрификация транспорта началась после Октябрьской революции, началось строительство электростанций. Гидроэлектростанции Братская, Саяно-Шушенская, Красноярская являются самыми крупными в мире. Первая атомная электростанция была построена в 1954 году в городе Обнинск под Москвой.

В 1926 году электрифицирован первый участок железной дороги Баку - Сураханы.

Основателем электротехники в России считают М.В. Ломоносова. Он создал первую лабораторию по изучению электрических явлений, предсказал возможность передачи электрической энергии на расстояние. Немало открытий на счету русских ученых и инженеров. П.Н. Яблочков создал генератор переменного тока и трансформатор; М.О. Доливо-Добровольский



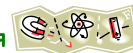


разработал систему трёхфазного тока; А.С. Попов осуществил первую радиопередачу волн на расстояние; А.Н. Лодыгин изобрёл первую электрическую лампочку и т.д. В процессе изучения электротехники мы познакомимся с работами этих ученых и многих других.

Важную роль в открытии законов и явлений электротехники принадлежат зарубежным ученым: А. Амперу, Ш. Кулону, Г. Ому, Н. Тесла, Г. Кирхгофу и т.д., имена которых носят основные законы электротехники и единицы измерения главных электрических величин.

Предложенный в данной работе материал является сокращённым конспектом лекций. Для глубокого изучения материала необходимо поддержать теоретические знания решением практических задач и выполнением лабораторных работ.





## РАЗДЕЛ 1 ЭЛЕКТРОСТАТИКА

### Тема 1.1 Электрическое поле

#### Основные характеристики электрического поля

##### План лекции

Электронная теория строения вещества

Электрическое поле и его изображение

Закон Кулона

Напряженность электрического поля

Электрический потенциал

Напряжение

Теория, объясняющая электрические свойства тел, наличием в них электронов и их движением, носит название **электронной теорией**.

Как известно, все вещества, как простые, так и сложные, состоят из молекул, а молекулы из атомов. Строение атома весьма сложно, но упрощенно его можно представить в виде ядра, окруженного оболочкой. Оболочка образована из постоянно движущихся с очень большой скоростью мельчайших частиц – электронов. Число электронов в нейтральном атоме в точности равно числу протонов ядра атома. Количество электронов в атомах различных веществ неодинаково. Например, атом водорода имеет один электрон, а атом натрия 11 электронов, вращающихся по трём орбитам.

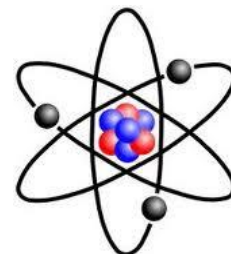


Рисунок 1 – Модель атома

Ядро и электроны обладают энергией. Ядро имеет положительную энергию, электроны – отрицательную. Если величина энергии ядра и электронов в атоме одинакова, то такой атом является **нейтральным**.

Но если атом теряет один или несколько электронов, то положительная энергия преобладает и атом превращается в **положительный ион**.

Если атом принимает один или несколько электронов, то превращается в **отрицательный ион**. Процесс превращения атомов в ионы называется **ионизацией**.

Если в объёме тела преобладает положительная или отрицательная энергия, то говорят что тело заряжено. Количество электричества, содержащегося в заряженном теле, называется **зарядом**. Величина заряда обозначается в системе СИ –  $Q, q$ , а единица измерения Кл (Кулон). В конце 19 века был открыт электрон — носитель отрицательного электрического заряда, в начале 20 века, — протон, обладающий таким же по величине положительным зарядом. Заряд электрона равен  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Если по проводу прошло  $6,29 \cdot 10^{18} e$ , то говорят, что по проводу прошло количество электричества в 1 Кл.

Вокруг любого заряженного тела существует **электрическое поле**. Увидеть электрическое поле невозможно, а судить о наличии его можно по механическим силам, которые испытывают неподвижные заряженные тела, вносимые в это поле.

На рисунках электрическое поле изображается электрическими силовыми линиями, которые начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном (рисунок 2).

Разноименные заряды, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, притягиваются друг к другу. Одноименные заряды, вследствие встречного направления силовых линий электрического поля, отталкиваются.



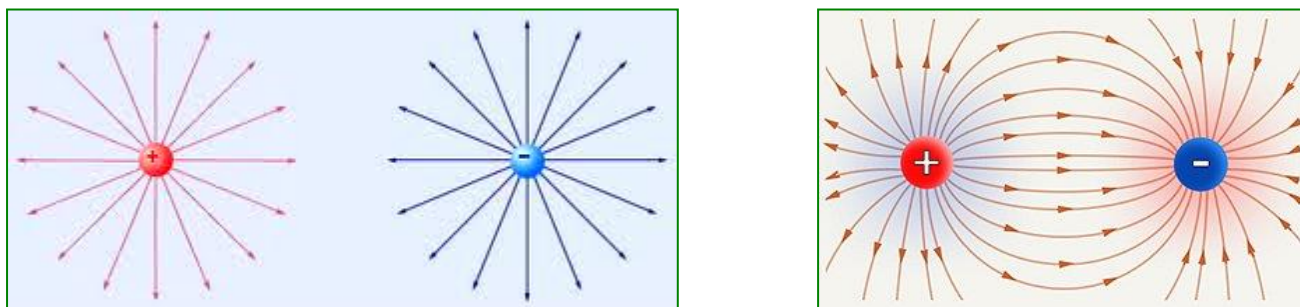


Рисунок 2 – Изображение электрического поля

Один из основных законов электростатики, определяющий величину и направление силы взаимодействия между двумя неподвижными точечными электрическими зарядами. Установлен Ш. О. Кулоном в 1785 г.

В своих опытах Кулон измерял силы притяжения и отталкивания заряженных шариков с помощью крутильных весов, измерял взаимодействие между шариками, размеры которых много меньше расстояния между ними. Такие заряженные тела, размерами которых в условиях данной задачи можно пренебречь, принято называть **точечными зарядами**.

На основании многочисленных опытов Кулон установил следующий закон:

**Сила взаимодействия двух неподвижных заряженных тел пропорциональна произведению величин зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и зависит от среды**

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \cdot R^2 \cdot \varepsilon_a}, \text{ Н} \quad (1)$$

где  $Q_1, Q_2$  - величины зарядов, Кл;

$R$  – расстояние между центрами зарядов, м;

$\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Сила  $F$  направлена по прямой, соединяющей взаимодействующие заряды, т. е. является центральной. Эта сила называется **кулоновской силой**. Кулоновские силы могут быть как силами притяжения, так и силами отталкивания. Если  $F < 0$  для разноименных зарядов, то между зарядами действует сила притяжения, если  $F > 0$  для одноименных зарядов, то между зарядами действует сила отталкивания. Практически закон Кулона хорошо выполняется, если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними.

Различные вещества имеют разную абсолютную диэлектрическую проницаемость. Она определяется произведением относительной диэлектрической проницаемости и диэлектрической проницаемости вакуума.

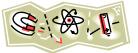
$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды, безразмерная величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данной среде меньше силы их взаимодействия в вакууме.

Относительная диэлектрическая проницаемость не имеет размерности. Для большинства диэлектриков она лежит в пределах 1-10, относительно мало зависит от электрических условий и температуры, а поэтому считается постоянной. Так как для парафинированной бумаги  $\varepsilon = 4,3$ , то абсолютная диэлектрическая проницаемость бумаги в 4,3 раза больше электрической постоянной и составляет  $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 = 4,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} = 38 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.





Небольшая группа диэлектриков, называемая *сегнетоэлектриками* (титанат бария, титанат свинца и др.), имеет очень высокую проницаемость  $\epsilon$  (порядка многих тысяч), которая сильно зависит от электрических условий и температуры.

В качестве количественного показателя электрического поля вводится такое понятие, как *напряжённость электрического поля* – это силовая характеристика точки поля. Суть этой характеристики в том, что поле действует на любой заряд внутри его с некоторой определённой силой, а, следовательно, эту силу можно измерить и определить интенсивность её воздействия.

$$E = \frac{F}{q}, \text{ В/м} \quad (3)$$

Другими словами, *напряжённость* – это отношение силы, действующей на заряд, к величине этого заряда. В электротехнике с помощью напряжённости электрического поля характеризуют его интенсивность. Напряжённость можно назвать основной характеристикой электрического поля. Это векторная величина, направление которой совпадает с касательной в любой точке силовой линии.

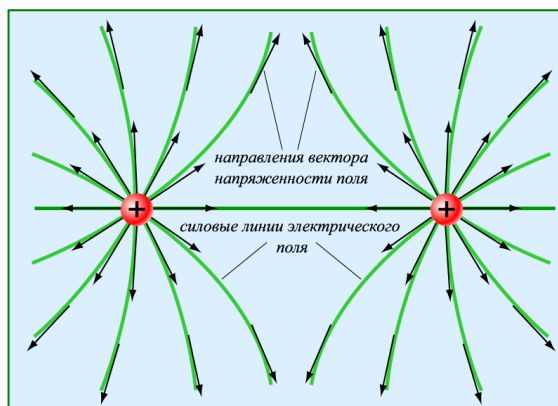


Рисунок 3 – Направление вектора напряженности электрического поля

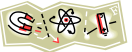
У электрического поля можно измерить различные количественные характеристики, можно определить его интенсивность и силу воздействия. По этим показателям можно судить о том воздействии, которое оно может оказывать на тела и на человека.

Но у электрического поля есть и другая характеристика, которую можно назвать запасом энергии. Этот запас энергии является способностью электрического поля совершать работу. Энергию можно накопить, для этого, например, можно сжать или растянуть пружину, при этом пружина будет совершать определённую работу за счёт той энергии, которая появляется в ней. Точно также обстоит дело и с электрическим полем. Стоит только внести в него заряженное тело или частицу, то сразу высвобождается запас энергии. Заряд начинает двигаться вдоль силовых линий поля, а, следовательно, он совершает определённую работу. Энергия сосредоточена в каждой точке электрического поля и может высвобождаться в такие моменты.

Для этой характеристики электрического поля ввели специальное понятие – *электрический потенциал*. Он существует для каждой конкретной точки и его значение будет равно той работе, которую совершат силы при перемещении заряда. Единица измерения потенциала вольт.

$$\varphi = \frac{W}{q}, \text{ В} \quad (4)$$

Понятие электрического потенциала аналогично понятию уровня для различных точек земной поверхности. Очевидно, что для подъема локомотива в точку Б (рисунок 4) нужно



затратить большую работу, чем для подъема его в точку А. Поэтому локомотив, поднятый на уровень Н<sub>2</sub>, при спуске сможет совершить большую работу, чем локомотив, поднятый на уровень Н<sub>1</sub>. За нулевой уровень, от которого производится отсчет высоты, принимают обычно уровень моря.

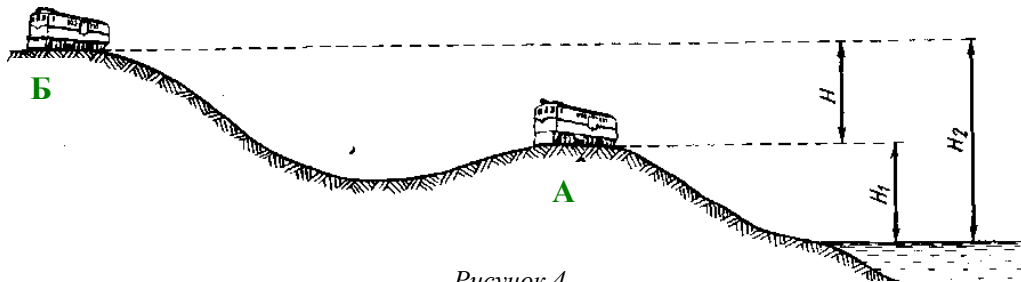


Рисунок 4

Следовательно, **электрический потенциал** – это энергетическая характеристика точки электрического поля, которая определяет запас энергии, работу, которую можно будет совершить.

Каждая точка электрического поля обладает потенциалом, а между двумя разными точками образуется разность потенциалов. **Напряжение** – один из наиболее важных показателей электрической цепи, представляет собой разность потенциалов двух точек электрической цепи. Обозначается напряжение буквой  $U$ . Напряжение, как и потенциал, измеряется в вольтах (В) или в производных единицах – киловольтах (кВ)  $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$ , милливольтмах (мВ)  $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$ . Прибором для измерения напряжения является вольтметр. Вольтметр включается параллельно тому устройству, на котором необходимо измерить напряжение (рисунок 6).

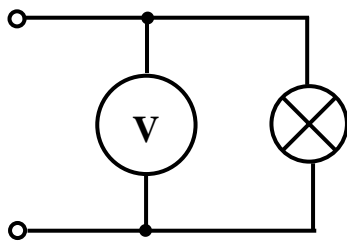


Рисунок 6 – Схема подключения вольтметра

### Почему птички безопасно сидят на проводах?

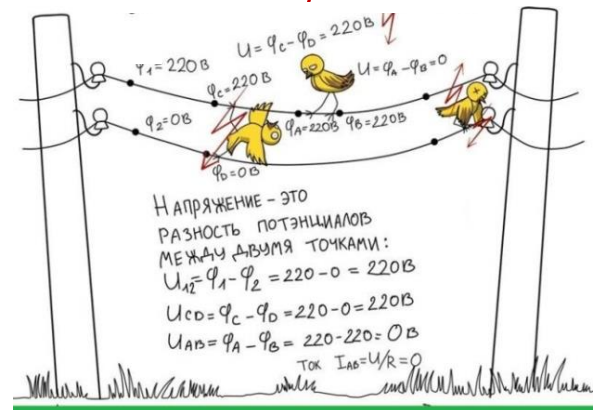


Рисунок 5

Когда птичка сидит на проводе каждая её лапка попадает под один и тот же потенциал. Поэтому то напряжение между лапками птицы равно нулю.

Единственный вариант, когда птица может случайно погибнуть, так это если она коснется соседнего провода, продолжая сидеть на первом. К счастью, провода чаще всего расположены довольно далеко друг от друга, поэтому весьма редко птица может задеть крылом и соседний провод при взлете. Таким образом, птицы и не погибают от разности потенциалов, когда сидят на высоковольтных проводах.

### Вопросы для самопроверки

- 1 Пояснить процесс ионизации.
- 2 Назвать условие возникновения электрического поля.
- 3 Как графически изображают электрическое поле и каково его направление?
- 4 Сформулировать закон Кулона.
- 5 Дать определение напряженности электрического поля, электрического потенциала, напряжения.
- 6 Пояснить изображение и направление напряженности электрического поля.
- 7 Назвать единицы измерения напряженности электрического поля, потенциала, напряжения.







## Проводники, полупроводники и диэлектрики

### План лекции

Проводники

Полупроводники

Диэлектрики

Электропроводность материалов обусловлена наличием в них свободных электрических зарядов, способных перемещаться под действием электрического поля. В зависимости от электропроводности все вещества подразделяются на проводники, полупроводники и диэлектрики.

**Проводники** – материалы, в которых имеются электрические заряды, способные перемещаться под действием электрического поля.

Все проводниковые материалы делятся на два типа:

проводники 1-го рода – твердые материалы (многие металлы, их сплавы и уголь);

проводники 2-го рода – жидкие вещества (расплавленные соли, водные растворы кислот, щелочей, солей).

В проводниках первого рода электропроводность обусловлена движением свободных электронов. В проводниках второго рода перемещающимися зарядами являются ионы.

Из проводниковых материалов с высокой электропроводностью самым замечательным материалом для проводов было бы серебро. Однако этот материал слишком дорог и редок, поэтому серебро используют только для ответственных контактов, т.к. оно не только идеальный проводник, но и не окисляется в процессе работы, не ухудшаются свойства контакта со временем. Для проводов используют медь, алюминий, сталь, по электропроводности их можно поставить на 2-е место после серебра.

Применение меди достаточно широко - различные проводники, кабели, шнуры, шины, плавкие вставки, обмотки трансформаторов, электрических машин, катушек. Среди проводниковых материалов, используемых в технике, можно назвать латунь, манганин, вольфрам, бронза и др.

Из проводниковых материалов выполняют соединительные провода, обмотки электрических машин, трансформаторов, нагревательных приборов, разъединительные ножи и рубильники и др.

**Полупроводники** – материалы, в которых свободные электрические заряды появляются при определенных условиях (нагрев, освещение, наличие примесей и др.).

Наиболее распространенные полупроводники – это кремний, германий, селен, арсенид галлия. Все элементы электронной техники выполнены на основе полупроводников и широко используются в технике и быту. Диоды, транзисторы, тиристоры, полупроводниковый лазер, люминофоры, интегральные микросхемы и др. – устройства, выполненные на основе полупроводниковых материалов.



Рисунок 7 – Применение проводников

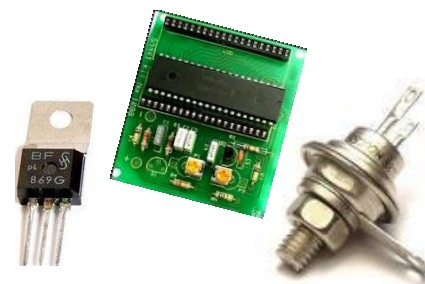
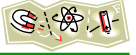


Рисунок 8 – Применение полупроводников

**Диэлектрики** – материалы, у которых нет свободных электрических зарядов. Диэлектрики используются в технике и промышленности в трех агрегатных состояниях:

твердые диэлектрики - слюда, керамика, стекло, пластмассы, стеклоткани, капрон, нейлон, шелк и др.;



жидкие диэлектрики – смолы, технические масла (трансформаторное, кабельное, конденсаторное), лаки, эмали, компаунды, и др. Абсолютно непроводящая жидкость – дистиллированная, т.е. очищенная, вода, любая другая вода (водопроводная или морская) содержит какое-то количество примесей и является проводником;

газообразные диэлектрики – воздух, азот, водород, углекислый газ.

Устройства, изготовленные из диэлектриков, называют изоляторами. Их назначение – защита людей от поражения электрическим током, защита токоведущих частей от возможного короткого замыкания.

От качества изоляции зависит надежность работы всех устройств по производству, передаче и потреблению электрической энергии. В качестве изоляторов применяются разнообразные материалы: фарфор, минеральные масла, лаки, слюда, резина, хлопчатобумажные и шелковые ткани, фибра, эбонит, хлорвинил и другие.

Электропроводность любого вещества не является постоянной величиной; например, на электропроводность проводников и диэлектриков влияет изменение температуры.

Для полупроводников характерно более резкое изменение электропроводности под действием температуры; кроме того, электропроводность полупроводников резко изменяется при введении в их состав незначительного количества примесей.

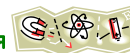


Рисунок 9 – Применение диэлектриков

#### **Вопросы для самопроверки**



- 1 Чем определяется электропроводность материалов?
- 2 Пояснить принципиальное отличие проводников и диэлектриков
- 3 От каких параметров зависит электропроводность материалов?
- 4 Привести примеры и применение проводников.
- 5 Привести примеры и применение полупроводников.
- 6 Привести примеры и применение диэлектриков.



## Емкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов

### План лекции

Электрическая емкость

Конденсаторы

Последовательное соединение конденсаторов

Параллельное соединение конденсаторов

Смешанное соединение конденсаторов

**Электрическая емкость** – способность проводника накапливать заряд (обозначение  $C$ ). Единицей измерения емкости является Ф (фарад), но это крупная единица, поэтому на практике чаще пользуются более мелкими единицами – микрофарадами (мкФ)  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ , нанофарадами (нФ)  $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$ , пикофарадами (пФ)  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ .

Уединенный проводник обладает незначительной емкостью. Большой емкостью обладает система проводников, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга. **Конденсатор** это устройство, состоящее из двух и более проводников, разделенных слоем диэлектрика. Проводники конденсатора называют обкладками.

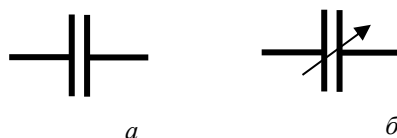


Рисунок 10 - Условное обозначение конденсатора на схемах

*a* – с постоянной емкостью,

*б* – с переменной емкостью.

Емкость конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5)$$

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров проводников, их взаимного расположения и свойств диэлектрика, разделяющего обкладки. Различают плоские конденсаторы, обкладками которых служат плоские параллельные пластины, и цилиндрические. В зависимости от материала диэлектрика различают бумажные, слюдяные, керамические и электролитические конденсаторы.

Наибольшее распространение получили плоские конденсаторы, емкость которых определяется по формуле

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь пластин конденсатора,  $\text{м}^2$ ;

$d$  – толщина диэлектрика (расстояние между пластинами), м.

Используют конденсаторы для сглаживания пульсаций выпрямленного тока, для борьбы с искрением контактов электрических аппаратов и с радиопомехами, в системах управления полупроводниковыми преобразователями и др.

Для изменения величины емкости используют различные способы соединения конденсаторов.

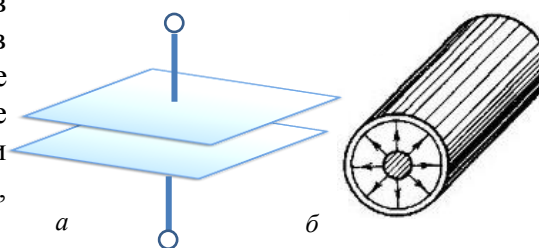


Рисунок 11 – Плоский (а) и цилиндрический (б) конденсаторы

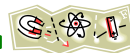


Рисунок 12 – Виды конденсаторов

### Последовательное соединение конденсаторов

При этом соединении в цепи отсутствуют узлы, и напряжение источника питания прикладывается к зажимам цепи (рисунок 13).

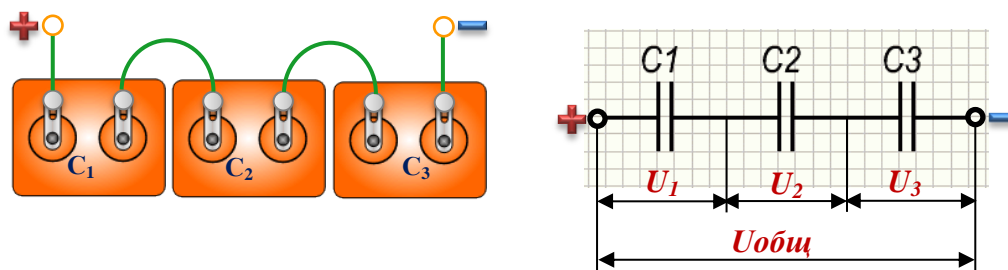


Рисунок 13 – Батарея последовательного соединения конденсаторов

При последовательном соединении эквивалентная емкость определяется по формуле

$$\frac{1}{C_{ЭКВ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (7)$$

Если последовательно соединены два конденсатора, то эквивалентную емкость можно определить по формуле

$$C_{ЭКВ} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (8)$$

При последовательном соединении большого количества конденсаторов с одинаковой емкостью  $C_1=C_2=\dots=C_n$ , эквивалентную емкость можно определить по формуле

$$C_{ЭКВ} = \frac{C_n}{n} \quad (9)$$

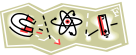
Величина заряда на каждом конденсаторе одинаковая и равна общему заряду батареи независимо от величины емкости конденсаторов

$$Q_1=Q_2=Q_3=Q_{ОБЩ} \quad (10)$$

Напряжение на конденсаторах распределяется обратно пропорционально их емкости. Сумма напряжений на всех конденсаторах равна напряжению всей цепи

$$U_1+U_2+U_3=U_{ОБЩ} \quad (10)$$





Последовательное соединение конденсаторов используют для снижения величины емкости батареи или получения одинакового заряда на всех конденсаторах.

### Параллельное соединение конденсаторов

При параллельном соединении в цепи присутствует два узла, к которым присоединяются все конденсаторы противоположными зажимами (рисунок 14).

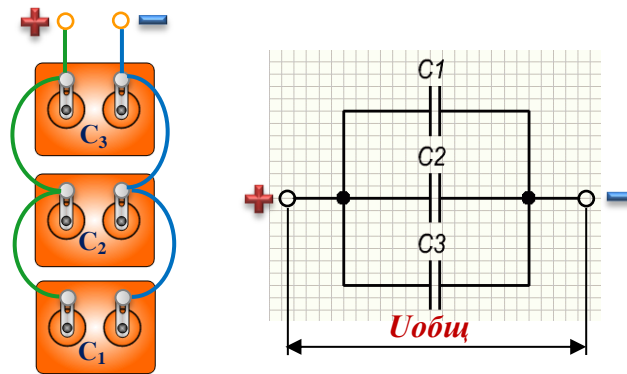


Рисунок 14 – Батарея параллельного соединения конденсаторов

При этом соединении эквивалентная емкость определяется по формуле

$$C_{ЭКВ} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (11)$$

Величина напряжения на каждом конденсаторе одинаковая и равна напряжению источника

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_{ОБЩ} \quad (12)$$

Заряд на конденсаторах распределяется пропорционально их емкости. Общий заряд батареи определяется суммой величин зарядов на каждом конденсаторе

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{ОБЩ} \quad (13)$$

Параллельное соединение конденсаторов используют для увеличения емкости батареи, получения одинакового напряжения на всех конденсаторах.

### Смешанное соединение конденсаторов

В случае смешанного соединения конденсаторов расчет сводится к определению емкости эквивалентного конденсатора, которым можно заменить всю цепь, определению величины напряжения и (или) заряда на каждом конденсаторе.

Расчет эквивалентной емкости батареи смешанного соединения ведут методом «свертывания» цепи со стороны обратной от источника. В результате преобразований в схеме цепи останется один конденсатор с емкостью  $C_{ЭКВ}$  (рисунок 15). Для расчета используют формулы последовательного и параллельного соединений.

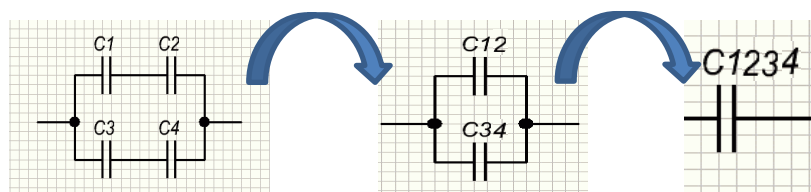
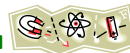


Рисунок 15 – Схемы преобразования батареи смешанного соединения



Так, для схемы на рисунке 15 расчет выполняется следующим образом:

$$- C_{12} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}; \quad C_{34} = \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4}$$

$$- C_{1234} = C_{ЭКВ} = C_{12} + C_{34}$$

Чтобы не допустить ошибки в преобразованиях цепи, рекомендуется вычерчивать схемы цепи при выполнении каждого действия.

Для определения величины напряжения и заряда на каждом конденсаторе используют формулы для последовательного и параллельного соединений.

Энергия заряженного конденсатора, да и всей батареи, определяется по формуле

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q \cdot U}{2}, \text{ Дж} \quad (14)$$

#### **Вопросы для самопроверки**

- 1 Дать определение электрической емкости, указать единицу её измерения.
- 2 Дать определение конденсатора.
- 3 Пояснить классификацию конденсаторов.
- 4 Указать от каких параметров зависит емкость конденсатора?
- 5 Пояснить назначение последовательного соединения конденсаторов, параметры батареи.
- 6 Пояснить назначение параллельного соединения конденсаторов, параметры батареи.





## Тема 1.2 Электрические цепи постоянного тока

### Электрический ток, сопротивление. Закон Ома

#### План лекции

Электрический ток

Сопротивление

Проводимость

Электродвижущая сила

Закон Ома

В проводнике, помещенном в электрическое поле, возникает процесс движения заряженных частиц. В твердых проводниках такими частицами являются электроны, в жидких - ионы.

Направленное движение заряженных частиц называется **электрическим током**. За положительное направление тока принято направление противоположное движению электронов (рисунок 16). Направление тока обозначают стрелкой, расположенной на проводе или возле него.

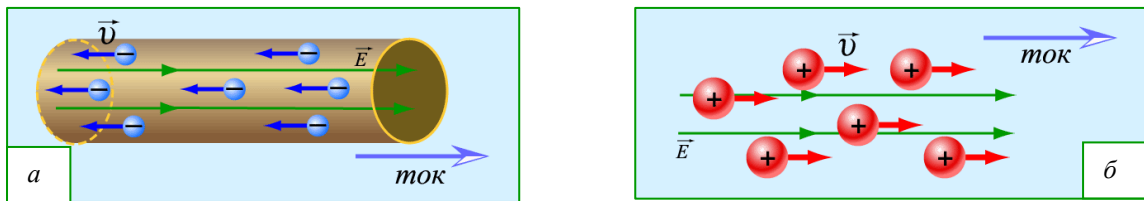


Рисунок 16– Направление тока в металлических (а) и жидких (б) проводниках

Количественной характеристикой тока является сила тока, которая определяется по формуле

$$I = \frac{Q}{t}, \quad (15)$$

где  $Q$  – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

Единицей измерения тока является ампер (А). Кратными и дольными единицами силы тока является килоампер (кА), миллиампер (мА), микроампер (мкА).

В технике, на транспорте, в быту используют постоянный, переменный и пульсирующий ток (рисунок 17).

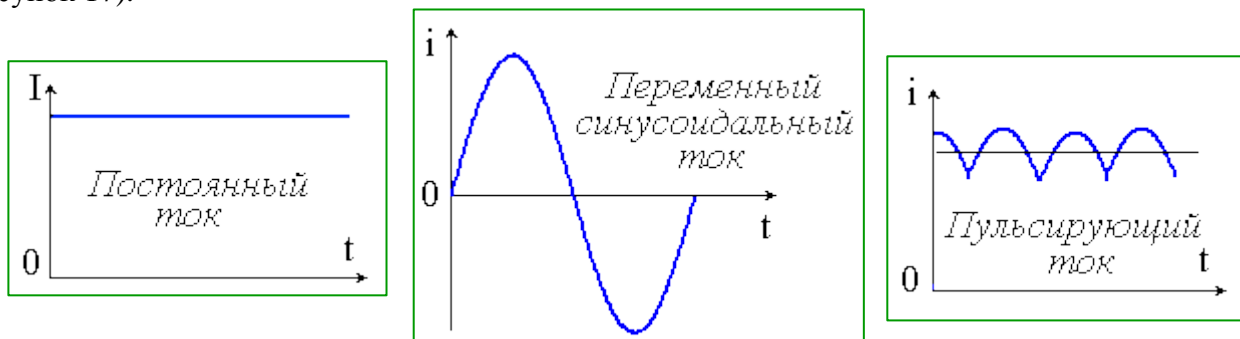
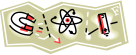


Рисунок 17

Одной из характеристик тока является плотность – величина тока, приходящаяся на  $1 \text{ мм}^2$  поперечного сечения проводника



$$\delta = \frac{I}{S}, \frac{A}{\text{мм}^2} \quad (16)$$

**Постоянным** называют ток, значение и направление которого в любой момент времени остаются неизменными, обозначается буквой **I**. Источниками постоянного тока являются генераторы постоянного тока и химические источники (батарейки, аккумуляторы).

Ток, изменяющийся по величине и направлению с течением времени, называют **переменным**, обозначается буквой **i**. Чаще всего в электротехнических устройствах используют ток, изменяющийся по синусоидальному закону, который получают от генераторов переменного тока.

После выпрямления получают **пульсирующий** ток, неизменный по направлению, но изменяющийся по величине.

Прибором для измерения тока является амперметр, который включается в цепь последовательно (рисунок 18).

Прохождение тока по проводнику сопровождается следующими его действиями:  
*тепловым* (ток вызывает нагревание проводника, по которому он проходит);  
*химическим* (ток вызывает разложение на составные части электролитов);  
*магнитным* (ток создает вокруг любых проводников магнитное поле).

Магнитное действие тока следует рассматривать как наиболее характерное проявление тока. Отмечая это, Фарадей говорил: «Нет действия, более характерного для электрического тока».

Свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока называется **электрическим сопротивлением**.

Электронная теория так объясняет сущность электрического сопротивления металлических проводников. Свободные электроны при движении по проводнику бесчисленное количество раз встречают на своем пути атомы и другие электроны и, взаимодействуя с ними, неизбежно теряют часть своей энергии. Электроны испытывают как бы сопротивление своему движению. Различные металлические проводники, имеющие различное атомное строение, оказывают различное сопротивление электрическому току.

Сопротивление обозначается латинской буквой **R**. За единицу электрического сопротивления принят Ом.

Сопротивление любого проводника определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (17)$$

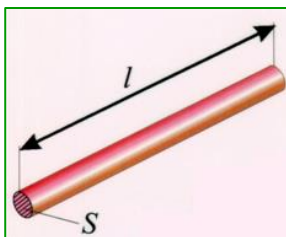


Рисунок 19

где  $l$  – длина проводника, м;

$S$  – площадь поперечного сечения провода,  $\text{мм}^2$ ;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника,  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

За величину, характеризующую удельное сопротивление, обычно принимают сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{мм}^2$ .

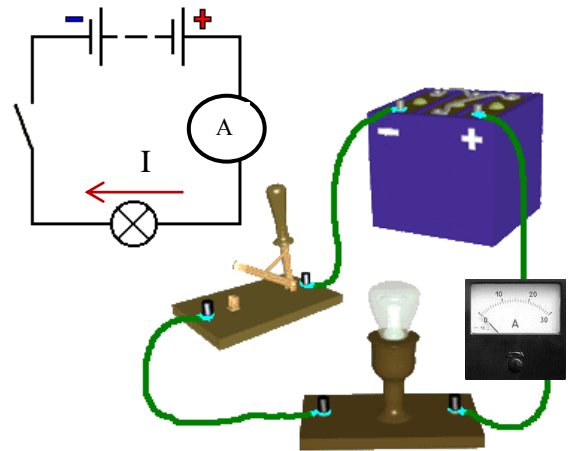
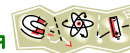


Рисунок 18 – Включение амперметра в цепь





Для создания сопротивления и ограничения тока в электрических цепях используют **резисторы** – устройства с неизменным сопротивлением.



Рисунок 20 – Условное обозначение резистора на схемах

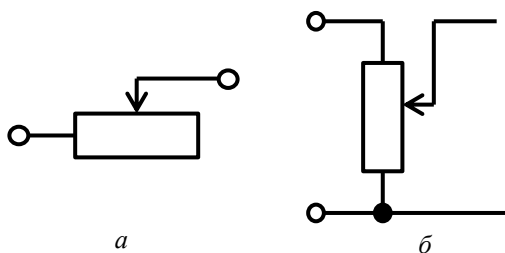


Рисунок 21 – Условное обозначение реостата (а) и потенциометра (б)

Для изменения сопротивления используют реостаты и потенциометры (рисунок 21). Реостат включается в цепь последовательно и изменение его сопротивления вызывает изменение тока в цепи. Потенциометр включается параллельно, изменение его сопротивления вызывает изменение напряжения.

Чем больше сопротивление проводника, тем хуже он проводит электрический ток, и, наоборот, чем меньше сопротивление проводника, тем легче электрическому току пройти через этот проводник.

Лампочка (рисунок 22) обладает более высоким сопротивлением, чем проволока. Поэтому ток в проволоке больше, чем в лампочке. Если к батарейке присоединить лампочку, то батарейка разрядится не так быстро, как если бы к ней присоединили один провод.



Рисунок 22

Для измерения сопротивления любого потребителя используют прибор омметр, который может входить в состав комбинированного прибора (рисунок 23). Измеряют сопротивление на обесточенном потребителе. Стрелочные приборы при коротком замыкании потребителей показывают ноль, при обрыве цепи – бесконечность.

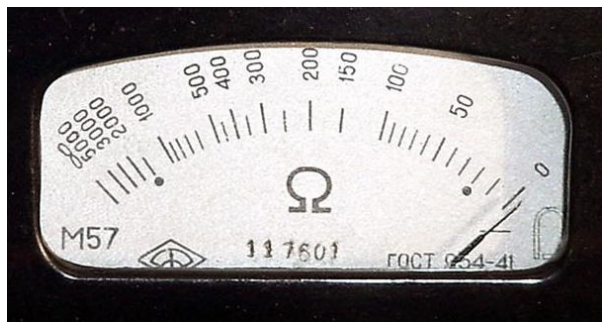
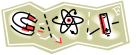


Рисунок 23 – Приборы для измерения сопротивления



Величина, обратная сопротивлению, называется **проводимостью**.

$$g = \frac{1}{R}, \text{ См} \quad (18)$$

Единицей измерения проводимости является сименс. Величина, обратная удельному сопротивлению, называется **удельной проводимостью**

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2} \quad (19)$$

Для прохождения тока в цепи необходим источник электрической энергии с разностью потенциалов.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** представляет собой работу, совершаемую сторонними силами по разделению зарядов в источнике.

Обозначается ЭДС буквой  $E$ , измеряется в вольтах. За направление ЭДС принимают направление действия сторонних сил на положительный заряд. Следовательно, ЭДС в источнике направлена от «минуса» к «плюсу».

Измеряют ЭДС вольтметром на зажимах источника, работающего в режиме холостого хода, т.е. без потребителя.

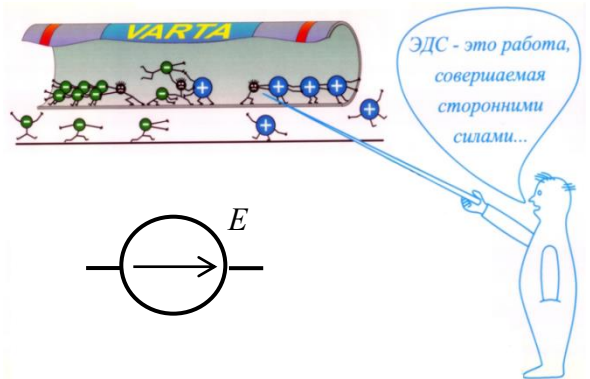


Рисунок 24– Условное обозначение источника ЭДС

Зависимость электрического тока от параметров цепи выражается с помощью закона Ома.

Закон Ома для **полной цепи**: **сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.**

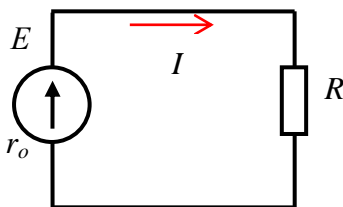


Рисунок 25

$$I = \frac{E}{R + r_0}, \quad (20)$$

где  $R$ —сопротивление потребителя, Ом;

$r_0$ —внутреннее сопротивление источника, Ом.

Внутренним сопротивлением обладают все источники электрической энергии. Если источник механический генератор, то сопротивление его обмотки является внутренним.

Закон Ома для **участка цепи**: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.**

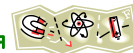
$$I = \frac{U}{R} \quad (21)$$

### Вопросы для самопроверки



- 1 Дать определение электрического тока, указать его направление.
- 2 Назвать признаки, по которым можно определить наличие тока в проводнике.
- 3 Перечислить параметры, от которых зависит величина сопротивления проводника.
- 4 Дать определение проводимости, указать единицу ее измерения.
- 5 Пояснить, что представляет собой электродвижущая сила, как ее измерить?
- 6 Сформулировать закон Ома для участка цепи, для полной цепи.





## Электрическая энергия и мощность. КПД

### План лекции

Электрическая энергия

Мощность

Баланс мощностей

Коэффициент полезного действия

Работа, совершаемая током по переносу заряженных частиц, является *электрической энергией*

$$W = P \cdot t, \quad (22)$$

где  $t$  — время выработки или потребления электрической энергии.

Единицей измерения электрической энергии является Дж (джоуль). Более крупной единицей учета энергии служит кВт·ч (киловатт час), ее используют для учета энергии на транспорте, в промышленности, в быту. Прибором для учета электроэнергии служит счетчик.

При расчете энергии источника и потребителя необходимо учитывать различные напряжения на этих устройствах из-за потери энергии, напряжения при передаче.

Расчетные формулы электрической энергии источника и потребителя отличаются на величину потерь:

энергия источника

$$W_{И} = U_{И} \cdot I \cdot t; \quad (23)$$

энергия потребителя

$$W_{П} = U_{П} \cdot I \cdot t. \quad (24)$$

Потеря энергии в соединительных проводах

$$\Delta W = I^2 \cdot R_{ПП} \cdot t, \quad (25)$$

где  $R_{ПП}$  — сопротивление соединительных проводов.

В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую. В потребителях происходит обратный процесс — электрическая энергия преобразуется в любой вид энергии.

Скорость преобразования одного вида энергии в другой называется *мощностью*.

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R \quad (26)$$

Единицей мощности является Вт (ватт) и более крупная единица кВт (киловатт), прибором для измерения мощности — ваттметр.

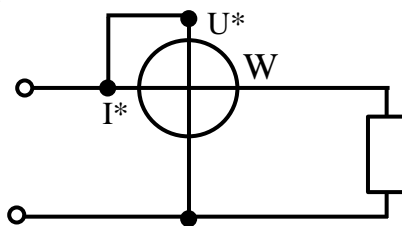


Рисунок 27 – Включение в цепь и условное обозначение ваттметра на схеме



Рисунок 26 – Электронные и индукционный счетчики электрической энергии



В любой электрической цепи существует баланс мощностей. Вся мощность, поставляемая источником в электрическую цепь, расходуется между потребителями, и некоторая часть тратится на преодоление сопротивления соединительных проводов. Равенство между мощностью источника и мощностью потребителя с учетом потерь называется **балансом мощностей**.

$$P_{ист} = P_{потр} + \Delta P \quad (27)$$

где  $\Delta P$  - потери мощности.

Если источников и потребителей несколько, тогда формула баланса мощностей будет иметь вид

$$\Sigma P_{ист} = \Sigma P_{потр} + \Delta P \quad (28)$$

Качество работы электрической цепи, аппаратов и устройств оценивается **коэффициентом полезного действия - КПД**. Определяется КПД отношением полезной мощности к затраченной, выраженным в процентах.

$$\eta = \frac{P_{полез}}{P_{затр}} \cdot 100\% \quad (29)$$

Полезной мощностью является мощность потребителя, а затраченной мощность источника, поэтому КПД можно записать

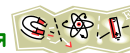
$$\eta = \frac{P_{П}}{P_{И}} \cdot 100\% \quad (30)$$

#### Вопросы для самопроверки



- 1 Пояснить почему энергия источника и потребителя не одинакова?
- 2 Что представляет собой мощность, единица её измерения?
- 3 Почему коэффициент полезного действия не может быть 100%?
- 4 Что представляет собой электрическая энергия, единица её измерения?





## Последовательное соединение резисторов

### План лекции

Распределение напряжения в цепи

Распределение тока в цепи

Эквивалентное сопротивление

Особенности соединения

**Последовательным** называют соединение, при котором условный конец первого потребителя соединяется с условным началом второго, конец второго – с началом третьего и т.д. (рисунок 28).

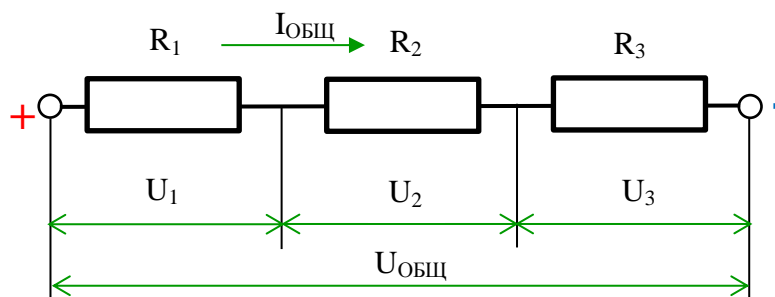


Рисунок 28 – Последовательное соединение резисторов

К источнику цепь подключена крайними зажимами, к которым приложено напряжение  $U_{\text{общ}}$ . На каждом резисторе (потребителе) величина напряжения или падения напряжения будет определяться величиной сопротивления. Согласно закону Ома, чем больше сопротивление, тем больше на нём падение напряжения. **При последовательном соединении сумма напряжений на потребителях равна напряжению на зажимах цепи**

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (31)$$

Поскольку в цепи нет узлов, то по всем участкам проходит один и тот же ток, т.е.

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_{\text{общ}} \quad (32)$$

Увеличение числа последовательно соединенных потребителей приводит к увеличению сопротивления всей цепи. Эквивалентное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений всех потребителей

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (33)$$

Если в цепи последовательного соединения произойдет короткое замыкание одного потребителя, то сопротивление цепи уменьшится на величину короткозамкнутого сопротивления.

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_3 \quad (34)$$

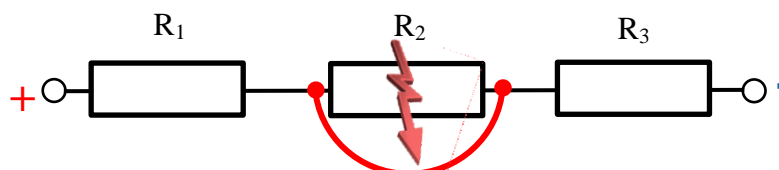
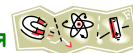


Рисунок 29 – Короткое замыкание в цепи последовательного соединения



Если в цепи перегорит один потребитель, то вся цепь работать не будет. Это является недостатком последовательного соединения, из-за чего соединение применяется редко.

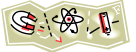
Используют последовательное соединение для увеличения сопротивления цепи и ограничения тока.

### **Вопросы для самопроверки**



- 1 Пояснить как распределяется напряжение на резисторах в цепи последовательного соединения?
- 2 Указать недостаток последовательного соединения.
- 3 Как определить эквивалентное сопротивление цепи последовательного соединения?
- 4 Пояснить назначение последовательного соединения.
- 5 Что происходит с сопротивлением цепи при коротком замыкании одного из резисторов?





## Параллельное соединение резисторов

### План лекции

Распределение напряжения в цепи

Распределение тока в цепи

Эквивалентное сопротивление

Особенности соединения

**Параллельным** называют соединение, при котором все потребители имеют два общие точки соединения (узлы). Схему электрической цепи такого соединения можно изобразить графически (рисунок 30).

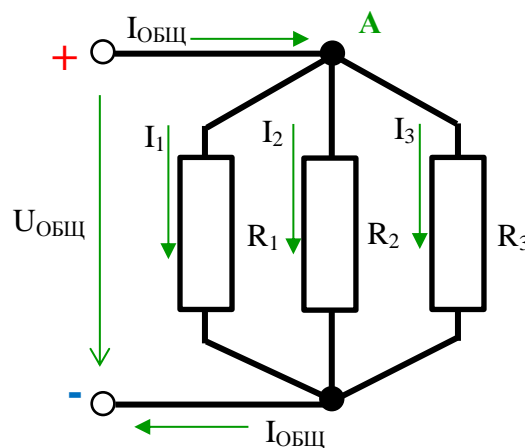


Рисунок 30 – Схема параллельного соединения резисторов

Поскольку все потребители имеют две общие точки, включенные между зажимами источника, то они попадают под одну и ту же разность потенциалов, т.е. под одно напряжение. Следовательно, на всех потребителях величина напряжения одинакова и равна напряжению на зажимах цепи

$$U_{общ} = U_1 = U_2 = U_3 \quad (35)$$

Величина тока, проходящего через резисторы, зависит от величины сопротивления (согласно закону Ома). Токи на резисторах (рисунок 30) обозначим  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , ток всей цепи  $I_{общ}$ . В узел «А» входит общий ток цепи, выходят – токи резисторов, значит

$$I_{общ} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (36)$$

Эта формула является математическим выражением **первого закона Кирхгофа: сумма токов входящих в узел равна сумме токов, выходящих из узла.**

**Узлом** электрической цепи называется точка соединения трех и более проводников.

Первый закон Кирхгофа можно сформулировать иначе. Например, в узел (рисунок 31) входят токи  $I_1$  и  $I$ , выходит ток  $I_2$ , значит  $I_1 + I = I_2$ , а если ток  $I_2$  перенести в левую часть уравнения, то получим  $I_1 - I_2 + I = 0$ .

Тогда **первый закон Кирхгофа** будет сформулирован иначе **алгебраическая сумма всех токов в узле равна нулю**. В этом случае токи, входящие в узел в формуле со знаком «плюс», выходящие - с «минусом».

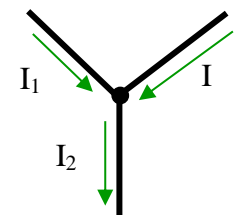
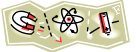


Рисунок 31 – Узел электрической цепи



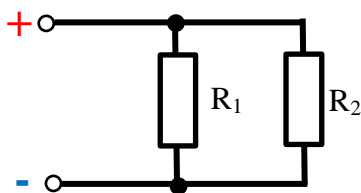
С увеличением числа параллельно соединенных потребителей, увеличивается число путей для прохождения токов, следовательно, увеличивается проводимость цепи

$$g_{общ} = g_1 + g_2 + g_3 \quad (37)$$

Поскольку проводимость величина обратная сопротивлению, то увеличение числа потребителей в параллельной цепи приведет к снижению её сопротивления. Эквивалентное сопротивление цепи можно записать формулой

$$\frac{1}{R_{ЭКВ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (38)$$

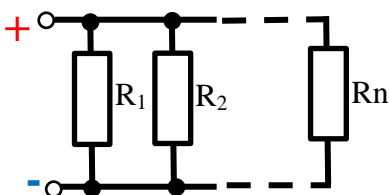
Для двух параллельно соединенных потребителей (рисунок 32) формулу эквивалентного сопротивления цепи можно представить в виде



$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (39)$$

Рисунок 32

Нередко в цепи встречается большое количество потребителей, имеющих одинаковое сопротивление и соединенных параллельно (рисунок 33). В этом случае их эквивалентное сопротивление удобнее определить по формуле



$$R_{ЭКВ} = \frac{R_1}{n} \quad (40)$$

Рисунок 33

Если в цепи параллельного соединения вышел из строя один потребитель, то остальные остаются в работе. Этот факт является достоинством параллельного соединения. Например, если в цепи их трех лампочек одна перегорела, то сохраняются пути прохождения тока, и две лампочки будут работать. Сопротивление цепи при этом увеличится (рисунок 34 а).

Но если произошло короткое замыкание одного потребителя, то произойдет короткое замыкание источника питания электрической цепи (рисунок 34 б). Чтобы источник не вышел из строя, на входе цепи параллельного соединения устанавливают аппараты защиты или ограничивающие ток устройства. Сопротивление цепи при коротком замыкании равняется нулю.

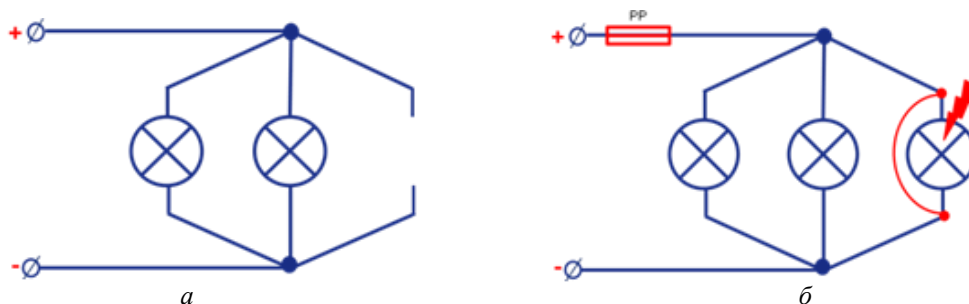


Рисунок 34



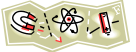


Цепи параллельного соединения используют для снижения величины сопротивления цепи, при необходимости получения одинакового напряжения на потребителях.

### **Вопросы для самопроверки**

- 1 Каково преимущество параллельного соединения по сравнению с последовательным?
- 2 Как распределяется ток на резисторах в цепи параллельного соединения?
- 3 Пояснить опасность параллельного соединения.
- 3 Как определить эквивалентное сопротивление цепи параллельного соединения?
- 4 Назначение параллельного соединения.
- 5 Что происходит с сопротивлением цепи при коротком замыкании одного из резисторов?





## Тема 1.3 Электромагнетизм

### Магнитное поле и его характеристики

#### План лекции

Сведения из истории магнетизма. Магнитное поле Земли

Изображение магнитного поля

Определение направления магнитного поля

Напряженность магнитного поля

Магнитная индукция

Магнитный поток

Магнитное напряжение

Существует древняя легенда, вошедшая в «Сказки тысячи и одной ночи», которую поведал римский естествоиспытатель Плиний. В ней говорится о том, что в Эфиопии существует гора Зимир, которая является бедой для моряков, не знающих о её существовании. Если корабль приближался к горе, то она вытягивала из корабля все гвозди, металлические скрепы и железные части. Но это всего лишь легенда... Магнитные горы, т.е. богатые магнитным железняком действительно существуют, например Магнитная гора, возле которой высятся домны Магнитогорска. Однако сила притяжения подобных гор чрезвычайно мала, почти ничтожна.

Магнитное поле существует внутри любого атома, живые организмы создают магнитные поля (рисунок 35). Магнитное поле Земли защищает нас от потоков солнечной радиации.

В технике, быту, в устройствах железнодорожного транспорта применяются искусственные постоянные магниты и электромагниты. Связь между электрическими и магнитными явлениями была установлена впервые в опытах датского физика Х. Эрстеда, французского физика А. Ампера и др. Опыты доказали существование магнитного поля вокруг любого проводника с током. На основании этого было сделано заключение, что нет более характерного признака наличия тока в проводнике, чем существование вокруг него магнитного поля. Это свойство электрического тока удачно используется в электромагнитах, электромагнитных кранах, реле.

Графически магнитное поле изображается магнитными силовыми линиями, которые имеют направление с севера **N** на юг **S**, никогда не пересекаются и обладают свойством упругости (рисунок 36). Если на небольшом расстоянии находятся одноименные полюса магнитов, то они отталкиваются, если разноименные – притягиваются.

Направление магнитного поля вокруг проводника с током определяют по **правилу буравчика** (рисунок 37): **если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение укажет направление магнитного поля**. Если проводник расположен так, что можно видеть только его поперечное сечение, то направление тока можно показать с помощью стрелки, похожей на дротик. Если ток в проводнике направлен от нас, то в сечении отмечают крестик (рисунок 38, а), если к нам, то точку (рисунок 38, б).



Рисунок 35

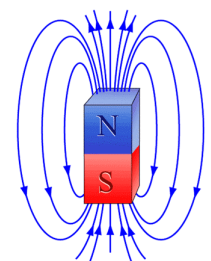


Рисунок 36 – Магнитное поле постоянного магнита

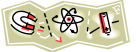


Рисунок 37 – Правило буравчика

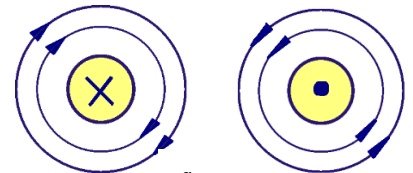


Рисунок 38

Если источником магнитного поля является катушка с током, то направление поля определяют по **правилу правой руки** (рисунок 39): *если ладонью правой руки обхватить катушку так, чтобы четыре пальца совпадали с направлением тока в витках, то отогнутый большой палец покажет направление магнитного поля.*

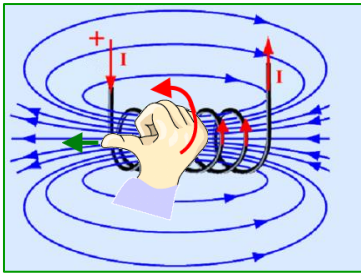


Рисунок 39 – Правило правой руки

Магнитное поле, как особый вид материи, обладает характеристиками. Рассмотрим важнейшие из них.

**Напряженность магнитного поля  $H$**  – силовая характеристика поля, которая учитывает влияние тока и формы проводников. Единица измерения напряженности магнитного поля А/м. Для разных источников магнитного поля используют разные формулы напряженности (рисунок 40).

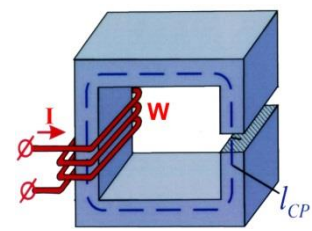
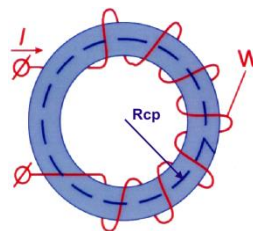
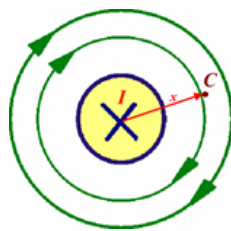


Рисунок 40

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot x} \quad (41)$$

$$H = \frac{I \cdot W}{2\pi \cdot R_{cp}} \quad (42)$$

$$H = \frac{I \cdot W}{l_{cp}} \quad (43)$$

**Магнитная индукция  $B$**  – силовая характеристика магнитного поля, которая определяет интенсивность поля, т.е. способность его производить работу. Чем сильнее магнитное поле, тем большую магнитную индукцию оно имеет. Единица измерения магнитной индукции - Тл (тесла).

$$B = H \mu_a \quad (44)$$

где  $\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость среды.

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_o \quad (45)$$

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость среды (табличное значение);

$\mu_o$  – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Напряженность магнитного поля и магнитная индукция величины векторные, их направление совпадает с направлением касательной в любой точке силовой магнитной линии (рисунок 41).

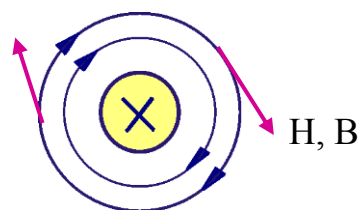
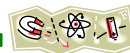


Рисунок 41

**Магнитный поток  $\Phi$**  – интенсивность линий магнитной индукции через площадь  $S$ , ограниченную контуром, единица измерения **Вб** (Вебер)

$$\Phi = B \cdot S \quad (46)$$

**Магнитное напряжение  $U_m$**  – напряженность магнитного поля между двумя точками, единица измерения **А** (ампер)

$$U_m = H \cdot l, \quad (47)$$

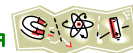
где  $l$  – расстояние между двумя точками, м.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Как изображается магнитное поле на рисунках?
- 2 Сформулировать правило для определения направления магнитного поля вокруг прямолинейного проводника.
- 3 Сформулировать правило для определения направления магнитного поля вокруг катушки с током.
- 4 Указать параметры, от которых зависит напряженность магнитного поля.
- 5 Пояснить чем отличается магнитная индукция от напряженности магнитного поля.
- 6 Назвать единицы измерения магнитной индукции, магнитного потока, магнитного напряжения, напряженности магнитного поля.





## Электромагнитная индукция

### План лекции

Опыты Фарадея

Образование ЭДС

Правило правой руки

Самоиндукция

Вихревые токи

Из школьного курса физики известны опыты Фарадея, в которых в катушке возникнет электрический ток, если подносить постоянный магнит к катушке или наоборот (рисунок 42). Это явление называют **явлением электромагнитной индукции**, а ток – **индукционным**.



Рисунок 42 – Опыты Фарадея

Если проводник перемещать в магнитном поле, то в нем происходит разделение зарядов на положительные и отрицательные, т.е. возникает начальная разность потенциалов, электродвижущая сила - ЭДС.

Величина ЭДС определяется по формуле

$$E = B \cdot V \cdot l \cdot \sin \alpha, \text{ В} \quad (48)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$V$  – скорость движения проводника или магнитного поля, м/с;

$l$  – активная длина проводника (длина той части проводника, которая попала в магнитное поле), м;

$\alpha$  – угол между линиями магнитного поля и проводником.

Направление ЭДС электромагнитной индукции определяют по правилу **правой руки**: **если ладонь правой руки расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в нее, большой отогнутый палец указывал направление движения проводника** (т.е. направление его скорости), **то четыре пальца укажут направление ЭДС**.

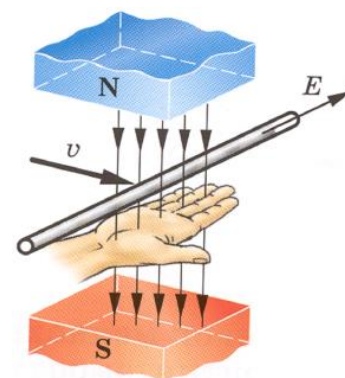


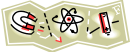
Рисунок 43 – Правило правой руки

Явление электромагнитной индукции используется в работе электрических генераторов.

Если по витку, катушке или любому замкнутому контуру проходит изменяющийся ток, то вокруг них возникает изменяющееся (переменное) магнитное поле, которое наводит в них ЭДС.

Явление возникновения ЭДС в проводнике с током под действием собственного изменяющегося магнитного поля называется **самоиндукцией**. Величина ЭДС самоиндукции определяется по формуле

$$e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}, \quad (49)$$



где  $L$ -индуктивность, коэффициент, который зависит от параметров контура, Гн;

$\frac{di}{dt}$  - скорость изменения тока, А/с.

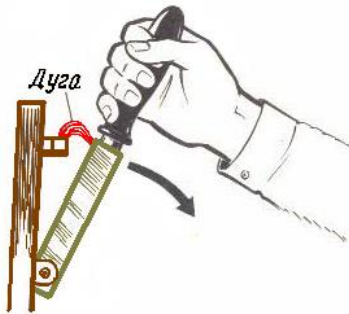


Рисунок 44—Возникновение электрической дуги при размыкании цепи

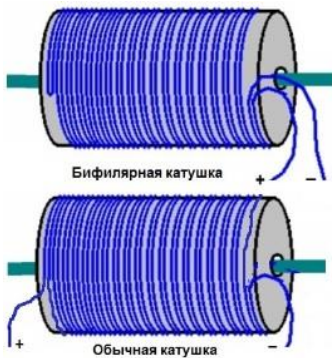


Рисунок 45

Самоиндукция возникает в любом проводе с изменяющимся током. В цепи постоянного тока самоиндукция наблюдается в момент размыкания цепи. Тогда в месте разрыва цепи может возникнуть электрическая дуга (рисунок 44). Для гашения дуги в высоковольтных цепях устанавливают дугогасительные камеры.

ЭДС самоиндукции создает сопротивление любому изменению тока. В тех устройствах, где самоиндукция весьма нежелательна, катушку катушек выполняют бифилярно (рисунок 45).

Благодаря ЭДС самоиндукции заряженные частицы переменного тока выталкиваются на поверхность проводника, возникает поверхностный эффект (рисунок 46). По этой причине проводники переменного тока выполняют биметаллическими — середина из стали, а поверхность из меди.

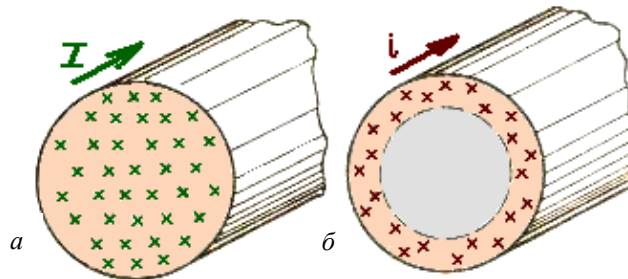


Рисунок 46—Распределение тока по поперечному сечению  
а) проводник с постоянным током;  
б) проводник с переменным током.

Изменяющийся, переменный ток, проходя по катушке со стальным сердечником, наводит изменяющийся магнитный поток. Магнитный поток индуцирует (наводит, образует) ЭДС электромагнитной индукции и в поперечном сечении сердечников возникают **вихревые токи** или токи Фуко (рисунок 47).

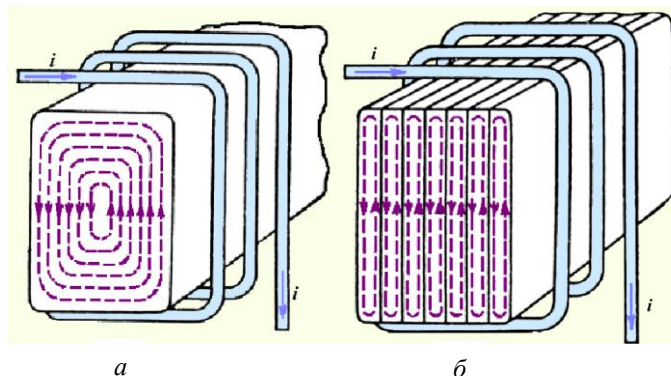
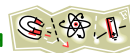


Рисунок 47 – Образование вихревых токов  
а) монолитный сердечник;  
б) шихтованный сердечник.

Опасность вихревых токов:

- нежелательный нагрев сердечников;
- потери энергии;



- размагничивающее действие сердечников;
- неравномерное распределение магнитного потока по сечению магнитопровода.

*Способы снижения вихревых токов:*

- сердечники электрических машин, аппаратов выполняют шихтованными, т.е. набирают из отдельных стальных пластин, изолированных друг от друга;
- в состав электротехнической стали вводят до 4% кремний.

Несмотря на вредное воздействие вихревых токов, их тепловое действие используется (рисунок 48).

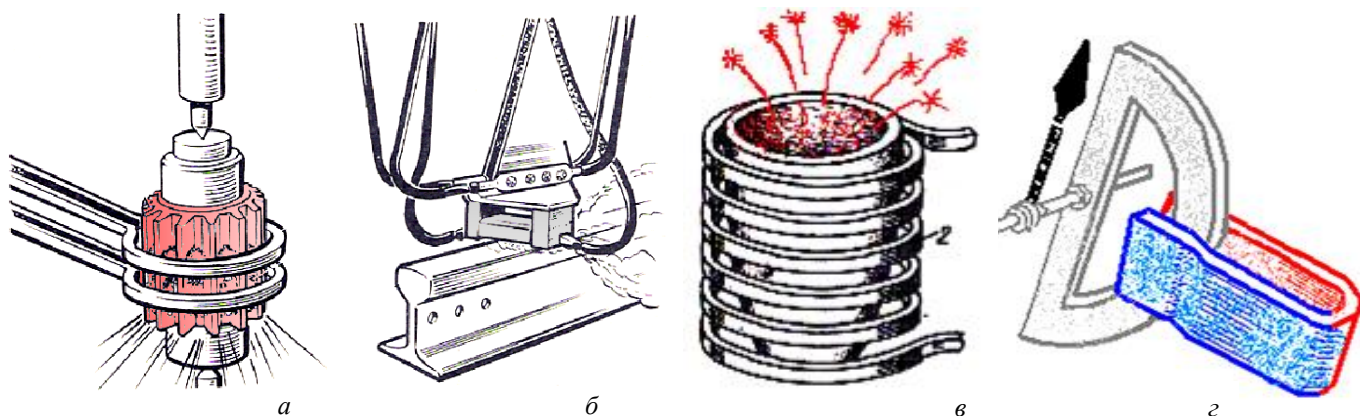


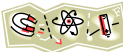
Рисунок 48—Практическое применение вихревых токов

- а) поверхностный разогрев деталей;*
- б) закалка головки рельса;*
- в) индукционные печи;*
- г) успокоители электроизмерительных приборов.*

### **Вопросы для самопроверки**

- 1 Пояснить суть явления электромагнитной индукции.
- 2 Сформулировать правило для определения направления ЭДС электромагнитной индукции.
- 3 В чем заключается опасность самоиндукции?
- 4 Где возникает вихревой ток?
- 5 Указать опасность и способы снижения вихревого тока.





## Тема 1.4 Электрические цепи переменного тока

### Основные характеристики цепей переменного тока

#### План лекции

Определение переменного тока

График переменного тока

Период и частота переменного тока

Мгновенное, амплитудное и действующее значения

Фазы, начальная фаза, сдвиг по фазе

**Переменным** называют ток, изменяющийся по величине и направлению с течением времени. Большим преимуществом переменного тока, обеспечивающим ему повсеместное применение, является возможность просто и почти без потерь трансформировать его, т.е. возможность получать ток различного напряжения — высокого для дальних электропередач и низкого для питания потребителей.

Если графиком переменного тока является синусоида, то ток называется синусоидальным (рисунок 49).

Все значения переменного тока повторяются через одинаковые промежутки времени, называемые **периодом**— $T$  (с). В течение одной половины периода ток имеет одно направление, в течение следующей половины — другое, противоположное направление.

Величина, обратная периоду, т.е. число периодов в секунду, называется **частотой** переменного тока

$$f = \frac{1}{T} \quad (50)$$

Единицей частоты является герц (**Гц**). В нашей стране промышленная частота равна 50 Гц, т.е. в одну секунду происходит 50 полных изменений тока, 100 раз ток изменяет свое направление.

Величину  $\omega$ , пропорциональную частоте  $f$  и равную угловой скорости вращения радиус-вектора, называют **угловой частотой**. Угловую частоту выражают в радианах в секунду (**рад/с**) или в  $1/с$  и определяют по формуле

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f \quad (51)$$

Значение переменной величины в любой момент времени называют **мгновенным** значением и обозначают строчными буквами: мгновенное значение тока— $i$ , мгновенное значение напряжения— $u$ , мгновенное значение эдс— $e$ . Мгновенное значение определяется по аналитической записи:

$$\text{мгновенное значение тока } i = Im \cdot \sin \omega t \quad (52)$$

$$\text{мгновенное значение напряжения } u = Um \cdot \sin \omega t \quad (53)$$

$$\text{мгновенное значение ЭДС } e = Em \cdot \sin \omega t \quad (54)$$

Наибольшее значение переменной величины за половину периода называют **максимальным** или **амплитудным** значением: амплитудное значение тока— $Im$ , амплитудное значение напряжения— $Um$ , амплитудное значение эдс— $Em$ .

Оценивать способность переменного тока совершать механическую работу или создавать тепло принято по его действующему значению. **Действующим** значением переменного тока

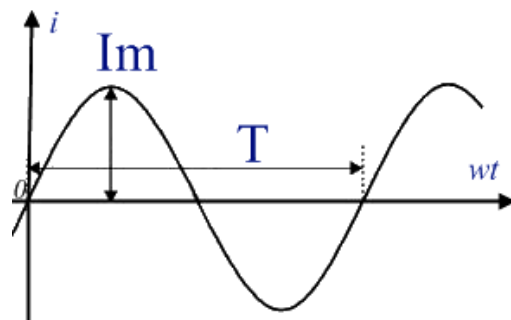


Рисунок 49—График переменного тока





называют такое значение постоянного тока, при котором выделяется столько же тепла как при переменном, на том же сопротивлении и за то же время. Действующие значения обозначаются прописными буквами: ток— $I$ , напряжение— $U$ , эдс— $E$ . На шкалах измерительных приборов наносят действующее значение переменных величин.

Действующее значение переменной величины меньше амплитудного в 1,41 раз, т.е. для определения действующего значения используют формулы

$$I = \frac{Im}{\sqrt{2}}; \quad (55)$$

$$U = \frac{Um}{\sqrt{2}}; \quad (56)$$

$$E = \frac{Em}{\sqrt{2}}; \quad (57)$$

Графически изображенный на рисунке 49 переменный ток можно описать выражениями  $i = Im \cdot \sin \omega t$  или  $i = Im \cdot \sin(\omega t + \psi)$ . Здесь  $\omega t$  и  $(\omega t + \psi)$  - **фазы**, характеризующие значения тока  $i$  в заданный момент времени;  $\psi$  - **начальная фаза**, определяющая значение тока при  $t = 0$ . Для тока  $i$  на рисунке 49 начальная фаза равна нулю ( $\psi = 0$ ). Разность начальных фаз двух переменных величин с одинаковой частотой называют **сдвигом по фазе  $\varphi$** .

Угол  $\psi$  (начальную фазу) всегда отсчитывают от нулевого значения синусоидальной величины при переходе ее от отрицательных значений к положительным до начала координат ( $t=0$ ). При этом положительную начальную фазу откладывают влево от начала координат (в сторону отрицательных значений  $\omega t$ ), а отрицательную начальную фазу - вправо. Изображение переменной величины с помощью графика называется волновой или векторной диаграммой.

Изображать переменные величины можно с помощью векторной диаграммы. На этой диаграмме изображают векторы амплитудных или действующих значений в масштабе. Для построения отмечают базисный вектор – горизонтальный луч, направленный слева на право. Если начальная фаза переменной величины положительная, то вектор этой величины откладывается против хода часовой стрелки от базисного. Если начальная фаза переменной величины отрицательная, то вектор этой величины откладывается по ходу часовой стрелки от базисного (рисунок 50).

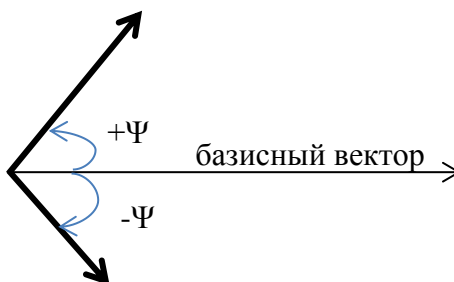
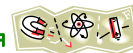


Рисунок 50

### Вопросы для самопроверки

- 1 Дать определение переменному току.
- 2 Пояснить, какое значение переменного тока называют действующим.
- 3 Рассчитать амплитудное значение тока, если действующее значение 10 А.
- 4 Записать мгновенное значение переменного напряжения.
- 5 Дать определение фазе, начальной фазе.





## Цепь переменного тока с одним сопротивлением

### План лекции

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Цепь переменного тока с индуктивностью

Цепь переменного тока с емкостью

**Активным** называют сопротивление, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется в другой вид. Это сопротивление обозначается  $R$  и измеряется в омах (Ом). На схемах активное сопротивление изображают в виде резистора, т.е. также как сопротивление в цепях постоянного тока.

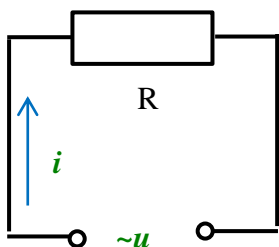


Рисунок 51 – Цепь переменного тока с активным сопротивлением

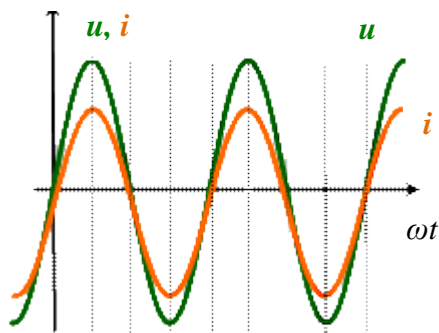


Рисунок 52 – Волновая (временная) диаграмма тока и напряжения

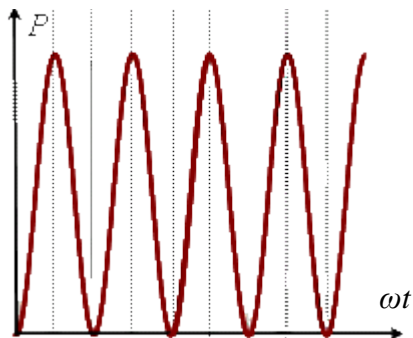


Рисунок 53 – График изменения активной мощности

Если цепь содержит только активное сопротивление  $R$ , входное напряжение  $u = Um \sin \omega t$  будет создавать ток

$$i = \frac{u}{R} = \frac{Um}{R} \cdot \sin \omega t = Im \cdot \sin \omega t \quad (58)$$

В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе.

Закон Ома для цепи с активным сопротивлением в действующих значениях имеет вид

$$I = \frac{U}{R} \quad (59)$$

Мощность на активном сопротивлении называется активной, обозначается  $P$ , измеряется в ваттах (**Вт**). Для определения активной мощности пользуются формулами

$$P = I \cdot U = I^2 \cdot R \quad (60)$$

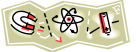
График изменения активной мощности представлен на рисунке 53. Из графика видно, что активная мощность всегда положительная, это указывает на то, что не зависимо от направления тока и напряжения электрическая энергия преобразуется в тепловую.

Активным сопротивлением в цепи переменного тока обладают лампы накаливания, нагревательные приборы, резисторы и т.д.



Рисунок 54 – Векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением

Помимо активного сопротивления в цепи переменного тока присутствует реактивное сопротивление. **Реактивным** является сопротивление, обусловленное передачей энергии переменным током электрическому или магнитному полю (и обратно). Реактивными сопротивлениями в цепи переменного тока являются индуктивное и емкостное.



**Индуктивное сопротивление** – это сопротивление катушки или проводника переменному току, вызванное действием ЭДС самоиндукции. Оно обозначается  $X_L$  и измеряется в омах.

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L \quad (61)$$

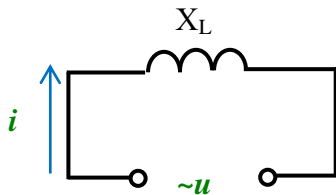


Рисунок 55 – Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением

При включении в цепь переменного тока индуктивности (рисунок 55) возникает ЭДС самоиндукции, ток  $i$  отстает по фазе от напряжения на угол  $90^\circ$  или, что то же самое, напряжение опережает ток по фазе на угол  $90^\circ$ .

Следовательно, если приложенное напряжение  $u = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ ,

то мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (62)$$

Закон Ома для цепи с индуктивным сопротивлением в действующих значениях имеет вид

$$I = \frac{U}{X_L} \quad (63)$$

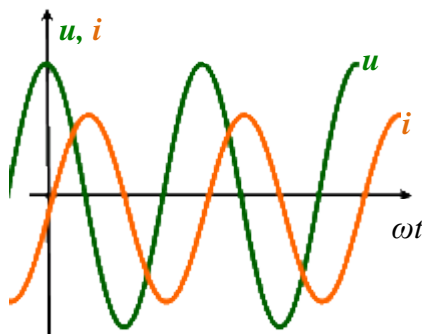


Рисунок 56 – Волновая (временная) диаграмма тока и напряжения

Мощность на индуктивном сопротивлении называется реактивной индуктивной, обозначается  $Q_L$ , измеряется в варах (**вар**). Для определения реактивной индуктивной мощности пользуются формулами

$$Q_L = I \cdot U = I^2 \cdot X_L \quad (64)$$

График изменения напряжения и тока на индуктивности представлен на рисунке 56, векторная диаграмма на рисунке 57.

Индуктивным сопротивлением в цепи переменного тока обладают катушки, обмотки, все те потребители, которые имеют витки.

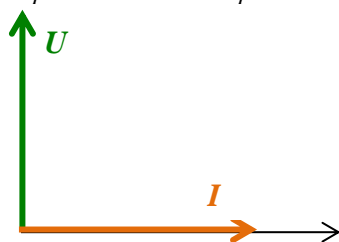


Рисунок 57 – Векторная диаграмма цепи с индуктивным сопротивлением

**Емкостное сопротивление** – это сопротивление, которое оказывает конденсатор переменному току. Это сопротивление обозначается  $X_C$ , измеряется в омах.

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (65)$$

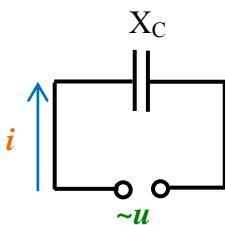


Рисунок 58 – Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением

При включении в цепь переменного тока емкости (рисунок 58) в ней проходит периодический заряд и разряд конденсатора. Из-за этого процесса ток  $i$  опережает по фазе напряжение на угол  $90^\circ$  или, что то же самое, напряжение отстает от тока по фазе на угол  $90^\circ$ .

Следовательно, если приложенное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ ,

то мгновенное значение тока

$$i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (66)$$

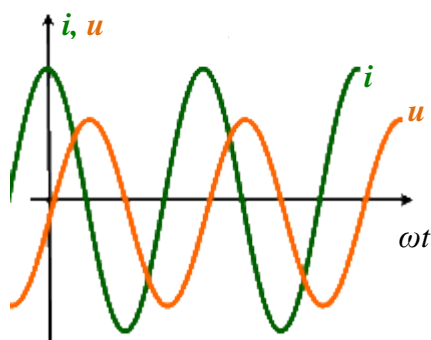
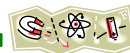


Рисунок 59 – Волновая (временная) диаграмма тока и напряжения

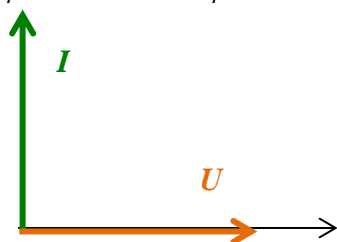


Рисунок 60 – Векторная диаграмма цепи с емкостным сопротивлением

Закон Ома для цепи с индуктивным сопротивлением в действующих значениях имеет вид

$$I = \frac{U}{X_C} \quad (67)$$

Мощность на емкостном сопротивлении называется реактивной емкостной, обозначается  $Q_C$ , измеряется в варах (*вар*). Для определения реактивной емкостной мощности пользуются формулами

$$Q_C = I \cdot U = I^2 \cdot X_C \quad (68)$$

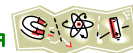
График изменения напряжения и тока на емкости представлен на рисунке 59, векторная диаграмма на рисунке 60.

Емкостным сопротивлением в цепи переменного тока обладают конденсаторы и все те потребители, которые представляют собой проводники, разделенные диэлектриком.

### Вопросы для самопроверки

- 1 Указать единицы измерения активной и реактивной мощностей.
- 2 Пояснить, почему на индуктивности ток отстает от напряжения.
- 3 Записать формулы индуктивного и емкостного сопротивлений.
- 4 Записать мгновенное значение напряжения и тока на емкости.
- 5 Дать определение активному сопротивлению.





## Расчет цепи переменного тока

### План лекции

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости

Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости

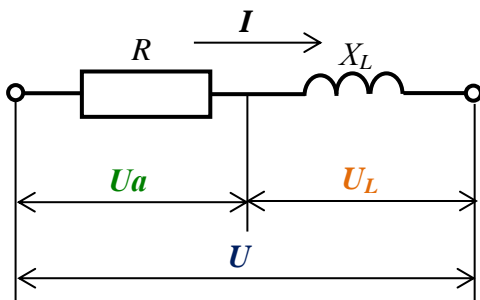


Рисунок 61

При последовательном соединении активного сопротивления и индуктивности (рисунок 61) на всех участках цепи проходит один ток. На каждом сопротивлении величина падения напряжения зависит от величины сопротивления. На активном сопротивлении напряжение  $U_A$ , на индуктивном –  $U_L$ , напряжение всей цепи –  $U$ .

Общее напряжение цепи при последовательном соединении определяется суммой напряжений на каждом участке.

Но, поскольку, между током цепи и напряжениями на сопротивлениях разный угол сдвига по фазе, то сумма может быть только векторная

$$\vec{U} = \vec{U}_A + \vec{U}_L \quad (69)$$

Для определения численного значения напряжения цепи необходимо построить векторную диаграмму. При построении за базисный вектор принимают вектор той величины, которая одинакова для всех сопротивлений. В цепи последовательного соединения это ток.

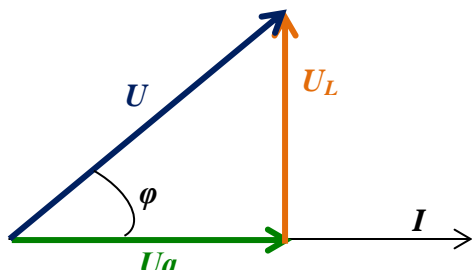


Рисунок 62 – Треугольник напряжений

Из векторной диаграммы (рисунок 62) видно, что вектор напряжения всей цепи является гипотенузой прямоугольного треугольника. Из треугольника величина напряжения цепи определяется по теореме Пифагора

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_L^2} \quad (70)$$

При последовательном соединении активного и индуктивного сопротивлений напряжение всей цепи опережает ток на угол  $\phi$ . Величину угла  $\phi$  можно определить по тригонометрическим функциям

$$\cos \phi = \frac{U_A}{U} \quad (71)$$

$$\sin \phi = \frac{U_L}{U} \quad (73)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{U_L}{U_A} \quad (74)$$

Если каждую из сторон треугольника напряжений разделить на ток, то получим треугольник сопротивлений.

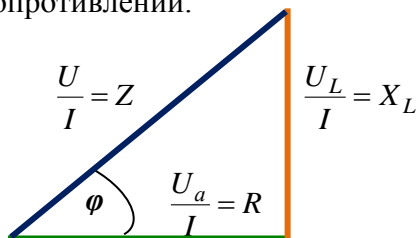
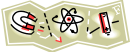


Рисунок 63 – Треугольник сопротивлений

В треугольнике сопротивлений два катета являются сопротивлениями – активным  $R$  и индуктивным  $X_L$ , а гипотенуза – полное сопротивление  $Z$ , Ом.

Из треугольника полное сопротивление равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (75)$$



Величину угла  $\varphi$  можно определить из треугольника сопротивлений по тригонометрическим функциям

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (76)$$

$$\sin \varphi = \frac{X_L}{Z} \quad (77)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R} \quad (78)$$

Если каждую из сторон треугольника напряжений умножить на ток, то получим треугольник мощностей.

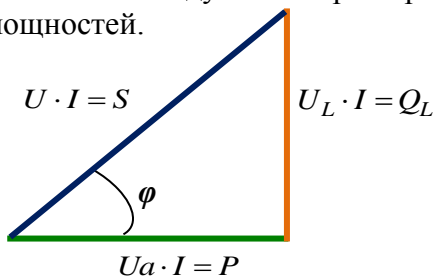


Рисунок 64 – Треугольник мощностей

В треугольнике мощностей два катета являются мощностями – активной  $P$  и реактивной индуктивной  $Q_L$ , а гипотенуза – полная мощность  $S$ , ВА.

Из треугольника полная мощность равна

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2} \quad (79)$$

Величину угла  $\varphi$  можно определить из треугольника мощностей по тригонометрическим функциям

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (80)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_L}{S} \quad (81)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_L}{P} \quad (82)$$

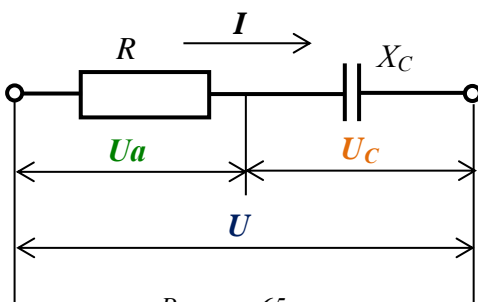


Рисунок 65

При последовательном соединении активного сопротивления и емкости (рисунок 65) на всех участках цепи проходит один ток. На каждом сопротивлении величина падения напряжения зависит от величины сопротивления. На активном сопротивлении напряжение  $U_a$ , на емкостном –  $U_c$ , напряжение всей цепи –  $U$ .

Общее напряжение цепи при последовательном соединении определяется суммой напряжений на каждом участке.

Но, поскольку, между током цепи и напряжениями на сопротивлениях разный угол сдвига по фазе, то сумма может быть только векторная

$$\vec{U} = \vec{U}_A + \vec{U}_C \quad (83)$$

Для определения численного значения напряжения цепи необходимо построить векторную диаграмму. При построении за базисный вектор принимают вектор той величины, которая одинакова для всех сопротивлений. В цепи последовательного соединения это ток.

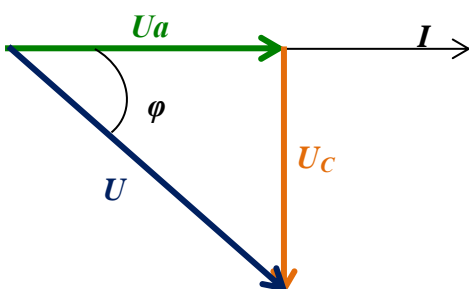
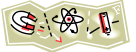


Рисунок 66 – Треугольник напряжений

Из векторной диаграммы (рисунок 66) видно, что вектор напряжения всей цепи является гипотенузой прямоугольного треугольника. Из треугольника величина напряжения цепи определяется по теореме Пифагора

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_C^2} \quad (84)$$

При последовательном соединении активного и емкостного сопротивлений напряжение всей цепи отстает от тока на угол  $\varphi$ . Величину угла  $\varphi$  можно определить по тригонометрическим функциям



$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} \quad (85)$$

$$\sin \varphi = \frac{U_C}{U} \quad (86)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C}{U_a} \quad (87)$$

Если каждую из сторон треугольника напряжений разделить на ток, то получим треугольник сопротивлений.

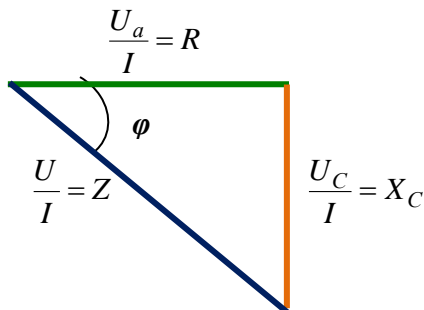


Рисунок 67 – Треугольник сопротивлений

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (89)$$

$$\sin \varphi = \frac{X_C}{Z} \quad (90)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} \quad (91)$$

В треугольнике сопротивлений два катета являются сопротивлениями – активным  $R$  и емкостным  $X_C$ , а гипотенуза – полное сопротивление  $Z$ , Ом.

Из треугольника полное сопротивление равно

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (88)$$

Величину угла  $\varphi$  можно определить из треугольника сопротивлений по тригонометрическим функциям угла

Если каждую из сторон треугольника напряжений умножить на ток, то получим треугольник мощностей.

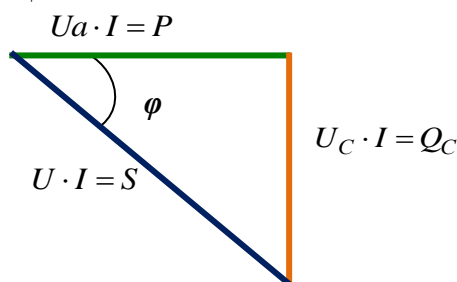


Рисунок 68 – Треугольник мощностей

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (93)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_C}{S} \quad (94)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_C}{P} \quad (95)$$

В треугольнике мощностей два катета являются мощностями – активной  $P$  и реактивной емкостной  $Q_C$ , а гипотенуза – полная мощность  $S$ , ВА.

Из треугольника полная мощность равна

$$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2} \quad (92)$$

Величину угла  $\varphi$  можно определить из треугольника мощностей по тригонометрическим функциям

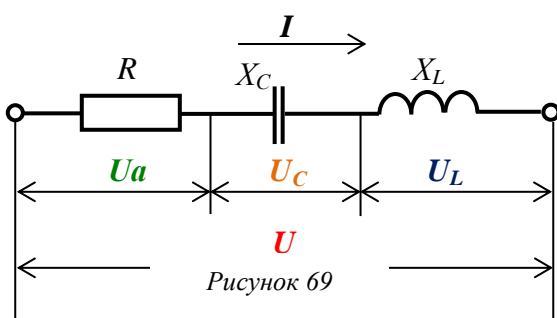


Рисунок 69

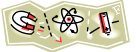
При последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности и емкости (рисунок 69) на всех участках цепи проходит один ток. На каждом сопротивлении величина падения напряжения зависит от величины сопротивления. На активном сопротивлении напряжение  $U_a$ , на емкостном –  $U_C$ , на индуктивном –  $U_L$ , напряжение всей цепи –  $U$ .

Общее напряжение цепи при последовательном соединении определяется суммой напряжений на каждом участке.

Но, поскольку, между током цепи и напряжениями на сопротивлениях разный угол сдвига по фазе, то сумма может быть только векторная

$$\vec{U} = \vec{U}_A + \vec{U}_C + \vec{U}_L \quad (96)$$

Для определения численного значения напряжения цепи необходимо построить векторную диаграмму.



Цепь может работать в трех режимах: когда  $X_L > X_C$ , когда  $X_C > X_L$  и когда  $X_L = X_C$ . При построении за базисный вектор принимают вектор той величины, которая одинакова для всех сопротивлений. В цепи последовательного соединения это ток.

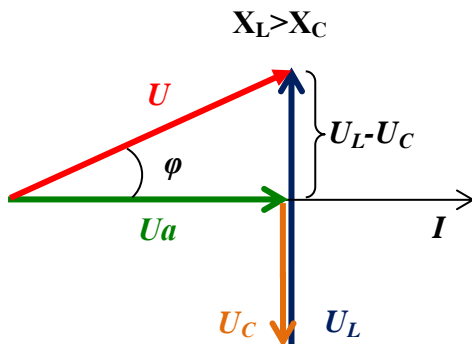


Рисунок 70 - Треугольник напряжений

Из треугольника напряжений

$$U = \sqrt{U_A^2 + (U_L - U_C)^2} \quad (97)$$

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}; \quad \sin \varphi = \frac{U_L - U_C}{U};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_a}$$

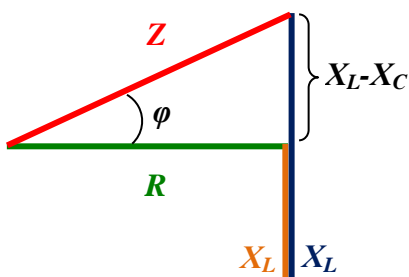


Рисунок 71 - Треугольник сопротивлений

Из треугольника сопротивлений

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (98)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{Z};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

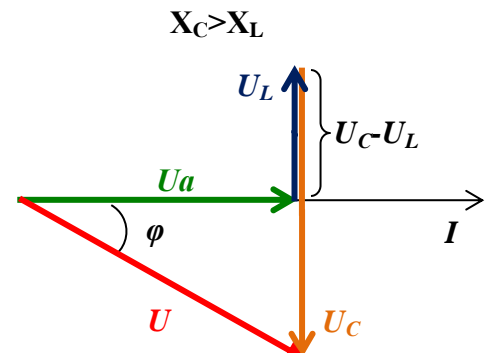


Рисунок 72 - Треугольник напряжений

Из треугольника напряжений

$$U = \sqrt{U_A^2 + (U_C - U_L)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}; \quad \sin \varphi = \frac{U_C - U_L}{U};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C - U_L}{U_a}$$

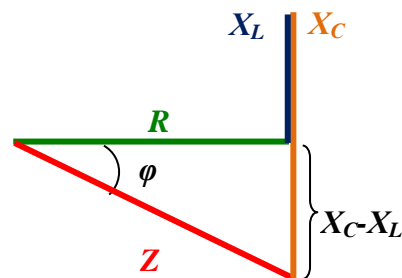


Рисунок 73 - Треугольник сопротивлений

Из треугольника сопротивлений

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_C - X_L}{Z};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C - X_L}{R}$$



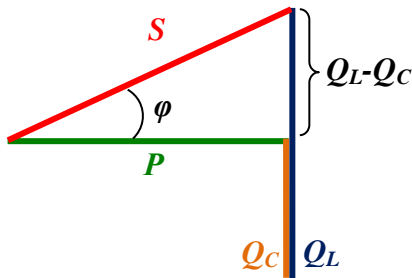
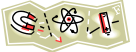


Рисунок 74 – Треугольник мощностей

Из треугольника мощностей

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2} \quad (99)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \sin \varphi = \frac{Q_L - Q_C}{S};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_L - Q_C}{P}$$

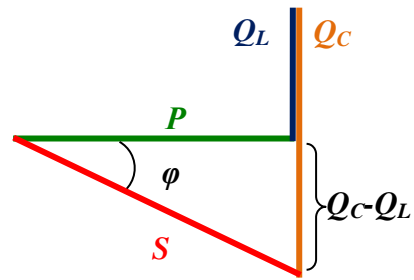


Рисунок 75 – Треугольник мощностей

Из треугольника мощностей

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_C - Q_L)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \sin \varphi = \frac{Q_C - Q_L}{S};$$

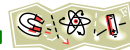
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q_C - Q_L}{P}$$

В том случае, когда реактивные сопротивления равны между собой, т.е.  $X_L = X_C$ , в цепи наступает режим называемый резонанс напряжений.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Указать обозначение и единицу измерения полного сопротивления.
- 2 Пояснить принцип построения векторной диаграммы для цепи последовательного соединения активного сопротивления и емкости.
- 3 Записать формулы для определения полной мощности.
- 4 Пояснить принцип построения векторной диаграммы для цепи последовательного соединения активного сопротивления и индуктивности.
- 5 Какой вектор принимают за базисный при построении векторных диаграмм в цепи последовательного соединения?



## Тема 1.5 Трехфазные цепи

### Соединение обмоток трехфазного генератора

#### План лекции

Получение трехфазной системы ЭДС

Временная и векторная диаграммы

Соединение обмоток «звездой»

Соединение обмоток «треугольником»

**Трехфазным** называют ток, получаемый от источника с тремя обмотками – фазами. Источником трехфазного тока является **синхронный генератор** (рисунок 76).

Неподвижная часть синхронного генератора называется **статором**. Он представляет собой сердечник, в пазах которого уложены три фазы под углом  $120^\circ$  относительно друг друга. Согласно ГОСТу фазы окрашены в желтый, зеленый и красный цвета. Начала фаз обозначают буквами А, В, С, концы фаз – X, Y, Z.

Подвижную часть синхронного генератора называют **ротором**. Он представляет собой электромагнит, обмотку которого подключают к источнику постоянного тока, например к аккумулятору.

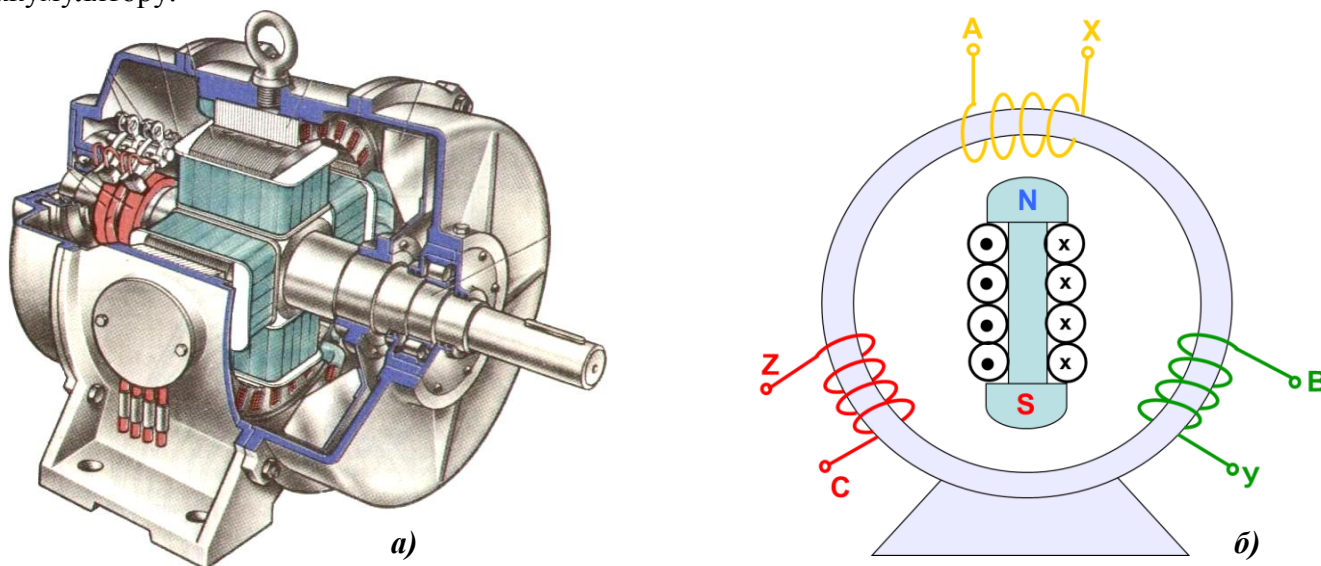


Рисунок 76 – Синхронный генератор  
а) конструкция б) принципиальное устройство

При вращении ротора его магнитное поле пересекает фазы статора и в них наводятся три ЭДС. Величины ЭДС одинаковы, но имеют разные начальные фазы, т.к. обмотки генератора на статоре сдвинуты на  $120^\circ$

$$e_A = Em \cdot \sin \omega t \quad (100)$$

$$e_B = Em \cdot \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (101)$$

$$e_C = Em \cdot \sin (\omega t + 120^\circ) \quad (102)$$

Волновая диаграмма трехфазной системы ЭДС представлена на рисунке 77, векторная на рисунке 78.

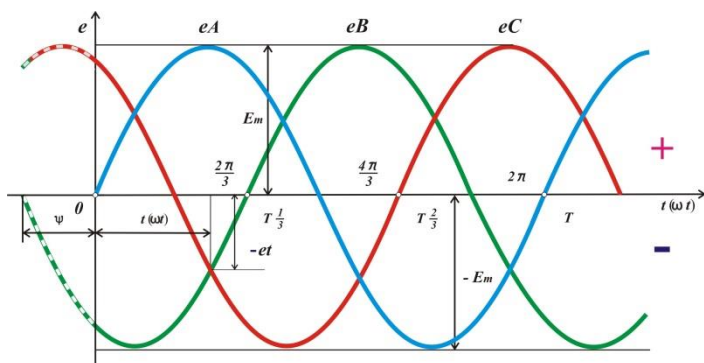


Рисунок 77 – Волновая диаграмма трехфазной системы ЭДС

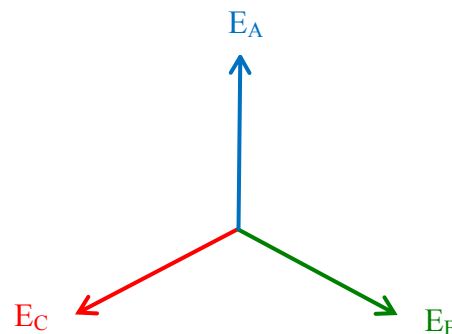


Рисунок 78 – Векторная диаграмма

Система трехфазного генератора, при которой фазы не соединены между собой (несвязанная система), не используется. В трехфазных генераторах фазы соединяются между собой «звездой» или «треугольником». Соединения выполняют в клеммной коробке, расположенной на корпусе генератора.

Соединение, при котором концы фаз X, Y, Z соединены в одну точку, а к началам фаз A, B, C подключены линейные провода, называется **соединением «звездой»**. Общая точка соединения концов фаз называется **нулевой 0** или **нейтральной N** и из неё выводят провод, называемый **нулевым** или **нейтральным**. Из начал фаз выводят провода, называемые **линейными A, B, C** (рисунок 79). Схема соединения фаз приведена на рисунке 80.

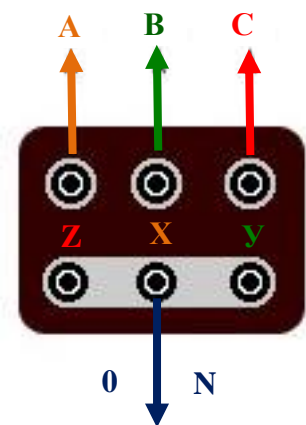


Рисунок 79 – Соединение «звездой» в клеммной коробке

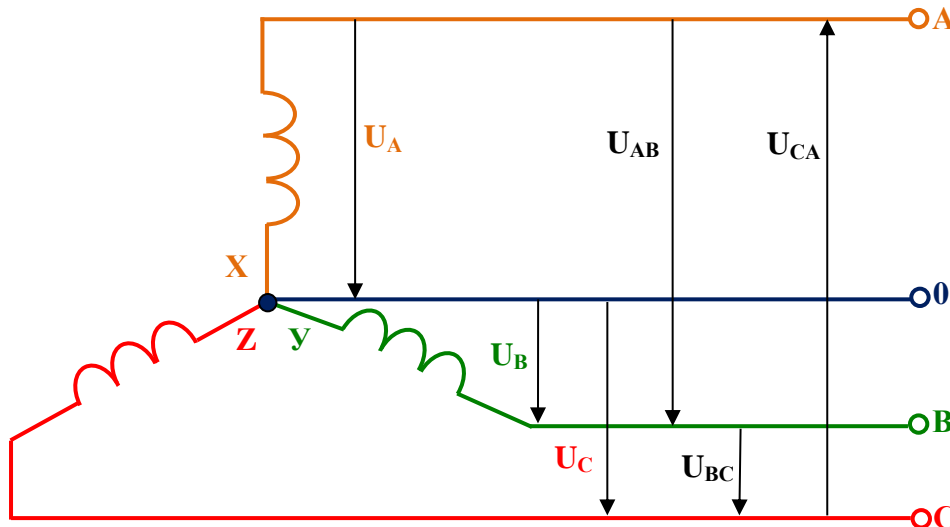


Рисунок 80 – Электрическая схема соединения обмоток генератора «звездой»

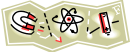
На рисунке 80 обозначены напряжения трехфазной цепи: фазные  $U_{\phi} - U_A, U_B, U_C$ , которые измеряют между линейным проводом и нулевым, и линейные  $U_{л} - U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , которые измеряют между двумя линейными проводами.

При соединении «звездой» фазное напряжение меньше линейного в 1,73 раза

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \tag{103}$$

Из-за разницы между линейным и фазным напряжением существует линейка стандартных напряжений

U <sub>ф</sub> , В	127	220	380
U <sub>л</sub> , В	220	380	660



Векторная диаграмма напряжений трехфазного генератора, соединенного «звездой» содержит шесть напряжений – три фазных, три линейных (рисунок 81). Фазные напряжения  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  расположены под углом  $120^\circ$  друг к другу. Соединив концы фазных напряжений, получают линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ , направленные против хода часовой стрелки.

Линейные напряжения определяются векторной разностью фазных напряжений

$$\begin{aligned} \vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A. \end{aligned} \quad (104)$$

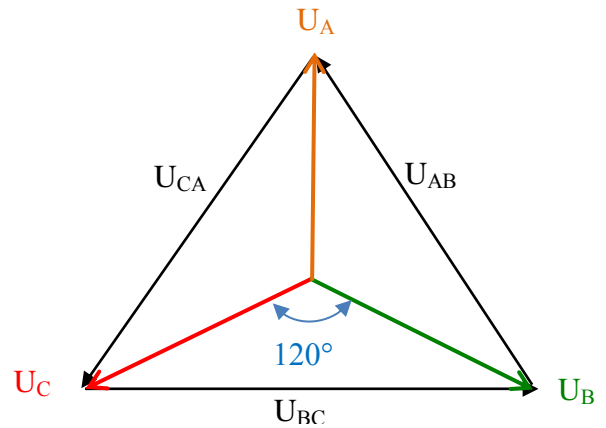


Рисунок 81 – Векторная диаграмма напряжений при соединении «звездой»

Соединение, при котором конец первой фазы соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой и из точек соединения выводят линейные провода, называется **соединением «треугольником»** (рисунок 82). Схема соединения фаз приведена на рисунке 83.

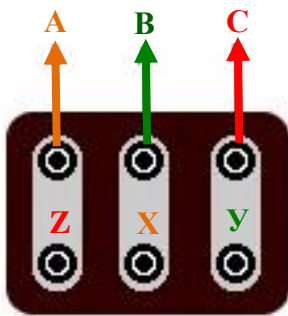


Рисунок 82 – Соединение «треугольником» в клеммной коробке

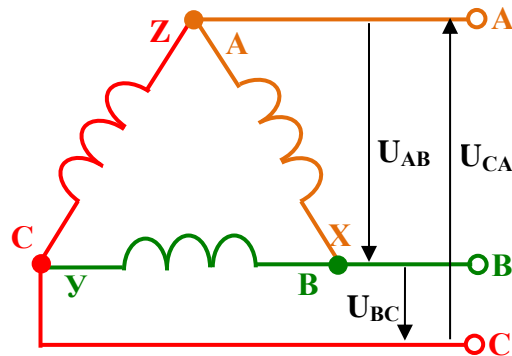


Рисунок 83 – Электрическая схема соединения обмоток генератора «треугольником»

При этом соединении фазные напряжения становятся равными линейным напряжениям

$$U_{л} = U_{\phi} \quad (105)$$

Векторная диаграмма представляет собой треугольник напряжений с углами  $60^\circ$  (рисунок 84).

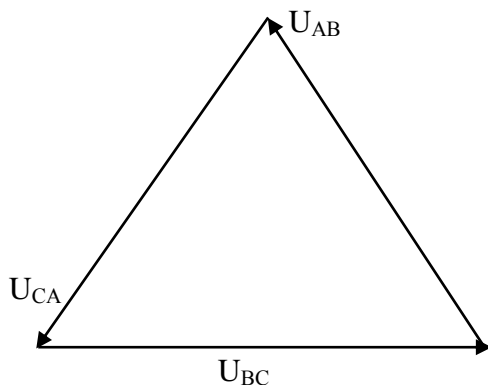


Рисунок 84 – Векторная диаграмма напряжений при соединении «треугольником»

При соединении «треугольником» обмотки образуют замкнутый контур. Короткого замыкания в контуре не происходит, т.к. геометрическая сумма ЭДС фаз в любой момент равна нулю.

Недостатком соединения обмоток генератора «треугольником» является возможность получения только фазного (оно же линейное) напряжения.

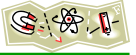


### **Вопросы для самопроверки**



- 1 Указать преимущество соединения «звездой».
- 2 Пояснить принцип построения векторной диаграммы напряжений для соединения «звездой».
- 3 Указать какое напряжение измерит вольтметр, включенный между линейным и нулевым проводами.
- 4 Пояснить разницу между фазным и линейным напряжениями при соединении «треугольником».
- 5 Как выполнить соединение «звездой», «треугольником» в клеммной коробке генератора?





## Соединение нагрузки «звездой», «треугольником»

### План лекции

Соединение потребителей «звездой»

Соединение потребителей «треугольником»

При соединении «звездой» концы фаз потребителей X, Y, Z соединяют в нулевую точку, которая подключается к нейтральному проводу. К началам фаз A, B, C присоединяют линейные провода.

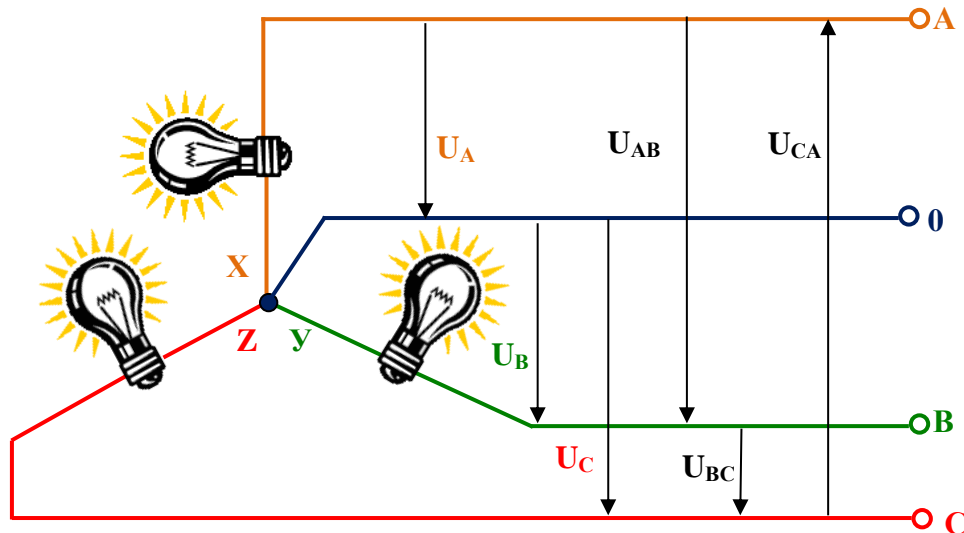


Рисунок 85 – Схема соединения потребителей «звездой»

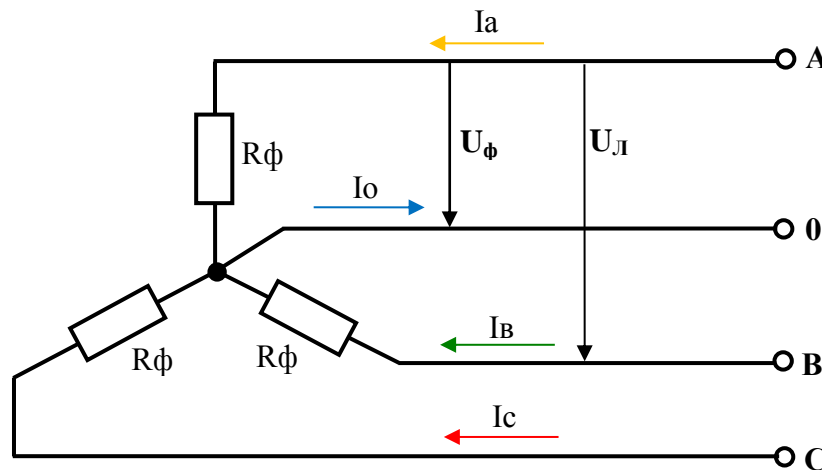


Рисунок 86 - Схема соединения потребителей «звездой» (активная нагрузка)

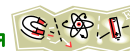
Так же, как при соединении обмоток генератора «звездой», напряжения между началом и концом фазы, т.е. между линейным проводом и нулевым называются фазными  $U_\phi$ :  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ . Напряжения между двумя линейными проводами называются линейными  $U_L$ :  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

При соединении фаз «звездой» фазное напряжение меньше линейного  $U_L$  в 1,73 раза

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, B \quad (106)$$

Ток фазный равен току линейному

$$I_\phi = I_L \quad (107)$$



В нулевом проводе ток, согласно первому закону Кирхгофа, равен векторной сумме токов фаз, т.е.

$$\vec{I}_O = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C, A \tag{108}$$

При **равномерной нагрузке**, когда сопротивления фаз равны между собой, токи фаз равны между собой и поэтому, ток в нулевом проводе отсутствует. При неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе определяется по векторной диаграмме (рисунок 87).

Следовательно, при неравномерной нагрузке нулевой провод необходим, т.к. по нему будет проходить ток, а также с помощью нулевого провода выравнивается напряжение на фазах потребителей.

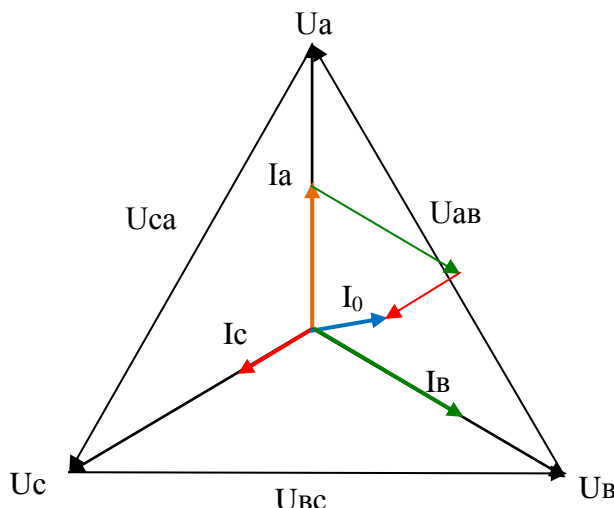


Рисунок 87 – Векторная диаграмма при соединении «звездой» при неравномерной активной нагрузке фаз

При соединении потребителей «треугольником» образуется замкнутый контур, т.к. конец каждой фазы соединяется с началом следующей (рисунок 88). Из точек соединения выводят линейные провода.

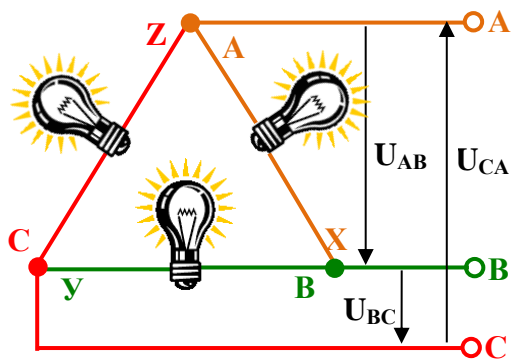


Рисунок 88 – Схема соединения потребителей «треугольником»

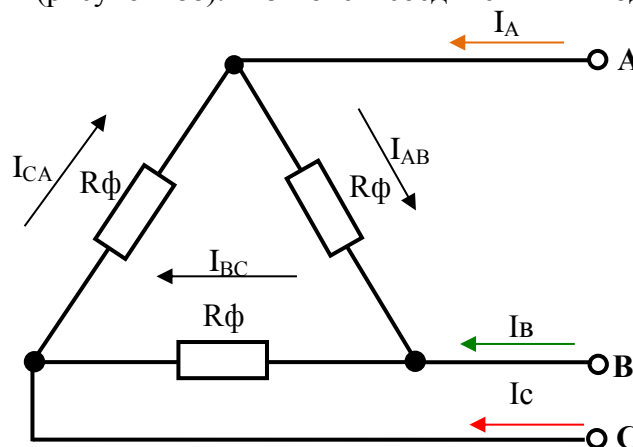
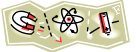


Рисунок 89 - Схема соединения потребителей «треугольником» (активная нагрузка)

Фазные напряжения в цепи равны линейным

$$U_{л} = U_{\phi} \tag{109}$$

По линейным проводам проходят линейные токи  $I_{л}$ :  $I_A, I_B, I_C$ . По фазам проходят фазные токи  $I_{\phi}$ :  $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$ .



При равномерной нагрузке фазные токи меньше линейных токов в 1,73 раза

$$I_{\phi} = \frac{I_l}{\sqrt{3}}, A \quad (110)$$

При неравномерной нагрузке линейные токи определяют согласно первому закону Кирхгофа по векторной диаграмме (рисунок 90) разностью фазных токов

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad (111)$$

$$\vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad (112)$$

$$\vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}. \quad (113)$$

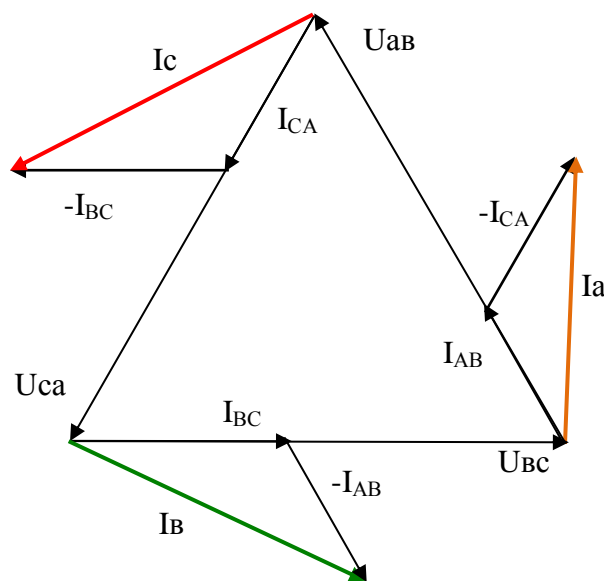


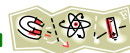
Рисунок 90 – Векторная диаграмма при соединении «треугольником» при неравномерной активной нагрузке фаз

### Вопросы для самопроверки

- 1 Объяснить как определить ток в нулевом проводе?
- 2 Дать определение равномерной нагрузке.
- 3 Указать, какое напряжение измерит вольтметр, включенный между линейными проводами.
- 4 Пояснить разницу между фазным и линейным напряжениями при соединении «звездой».
- 5 Начертить схему соединения «звездой», «треугольником».
- 6 Пояснить назначение нулевого провода.







## Тема 1.6 Электрические измерения

### Средства измерения электрических величин

#### План лекции

Классификация приборов

Общие детали приборов

Маркировка приборов

Электроизмерительные приборы предназначены для контроля работы электрических устройств, измерения электрических параметров.

Классификацию электроизмерительных приборов можно рассмотреть по нескольким направлениям.

1 По размеру корпуса:

1.1 крупные;

1.2 средние;

1.3 малые;

1.4 миниатюрные.

2 По степени точности:

2.1 образцовые;

2.2 лабораторные;

2.3 рабочие.

3 По роду измеряемого тока:

3.1 постоянного тока;

3.2 переменного тока;

3.3 переменного-постоянного тока;

3.4 пульсирующего тока;

3.5 трехфазного тока.

4 По группе эксплуатации:

4.1 **A** – сухие, отапливаемые помещения;

4.2 **B** – сухие, неотапливаемые помещения;

4.3 **B1** – полевые;

4.4 **B2** – морские;

4.5 **T** – тропические.

5 По системам, т.е. по способу преобразования измеряемой величины в механическое усилие, перемещающее стрелку:

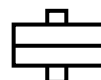
5.1 магнитоэлектрическая



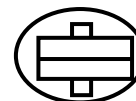
5.2 электромагнитная



5.3 электродинамическая



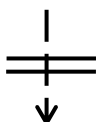
5.4 ферродинамическая



5.5 индукционная



5.6 электростатическая



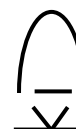
5.7 выпрямительная



5.8 тепловая



5.9 термоэлектрическая



5.10 вибрационная



В любом электроизмерительном приборе имеются подвижные и неподвижные части, имеются детали, которые различны по форме, но имеют одинаковое назначение.



### Корпус

Предназначен для защиты измерительного механизма от пыли, механических повреждений и т.д.

	<b>форма корпуса</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• круглая</li> <li>• фасонная</li> <li>• прямоугольная</li> </ul>
	<b>размер корпуса</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• крупный</li> <li>• средний</li> <li>• малый</li> <li>• миниатюрный</li> </ul>



Рисунок 91 – Формы корпуса: а – фасонная; б – круглая; в – прямоугольная

Выполняется корпус из пластмассы, металла, стекла.

### Шкала

Это поверхность с нанесенными делениями, которая может быть бумажной или металлической.

По своему характеру шкалы приборов бывают: равномерными, у которых расстояния между двумя смежными отметками равны по всей шкале, и неравномерными, имеющими разные расстояния между отметками одинаковых величин в разных частях шкалы.



Рисунок 92 – Разновидности шкалы: а – равномерная; б – неравномерная; в – зеркальная

### Крепление подвижной части

В зависимости от системы электроизмерительного прибора основным элементом его подвижной части может быть не только ферромагнитный сердечник, но также алюминиевый диск, вибрирующий якорь, рамка или катушка, намотанная тонким изолированным проводом.

В приборах, не имеющих обмоток на подвижной части, применяют оси из стальной проволоки или же из тонкой латунной, или алюминиевой трубочки с вставленными в нее с обеих сторон стальными заостренными кернами (рисунок 93). Они упираются в подпятники из твердого камня — сапфира, агата или рубина. Подпятник заправлен в оправку.

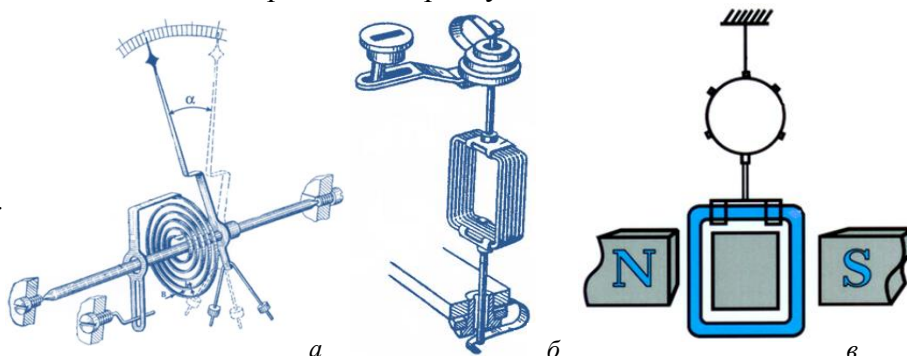
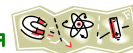


Рисунок 93 – Крепление подвижной части: а – на оси; б – на растяжках; в – на подвесе



В приборах, подвижная часть которых выполнена в виде рамки с обмоткой, используют полуоси. Установка подвижной части в зависимости от конструкции прибора может быть вертикальной или горизонтальной.

Для уменьшения трения в подпятниках, особенно в приборах высокой чувствительности, подвижную часть укрепляют на растяжках или на подвесе из фосфористой бронзы. В последнее время растяжки применяют для крепления подвижной части в переносных и даже в щитовых электроизмерительных приборах. Этим повышается чувствительность и значительно снижается энергия, потребляемая прибором.

#### **Успокоение электроизмерительных приборов**

Измеряя электрическую величину, прибор включают в цепь, при этом его подвижная часть со стрелкой в течение некоторого времени совершает колебания относительно положения полного равновесия. Для быстрой остановки стрелки при измерении используют успокоители воздушные и магнитоиндукционные (рисунок 94).

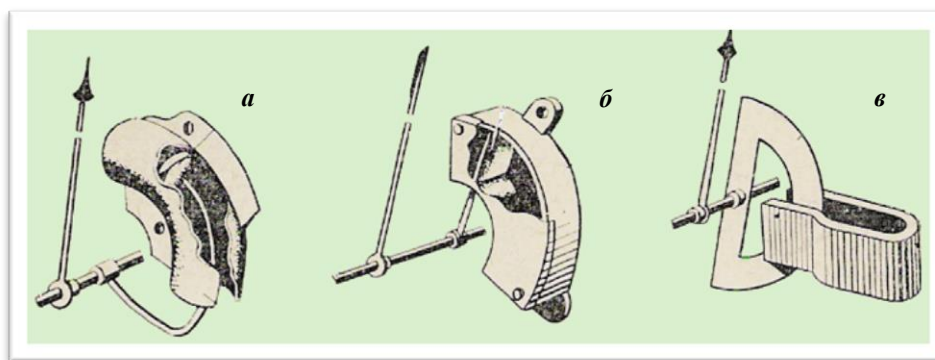


Рисунок 94 – Виды успокоителей:

*а* – воздушный поршневой; *б* – воздушный крыльчатый; *в* - магнитоиндукционный

В воздушном успокоителе поршень или крыльчатка, жестко скрепленные с осью прибора, перемещаются в закрытом цилиндре или камере. Между поршнем (крыльчаткой) и цилиндром (камерой) существует небольшой зазор. При движении поршня по обе стороны его возникает разность воздушного давления, способствующая перемещению воздуха из одной части камеры в другую, что приводит к торможению поршня (крыльчатки) и успокоению подвижной части прибора.

Магнитоиндукционный успокоитель состоит из алюминиевого сектора, жестко закрепленного на оси с указательной стрелкой прибора. Сектор расположен между полюсами постоянного магнита. При повороте оси подвижной части прибора алюминиевый сектор пересекает магнитный поток между полюсами и в секторе индуцируются вихревые токи.

Взаимодействие наведенных токов с магнитным потоком приводит к торможению движения сектора, а следовательно, к успокоению подвижной части прибора.

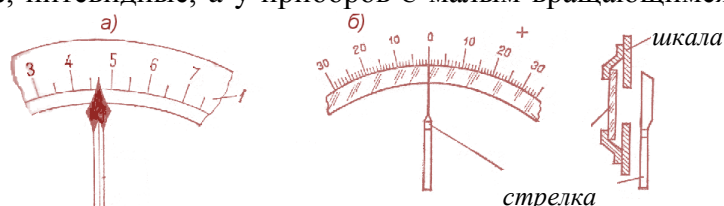
В некоторых измерительных приборах в качестве магнитоиндукционных успокоителей используются элементы подвижной части прибора, как, например, алюминиевый каркас рамки в магнитоэлектрическом приборе.

#### **Указательная стрелка**

Для определения измеряемой величины, показывающие измерительные приборы снабжаются указательной стрелкой, выполненной из алюминия или его сплавов. Применяются копьевидные стрелки, ножевидные, нитевидные, а у приборов с малым вращающимся моментом используются теньевые указатели.

Рисунок 95 – Виды стрелок:

*а* – копьевидная; *б* – ножевидная





**Корректор** – предназначен для установки подвижной части прибора на нуль в не рабочем состоянии.

**Арретир** — устройство, фиксирующее подвижную часть прибора. Это необходимо для устранения колебаний подвижной части прибора при переносках. Такие приспособления применяются главным образом у приборов, подвижная часть которых укреплена на растяжках или на подвесе.

Все основные характеристики электроизмерительных приборов указаны на шкале а помощью специальной маркировки. Согласно ГОСТ на шкале должны быть указаны следующие данные:

1 название прибора

**A**-амперметр; **mA** – миллиамперметр; **μA** – микроамперметр; **V** – вольтметр; **kV** – киловольтметр; **W** – ваттметр; **Ω** – омметр; **φ** – фазометр; **Hz** – частотомер;

2 род измеряемого тока

- - постоянный; ~ - переменный;  $\approx$  - постоянно-переменный;  $\text{---}$  - пульсирующий;

$\approx$  - трехфазный;

3 система прибора (обозначение рассмотрено выше);

4 положение прибора при измерении

→, □ - горизонтально; ↑, ⊥ - вертикально;  $\angle 30^\circ$  - под углом

5 группа эксплуатации (обозначение рассмотрено выше), группа **A** на приборе не ставится;

6 напряжение испытания изоляции (в килловольтах)



или



7 защита прибора от внешних полей



- первая и вторая категория защиты от внешнего магнитного поля;



- первая и вторая категория защиты от внешнего электрического поля;

8 тип прибора

например, Э 370 – буква обозначает систему прибора (электромагнитная), цифры город изготовитель и номер модели прибора;

9 год выпуска и заводской номер прибора.

### Вопросы для самопроверки

1 Дать определение равномерной шкале.

2 Пояснить классификацию приборов по системам.

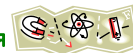
3 Указать назначение успокоителя прибора.

4 Пояснить классификацию приборов по типу крепления подвижной части.

5 Пояснить классификацию приборов по группе эксплуатации.

6 Пояснить назначение корректора.





## Устройство электроизмерительных приборов

### План лекции

*Устройство и работа приборов магнитоэлектрической системы*

*Устройство и работа приборов электромагнитной системы*

*Устройство и работа приборов электродинамической системы*

Измерительный механизм прибора **магнитоэлектрической системы** состоит из постоянного магнита, изготовленного из высококачественной никельалюминиевокобальтовой стали (альни, альнико, магнико) и магнитопровода с полюсными наконечниками. Между ними установлен строго центрированный стальной цилиндр, благодаря чему в зазоре, образованном между полюсными наконечниками и цилиндром, сосредоточено сильное, равномерное, радиально направленное магнитное поле.

Подвижной частью измерительного механизма служит легкая алюминиевая рамка с обмоткой из тонкой (диаметром 0,02—0,2 мм) изолированной медной или алюминиевой проволоки. Рамка установлена в зазоре, не касаясь полюсных наконечников и стального цилиндра. С торцовых сторон к рамке приклеены специальные буксы, в которые вставлены стальные керны. Они являются полуосями рамки. Концы кернов упираются в подпятники и закрепленные в верхнем и нижнем мостиках.

Концы обмотки рамки соединены со спиральными пружинами, предназначенными для создания противодействующего момента жестко скрепленными с полуосями. Эти пружинки служат одновременно токопроводящими проводниками, соединяющими обмотку рамки с измерительной схемой прибора.

На передней полуоси рамки укреплена указательная стрелка с балансными грузиками. Спиральная пружина соединена с рычажком корректора. Над измерительным механизмом размещена шкала. Измерительный механизм и другие детали измерительной схемы прибора укреплены на основании из пластмассы или металла и закрыты защитным пластмассовым или металлическим корпусом, имеющим застекленное смотровое окно.

При протекании постоянного электрического тока по обмотке рамки прибора возникает механическое взаимодействие между магнитным полем тока и полем постоянного магнита. На каждую из сторон рамки действуют силы  $F$ , направление которых определяется правилом левой руки. Они образуют пару сил, создающую вращающий момент, который поворачивает рамку на определённый угол  $\alpha$ .

В измерительных механизмах магнитоэлектрической системы для успокоения подвижной части используется алюминиевый каркас рамки, в котором при его движении в магнитном поле индуцируется ток. Взаимодействие индуцированного тока с магнитным полем постоянного магнита порождает тормозной момент, успокаивающий подвижную часть.

*Достоинства приборов:*

- высокая чувствительность;
- равномерная шкала;
- высокая точность измерений;
- малое собственное потребление энергии;
- незначительное влияние внешних магнитных полей благодаря наличию сильного собственного магнитного поля.

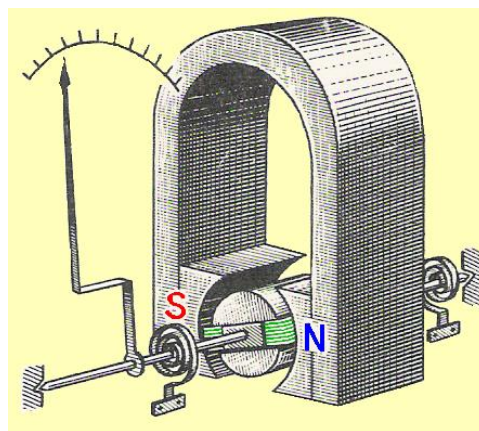
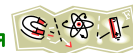


Рисунок 96 – Устройство прибора магнитоэлектрической системы





*Недостатки приборов:*

- сложность и дороговизну конструкции;
- низкая перегрузочная способность ввиду того, что при перегреве током теряют свои упругие свойства противодействующие пружинки, а при большой силе тока они перегорают;
- возможность применения для измерений только в цепях постоянного тока (при отсутствии дополнительных преобразователей);
- возможность измерения тока более 30 мА и напряжения более 45 мВ только со специальными устройствами

Принцип работы приборов **электромагнитной системы** основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого катушкой 1 со стальным сердечником 2, помещенным в поле этой катушки. **Электромагнитный** измерительный механизм выполняют с плоской (рисунок 97, а) или круглой (рисунок 97, б) катушкой.

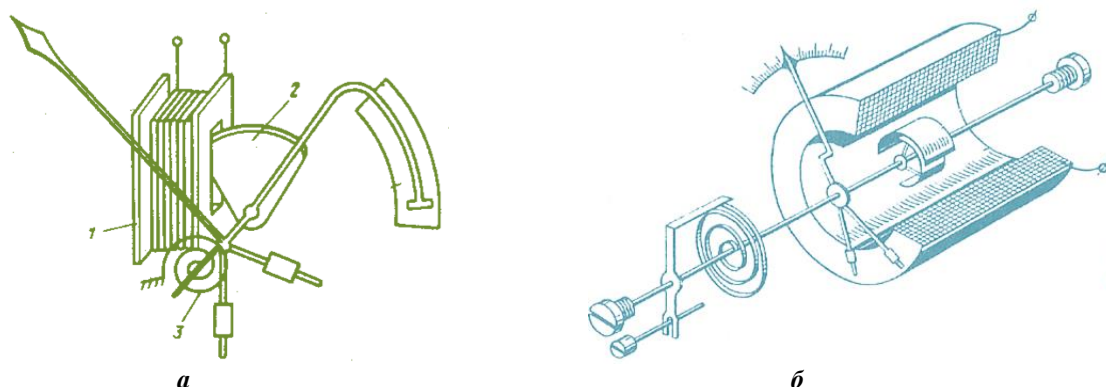


Рисунок 97 – Конструкция приборов электромагнитной системы

В приборах с плоской катушкой сердечник установлен на оси, несущей стрелку. При прохождении тока по катушке 1 сердечник 2 будет намагничиваться и втягиваться в катушку, поворачивая ось и стрелку. Повороту оси препятствует спиральная пружина 3. Когда усилие, создаваемое пружиной, уравнивает усилие, созданное катушкой, подвижная система прибора остановится и стрелка зафиксирует на шкале определенный ток.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть прибора, пропорционален силе притяжения  $F$  электромагнита, под действием которой сердечник втягивается в катушку.

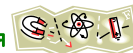
В приборах с электромагнитным измерительным механизмом угол поворота  $\alpha$  подвижной части и стрелки пропорционален квадрату тока, проходящего по катушке. Поэтому такой прибор имеет неравномерную (квадратичную) шкалу. Для сглаживания этой неравномерности сердечнику придается особая лепестко-образная форма, вследствие чего форма магнитного поля и усилие, создаваемое катушкой, изменяются по мере втягивания сердечника.

*Достоинства приборов:*

- применяются в качестве амперметров и вольтметров;
- работают в цепях постоянного и переменного тока;
- устойчивость к перегрузкам;
- простота конструкции.

*Недостатки приборов:*

- низкая чувствительность
- неравномерная шкала
- невысокая точность измерений
- зависимость показаний от внешних магнитных полей



**Электродинамический измерительный механизм** состоит из двух катушек 1 и 2 (рисунок 98).

Катушка 1 конструктивно разделена на две части, она подключается в измерительную цепь последовательно и называется токовой. Внутри неподвижной катушки на оси расположена подвижная катушка, называемая катушкой напряжения. При прохождении тока по катушкам вокруг них образуются два магнитных поля. Взаимодействие магнитных полей приводит к образованию электромагнитных сил, поворачивающих катушку напряжения на определенный угол.

В зависимости от подключения катушек приборы этой системы могут работать в качестве амперметра, вольтметра, ваттметра.

*Достоинства приборов:*

- возможность измерения в цепях постоянного и переменного тока;
- высокая точность измерения;
- равномерность шкалы у ваттметров;
- возможность приближения шкалы к равномерной у амперметров и вольтметров.

*Недостатки приборов:*

- низкая чувствительность;
- влияние внешних магнитных полей на показания;
- большая потребляемая мощность.

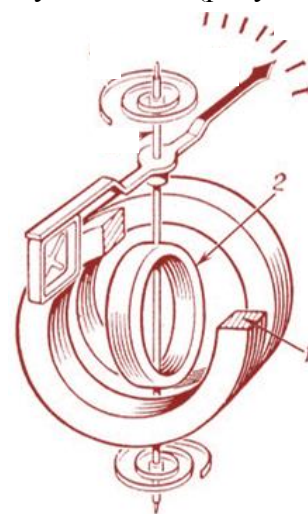
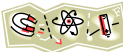


Рисунок 98 – Конструкция приборов электродинамической системы

### **Вопросы для самопроверки**



- 1 Перечислить недостатки приборов электромагнитной системы.
- 2 Пояснить принцип действия приборов магнитоэлектрической системы.
- 3 Указать на самую точную систему приборов.
- 4 Назвать систему приборов, конструкция которых может быть с плоской и круглой катушкой.



## Тема 1.7 Трансформаторы

### Устройство и работа трансформатора

#### План лекции

Взаимоиндукция

Принципиальное устройство трансформатора

Принцип действия трансформатора

Основные параметры трансформатора

Типы трансформаторов

Вокруг катушки с переменным током возникает переменное магнитное поле. Если в магнитное поле катушки попадает проводник без тока, то поле катушки пересекает проводник и наводит в нем переменную ЭДС (рисунок 99). Явление возникновения ЭДС в одном проводнике под действием магнитного поля другого проводника, называется **взаимоиндукцией**.

Явление взаимоиндукции широко используют в трансформаторах, радиотехнических устройствах и устройствах автоматики. Однако в некоторых случаях возникновение взаимоиндукции является нежелательным. Например, ЭДС взаимоиндукции, наводимая в линиях связи (телефонных и телеграфных проводах), проложенных вдоль высоковольтных линий электропередач или вдоль контактной сети электрифицированных железных дорог

переменного тока, создают помехи при передаче телефонных или телеграфных сигналов. Поэтому линии связи стремятся располагать перпендикулярно проводам линий электропередачи или выполнять их в виде кабельных линий, защищенных металлическими экранами.

**Трансформатором** называют статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Работа трансформатора основана на явлении взаимоиндукции. Простейший трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и двух расположенных на нем обмоток (рисунок 100).

Одна обмотка подсоединяется к источнику переменного тока и называется **первичной**. К другой обмотке, называемой **вторичной**, подключают потребители.

При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике образуется переменный магнитный поток. Этот поток пересекает витки вторичной обмотки и наводит в них переменную ЭДС взаимоиндукции. Если вторичная обмотка замкнута на потребитель, то по цепи потребителя начинает проходить переменный ток.

Трансформаторы бывают повышающие и понижающие.

Если во вторичной обмотке число витков больше чем в первичной, то напряжение вторичной обмотки превышает напряжение первичной обмотки и трансформатор будет повышающий. Если в первичной обмотке число витков больше чем во вторичной, то напряжение вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки и трансформатор будет понижающий.



Рисунок 99

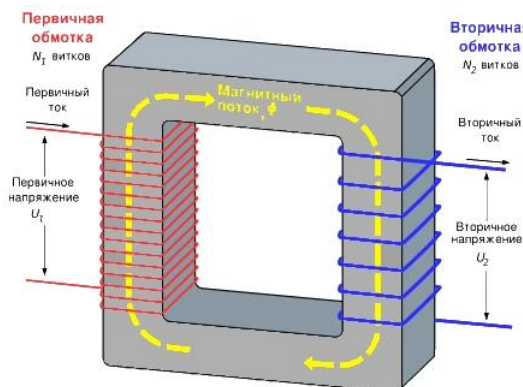
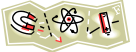


Рисунок 100 - Принципиальное устройство трансформатора





Основные параметры трансформатора:

1 Номинальная мощность  $S_H$  – это полная мощность, которую трансформатор может непрерывно отдавать в течение своего срока службы при номинальном напряжении и номинальных температурных условиях

$$S_H = U_{2H} \cdot I_{2H}, \text{ ВА} \quad (114)$$

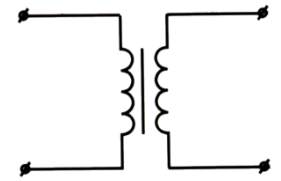


Рисунок 101—Изображение трансформатора на схемах

2 Номинальное первичное напряжение  $U_{1H}$  – напряжение, на которое рассчитана первичная обмотка

3 Номинальное вторичное напряжение  $U_{2H}$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора при номинальном первичном напряжении.

4 Коэффициент трансформации

$$K = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{I_{2H}}{I_{1H}} \quad (115)$$

где  $\omega$ - число витков первичной и вторичной обмоток;

$E$  – действующее значение ЭДС электромагнитной индукции в обмотках трансформатора.

5 Номинальный первичный  $I_{1H}$  и вторичный  $I_{2H}$  токи в обмотках трансформатора при номинальной мощности и номинальных напряжениях обмоток

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H} \cdot \eta_H}, \text{ А} \quad (116)$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}}, \text{ А} \quad (117)$$

6 Коэффициент нагрузки трансформатора. Трансформатор чаще всего работает с нагрузкой, меньше номинальной, поэтому

$$K_{НГ} = \frac{S_2}{S_H} \quad (118)$$

где  $S_2$ - фактическая полная мощность нагрузки,

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}, \text{ ВА} \quad (119)$$

7 Токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке  $S_2$

$$I_1 = I_{1H} \cdot K_{НГ}, \text{ А} \quad (120)$$

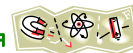
$$I_2 = I_{2H} \cdot K_{НГ}, \text{ А} \quad (121)$$

### Вопросы для самопроверки



- 1 Почему трансформатор не работает в цепи постоянного тока?
- 2 Пояснить принцип работы трансформатора.
- 3 Записать формулу для определения коэффициента трансформации.
- 4 Назвать основные части трансформатора.
- 5 Пояснить условие, при котором трансформатор является понижающим.





## Тема 1.8 Электрические машины переменного тока

### Асинхронный двигатель

#### План лекции

Устройство асинхронного двигателя

Принцип работы асинхронного двигателя

Способы пуска асинхронного двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора 1 и подвижного ротора 2 (рисунок 102). Три обмотки 3 размещены в пазах на внутренней стороне сердечника статора асинхронного двигателя. Обмотка же ротора асинхронного двигателя не имеет электрического соединения с сетью и с обмоткой статора. Начало и концы фаз обмоток статора присоединяют к зажимам в коробке выводов по схеме звезда или треугольник.

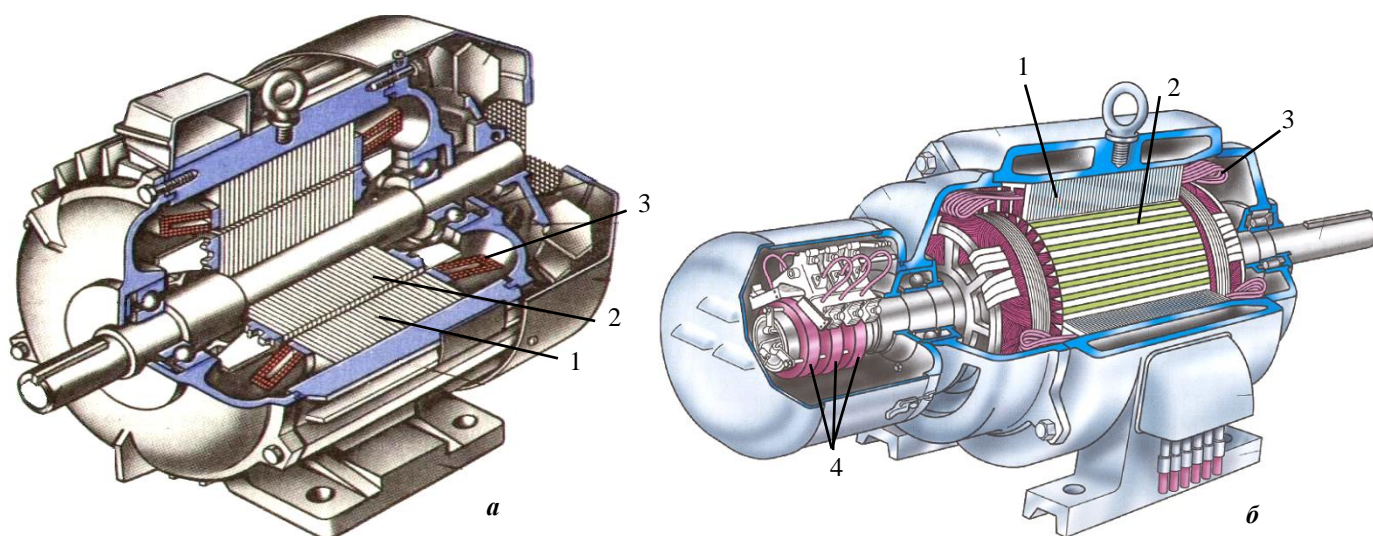


Рисунок 102 – Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (а), с фазным ротором (б).

Асинхронные двигатели в основном различаются устройством ротора, который бывает двух типов: фазный или короткозамкнутый. Обмотка короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя выполняется на цилиндре из медных стержней и называется «беличьей клеткой» (рисунок 103). Торцевые концы стержней замыкают металлическими кольцами. Пакет ротора набирают из электротехнической стали. В двигателях меньшей мощности стержни заливают алюминием. Фазный ротор и статор имеют трехфазную обмотку. Фазы обмотки соединяют звездой или треугольником и ее свободные концы выводят на изолированные контактные кольца 4 (рисунок 102, б).

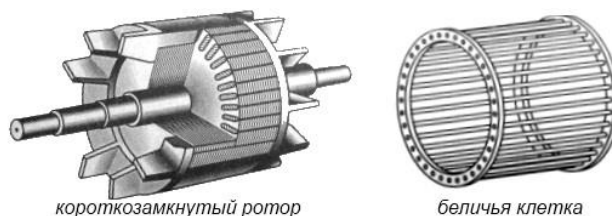
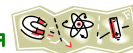


Рисунок 103 – Короткозамкнутый ротор

Обмотка статора (фазы) асинхронного двигателя в виде трех катушек уложена в пазы расположенные под углом в 120 градусов. Начала и концы фаз обозначаются соответственно буквами А, В, С и X, Y, Z. При подаче на фазы трехфазного напряжения в них будут проходить



токи  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , которые внутри машины наведут собственное вращающееся магнитное поле. Если вращающееся магнитное поле пересекает короткозамкнутую обмотку, то в ней возникает ЭДС и проходит ток. Ток ротора создает вокруг него магнитное поле. Взаимодействие магнитного поля ротора с вращающимся магнитным полем статора приводит к образованию большого числа пар электромагнитных сил, которые стремятся повернуть ротор в направлении движения электромагнитного поля статора. Ротор приходит во вращение приобретает определенную скорость, магнитное поле и ротор вращаются с разными скоростями или асинхронно. Применительно к асинхронным двигателям, скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения магнитного поля статора.

### ***Пуск асинхронных двигателей***

При пуске двигателя в ход должны удовлетворяться следующие основные требования:

- процесс пуска должен быть простым и осуществляться без сложных пусковых устройств,
- пусковой момент должен быть достаточно большим, а пусковые токи — по возможности малыми.

Иногда к этим требованиям добавляются и другие, обусловленные особенностями конкретных приводов, в которых используются двигатели: необходимость плавного пуска, наибольшего пускового момента и пр. Практически используются следующие способы пуска: непосредственное подключение обмотки статора к сети (прямой пуск); понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске; подключение к обмотке ротора пускового реостата.

***Прямой пуск*** применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к питающей сети, возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышений температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины. Однако при прямом пуске двигателей большой мощности, особенно при подключении их к недостаточно мощным электрическим сетям, могут возникать чрезмерно большие падения напряжения (свыше 10—15%). В этом случае прямой пуск для двигателей с короткозамкнутым ротором не применяют и пускают их при пониженном напряжении. Прямой пуск асинхронного двигателя широко применяют в технике. Недостатками его являются большой пусковой ток и сравнительно небольшой пусковой момент.

***Пуск при пониженном напряжении*** применяется для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения осуществляется следующими способами:

- переключением обмотки статора при пуске с рабочей схемы «треугольник» на пусковую схему «звезда». В этом случае фазное напряжение, подаваемое на обмотку статора, уменьшается в  $\sqrt{3}$  раз, что обуславливает уменьшение фазных токов в  $\sqrt{3}$  раз и линейных токов в 3 раза. По окончании процесса пуска и разгона двигателя до номинальной частоты вращения обмотку статора переключают обратно на схему «треугольник»;

- включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных резисторов или реакторов. При этом на указанных аппаратах создаются некоторые падения напряжения  $\Delta U$ , пропорциональные пусковому току, вследствие чего к обмотке статора будет приложено пониженное напряжение  $U_1 = U - \Delta U$ . По мере увеличения частоты вращения ротора двигателя уменьшается ЭДС, индуцированная в обмотке ротора, а следовательно, и пусковой ток. В результате этого уменьшается падение напряжения  $\Delta U$  и автоматически возрастает приложенное к двигателю напряжение;





- подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор.

Последний может иметь несколько ступеней, которые в процессе пуска двигателя переключаются соответствующей аппаратурой.

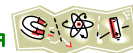
Недостатком всех указанных способов является значительное уменьшение пускового и наибольшего моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения. Поэтому они могут применяться только при пуске двигателя без нагрузки.

### **Вопросы для самопроверки**



- 1 Перечислить типы асинхронных двигателей.
- 2 Пояснить принцип работы асинхронного двигателя.
- 3 Объяснить почему двигатель переменного тока называется «асинхронным».
- 4 Назвать основные части асинхронного двигателя.
- 5 Перечислить и дать характеристику способам пуска асинхронных двигателей.





## Тема 1.9 Электрические машины постоянного тока

### Генераторы и двигатели постоянного тока

#### План лекции

Устройство электрической машины постоянного тока

Принцип работы электрического генератора

Принцип работы электрического двигателя

Несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока, электрические машины постоянного тока в настоящее время широко применяются в качестве двигателей и, в меньшей степени, в качестве генераторов. Это объясняется важным преимуществом двигателей постоянного тока перед другими электродвигателями. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать жесткие и мягкие механические характеристики. А именно:

- они допускают плавное регулирование частоты вращения ротора простыми способами;
- двигатели постоянного тока обладают большими пусковыми моментами при относительно малых пусковых токах.

Принципиальная возможность создания электродвигателя постоянного тока была впервые показана М. Фарадеем в 1821 г.; в созданном им приборе проводник, по которому пропускали постоянный ток, вращался вокруг магнита.

Двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением был создан в России академиком Б. С. Якоби в 1834 г., который назвал его магнитной машиной. В 1838 г. им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера. Принцип обратимости электрических машин был также впервые сформулирован русским физиком академиком Э. Х. Ленцем.

Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. Неподвижная часть машины, называемая **статором** (рисунок 104), состоит из массивного стального корпуса, к которому прикреплены полюсные наконечники **1** с обмоткой возбуждения **2**. Ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает основное магнитное поле машины.

**Якорь** — подвижная часть электрической машины. Представляет собой сердечник из отдельных листов электротехнической стали, напрессованный на вал **3**. В сердечнике нарезаны пазы, в которые уложена обмотка якоря. Концы обмотки выведены в коллектор **4**. С внешней цепью обмотка якоря соединяется с помощью коллектора и электрографитовых щеток **5**.

Недостатком машин постоянного тока является наличие щеточноколлекторного аппарата, который требует тщательного ухода в эксплуатации и снижает надежность работы машины. Поэтому в последнее время генераторы постоянного тока в стационарных установках вытесняются полупроводниковыми преобразователями, а на транспорте — синхронными генераторами, работающими совместно с полупроводниковыми выпрямителями.

Работа **электрического генератора** постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции.

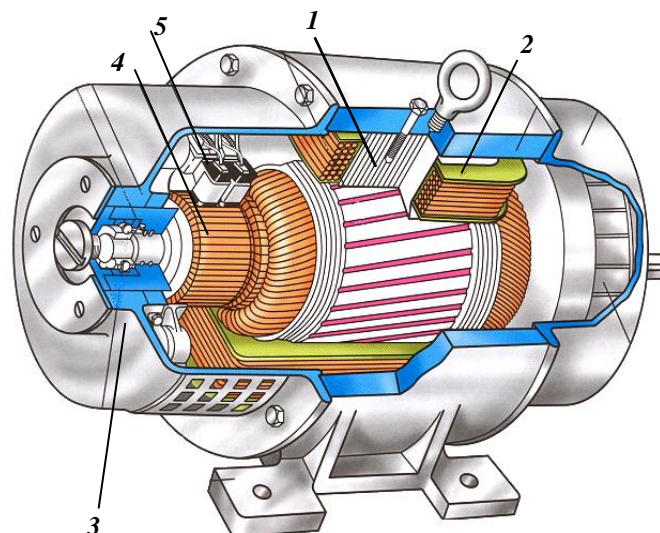
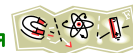


Рисунок 104—Электрическая машина постоянного тока



Простейшим генератором является рамка (виток), вращающаяся в магнитном поле (рисунок 105).

В электрических генераторах применяют не один виток, а несколько десятков. Эти витки, соединенные соответствующим образом, образуют обмотку якоря генератора. При вращении обмотки якоря в магнитном поле генератора в каждом витке обмотки наводится ЭДС. Если к генератору подключен потребитель, то по цепи генератор-потребитель пойдет ток.

Для вращения обмотки якоря необходим первичный двигатель—дизель, турбина, колесная пара и т.д. Для создания магнитного поля в генераторе на обмотку возбуждения подается ток от первичного источника, например аккумулятора.

Принцип работы **электрического двигателя** основан на возникновении электромагнитной силы, действующей на рамку с током в магнитном поле (рисунок 106).

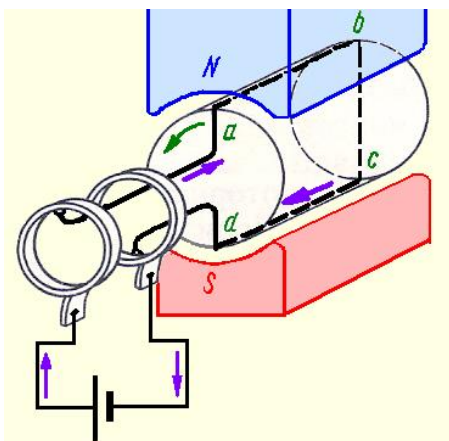


Рисунок 106 — Возникновение вращающего момента

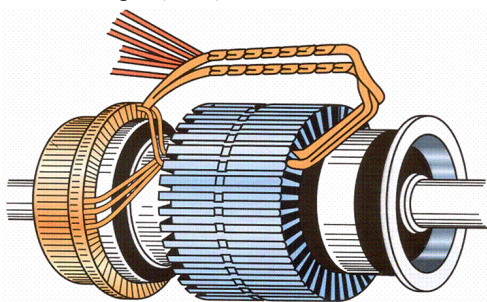


Рисунок 107 — Якорь электрической машины постоянного тока

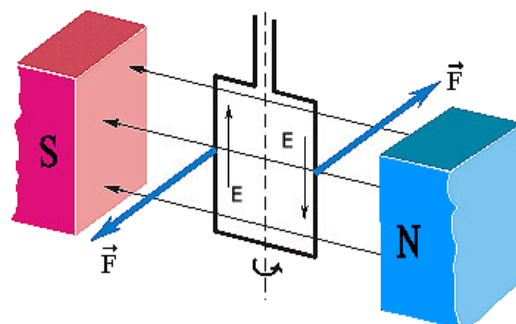


Рисунок 105—Вращающаяся рамка в магнитном поле

Если поместить в магнитное поле не прямолинейный проводник, а виток (или катушку) с током и расположить его вертикально, то используя правило левой руки можно определить направление электромагнитной силы, действующей на каждую сторону витка. Под действием электромагнитной силы сторона *ab* двигается справа налево, а сторона *cd* слева направо. Возникшая пара электромагнитных сил приведет к повороту витка, т.е. образуется вращающий момент.

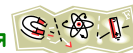
Виток будет поворачиваться в магнитном поле до тех пор, пока он не займет положение, перпендикулярное магнитным силовым линиям поля. При таком положении через виток будет проходить наибольший магнитный поток. Свойство витка и катушки с током поворачиваться в магнитном поле широко используется в электротехнике; электрические двигатели и ряд электроизмерительных приборов работают по этому принципу.

Для увеличения вращающего момента в электрических двигателях применяют не один виток, а несколько. Эти витки, соединенные соответствующим образом, образуют обмотку якоря электродвигателя (рисунок 107).

### Вопросы для самопроверки

- 1 Перечислить основные элементы конструкции электрической машины постоянного тока.
- 2 Пояснить принцип работы электрического двигателя постоянного тока.
- 3 Указать назначение обмотки возбуждения.
- 4 Назвать основной недостаток электрических машин постоянного тока.
- 5 Пояснить принцип работы электрического генератора постоянного тока.





## Тема 1.10 Передача и распределение электрической энергии

### Схема электроснабжения. Заземление и зануление

#### План лекции

*Простейшая схема электроснабжения*

*Защитное заземление и зануление*

#### *Простейшие схемы электроснабжения*

Непрерывную подачу электрической энергии всем потребителям обеспечивает огромная система, в состав которой входят электростанции, линии передачи и сложные устройства распределения электрической энергии между потребителями. При этом она должна не только обеспечивать бесперебойную подачу энергии потребителям, но и подавать энергию с напряжением стандартной частоты, выдерживать его уровень, например, 220 В в жилых зданиях.

Все элементы системы связаны общим режимом работы и непрерывностью поставки электроэнергии потребителям. Электрическая сеть представляет собой совокупность устройств для распределения электрической энергии. Она состоит из подстанций, распределительных устройств, а также линий электропередачи. Последние могут быть воздушными и кабельными.

Применяемая в России частота переменного тока 50 Гц должна строго выдерживаться, так как с ней связана частота вращения практически всех двигателей станков, электрических устройств предприятий. Уменьшение частоты только на 1 Гц снизит частоту вращения исполнительных механизмов и, например, скорость движения конвейеров на 2%, что в масштабе государства может соответственно снизить производительность труда. Напряжение на различных участках электрической сети может меняться от 6 до 1150 кВ и, доходя до потребителей, составлять: для оборудования предприятий – 380 В, для жилых и рабочих помещений – 220 В.

Электрические подстанции располагаются между источниками энергии и потребителями и предназначены для преобразования и распределения электрической энергии. Они состоят из понижающих или повышающих трансформаторов, сборных шин и коммутационных аппаратов. Сборные шины предназначены для приема электроэнергии и распределения её между потребителями.

На разных участках электроснабжения электрические сети работают на различных напряжениях. Чем меньше напряжение, тем меньше радиус действия таких сетей. Так, в сети напряжением 380 В радиус действия не должен превышать 0,5 км, напряжением 6 кВ – не более 10 км, а напряжением 35 кВ – может достигать до 35 км.

Приемники электрической энергии делятся на три категории.

Первая категория – приемники, прекращение снабжения которых может повлечь человеческие жертвы, повреждение оборудования или расстройство технологического процесса.

К потребителям первой категории относятся многие военные объекты, больницы, объекты связи, специальные объекты, в которых при перерывах в подаче электроэнергии могут произойти взрывы или возникнуть ситуации, опасные для жизни людей.

Объекты этой категории должны снабжаться электроэнергией от двух независимых источников и в ряде случаев иметь дополнительный (третий) автономный источник питания, например, дизель-генераторную установку.

Вторая категория – приемники, для которых перерывы в энергоснабжении связаны только с простым оборудованием, но не могут привести к человеческим жертвам.

Снабжение объектов второй категории допускает кратковременные перерывы в подаче электроэнергии на время подключения резервных источников.



Третья категория – все остальные потребители.

Объекты третьей категории допускают перерывы в электроснабжении на время производства ремонтных работ.

Примерный вид электрических цепей приведен на рисунке 108.

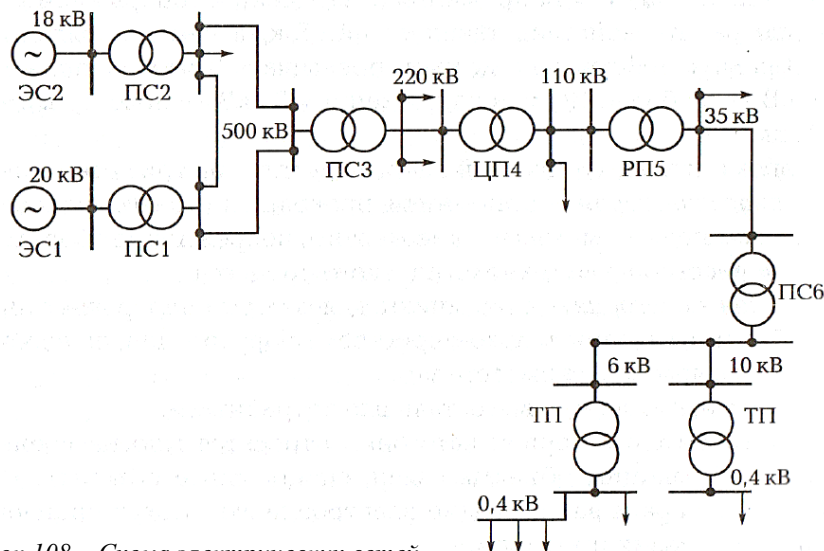


Рисунок 108 – Схема электрических сетей

Два генератора на электростанциях ЭС1 и ЭС2 генерируют электроэнергию с напряжениями 18 и 20 кВ. Эти напряжения на подстанциях ПС1 и ПС2 с помощью трансформаторов повышаются до 500 кВ и электроэнергия этого напряжения передается по воздушным линиям электропередачи к подстанции ПС3, на выходе которой формируется напряжение 220 кВ. В центре питания ЦП4 это напряжение понижается до 110 кВ и электроэнергия подается на районные подстанции РП5, где происходит понижение этого напряжения до 35, 10 и 6 кВ в зависимости от потребителей электроэнергии. Далее электроэнергия относительно низкого уровня, как правило, по кабельным линиям передачи поступает к промышленным, городским и сельским потребителям, где устанавливаются подстанции ТП, напряжения, на выходе которых составляют 380/220 В.

### Защитное заземление

**Защитное заземление** – это специальное соединение с землей корпусов электрических машин и приборов, которые могут оказаться под напряжением. Защитное заземление предусмотрено для снижения напряжения между землей и корпусом машины, попавшим под напряжение, до безопасного значения. В случае пробоя изоляции между фазой и корпусом машины прикоснувшийся к машине человек оказывается зашунтированным ничтожно малым сопротивлением защитного заземления, при этом ток, проходящий через человека, не представляет опасности. Защитное заземление состоит из заземлителя и заземляющих проводов.

Опасность прохождения через тело человека токов утечки возникает в тех случаях, когда вследствие повреждения изоляции под током оказываются металлические части и станины машин, не соединенные с токоведущими деталями.

Заземление осуществляется с помощью стальных труб, полос, уголков, которые закладываются в почву на достаточной глубине и соединяются с заземляемыми деталями стальными полосами (шинами). Такое защитное заземление показано на рисунке 109.

Если произойдет повреждение изоляции и корпус двигателя окажется соединенным с проводом сети, то человеку, прикоснувшемуся к заземленному двигателю, не угрожает опасность. Действительно, в этом случае ток утечки распределяется между параллельными ветвями  $R_4$   $R_3$  (рисунок 110).





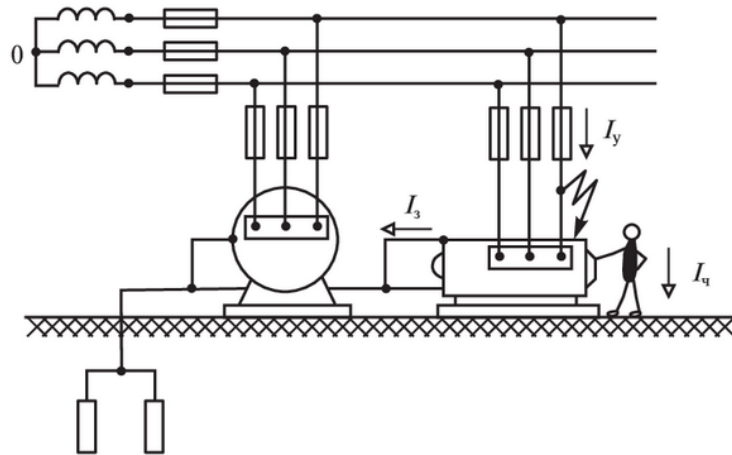
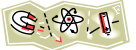


Рисунок 109 – Схема защитного заземления в трехпроводной линии

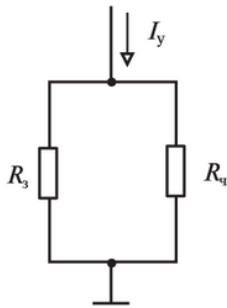


Рисунок 110 –  
Распределение тока  
утечки между телом  
человека и  
заземлителем

Так как сопротивление человека  $R_{ч}$  значительно больше, чем сопротивление заземлителя  $R_{з}$ , то почти весь ток утечки  $I_{у}$  пройдет через заземлитель. Это справедливо, если заземлитель правильно рассчитан и тщательно выполнен. При повышенном сопротивлении заземлителя опасность поражения человека токами утечки остается.

При выборе схемы заземления, прежде всего, следует оценить возможности использования в качестве заземлителей близко расположенных металлических конструкций: каркасов зданий, водопроводных труб, отопительных систем и др. в электрических сетях напряжением до 1000 В общее сопротивление заземлителей не должно превышать 4 Ом при помощи сети 100 кВт и более и 10 Ом при мощности сети менее 100 кВт.

Если естественные заземлители отсутствуют или имеют сопротивление больше указанных значений, устанавливают искусственные заземлители, в качестве которых применяют:

- вертикально погруженные в почву стальные трубы длиной 3 м, с толщиной стенок 3,5 мм и диаметром 50 мм;
- угловую сталь или стальные полосы толщиной 4 мм и площадью поперечного сечения не менее  $48 \text{ мм}^2$ , расположенные вертикально или горизонтально.

Наименьшее количество заземлителей – два. Расстояние между заземлителями не менее половины их длины, глубина погружения не менее трети длины заземлителя (рисунок 111).

Если в качестве заземлителя используется труба, то её сопротивление подсчитывается по формуле

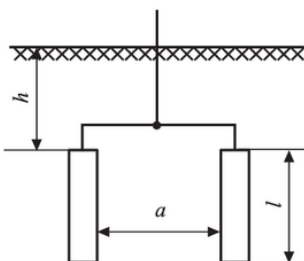


Рисунок 111 – Схема заземлителя

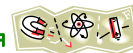
$$R_{\text{тр}} = \frac{0,9\rho}{l} \quad (122)$$

Аналогичная формула для полосы имеет вид

$$R_{\text{пол}} = \frac{2,1\rho}{l} \quad (123)$$

Здесь  $\rho$  – удельное сопротивление почвы, приходящиеся на каждый метр длины заземлителя (для суглинка  $\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , для песка  $\rho=700 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Точные данные  $\rho$  указаны в электротехнических справочниках.

Число труб или полос, используемых в качестве заземлителей, подсчитывается по формуле



$$n = \frac{R_{тр}}{\eta \cdot R_з} \quad (124)$$

где  $R_{тр}$ -сопротивление трубы(полосы);  
 $R_з$ -сопротивление заземления;  
 $\eta$ -коэффициент использования трубы (полосы).

### Защитное зануление

**Зануление** – это соединение корпусов электрических машин и приборов, которые могут оказаться под напряжением не с землей, а с заземленным нулевым проводом. Это приводит к тому, что замыкание любой из фаз на корпус прибора или машины превращается в короткое замыкание этой фазы с нулевым проводом. В результате большой ток короткого замыкания вызывает срабатывание защиты и поврежденная установка отключается. Схема зануления состоит из проводника заземления нейтрали источника тока, нулевого защитного проводника и повторного заземления нулевого защитного проводника. Различают нулевой рабочий проводник и нулевой защитный проводник.

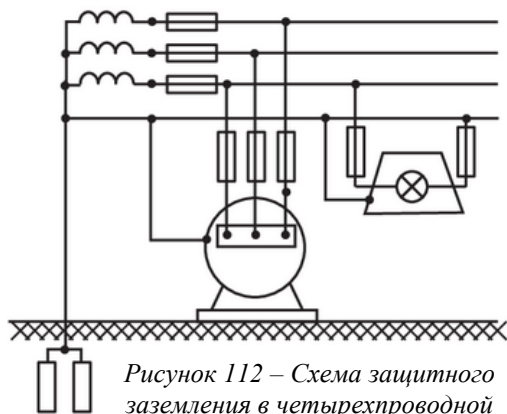


Рисунок 112 – Схема защитного заземления в четырехпроводной линии

Корпус двигателя и другие металлические части электротехнических установок, не находящиеся под напряжением, следует надежно соединить с помощью стальных полос или проводов с нулевым проводом, как показано на рисунке 112. Теперь пробой изоляции приводит к короткому замыканию фазы генератора.

Соответствующая плавкая вставка в течение долей секунды перегорает и отключает от сети поврежденный участок. Нулевой рабочий проводник является нулевым проводом для питания электроустановок и имеет равноценную с другими проводами сети изоляцию и достаточное сечение для длительного рабочего тока.

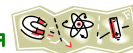
Нулевой защитный проводник служит для создания кратковременного тока короткого замыкания для срабатывания защиты и быстрого отключения поврежденной установки от питающей сети. Его сопротивление должно быть не больше половины сопротивления фазного провода. В качестве нулевого защитного провода могут быть использованы стальные трубы электропроводок, а также нулевые рабочие провода, которые не должны иметь предохранителей и выключателей. Для защиты персонала от поражения электрическим током применяют различные защитные средства: диэлектрические (резиновые) перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолированными ручками, диэлектрические (резиновые) боты и коврики и др.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Перечислить устройства, входящие в состав электрической сети.
- 2 Пояснить назначение защитного заземления.
- 3 Указать величину сопротивления заземлителя.
- 4 Назвать элементы защитного заземления.
- 5 Пояснить принципиальное отличие заземления от зануления.





## РАЗДЕЛ 2 ЭЛЕКТРОНИКА

### Тема 2.1 Полупроводниковые приборы

#### Электрофизические свойства полупроводников

##### План лекции

Виды проводимости полупроводников

Электронно-дырочный переход (p-n-переход)

Вентильное свойство p-n-перехода

Полупроводники обязаны своим названием тому обстоятельству, что по величине электропроводности они занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Однако характерным для них является величина проводимости, а то, что их проводимость растет с повышением температуры, в области низких температур число свободных электронов снижается и полупроводник приближается к диэлектрику.

##### **Виды проводимостей полупроводников**

К полупроводникам относятся кремний, германий, индий, селен и т.д., а также бинарные и тройные химические соединения (арсенид галлия).

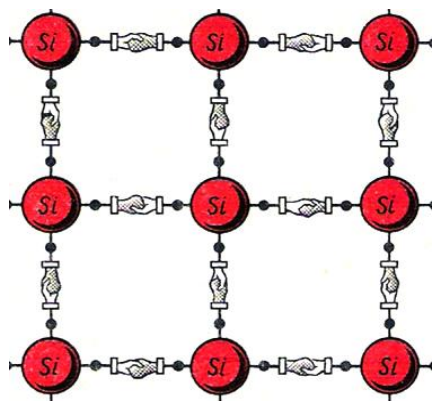


Рисунок 113 - Кристаллическая решетка кремния

Для изготовления полупроводниковых приборов используют главным образом германий и кремний.

В кристаллах германия и кремния на внешней оболочке четыре валентных электрона, связь между двумя соседними атомами осуществляется двумя валентными электронами (рисунок 113). В элементарной ячейки кристалла в каждой паре атомов кремния или германия два электрона становятся общими, т.е. их орбиты охватывают ядра обоих атомов. Подобная связь носит название двойной электронной, или **ковалентной**. При такой структуре кристаллическая решетка прочна, в ней нет свободных электронов, кристалл обладает свойствами диэлектрика. Но прочность решетки нарушается нагреванием, освещением. При нарушении прочности один или несколько электронов окажутся выбитыми из своих связей и начнут беспорядочно перемещаться.

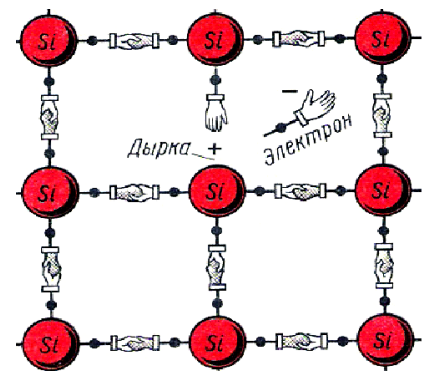
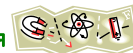


Рисунок 114 - Образование дырки

В том месте кристаллической решетки, откуда ушел электрон, образуется пустое место, получившее название **дырки**. При образовании дырки в атоме создается избыток положительного электричества, поэтому дырка может быть представлена как положительный заряд.

На освободившееся место может претендовать любой электрон из соседних связей и заполнить дырку. Процесс заполнения электронами дырок называется **рекомбинацией**.

Освобожденные электроны, двигаясь хаотично имеют тенденцию перемещаться в направлении меньшей их концентрации, т.е. стремятся распределиться равномерно по всему объему кристалла. Такое самопроизвольное выравнивание концентрации носителей зарядов называется **диффузией**.



При наличии электрического поля хаотическое перемещение носителей зарядов в полупроводниках прекращается. Электроны перемещаются в направлении '+', создавая электрический ток. Ближайший к '+' полюсу электрон, вырвавшись из своей связи, создает дырку, которая мгновенно заполняется электроном следующего соседнего атома. Создавшаяся дырка в этом соседнем атоме занимает место электроном третьего атома и т.д. Таким образом, дырки как бы перемещаются – дрейфуют в направлении противоположном движению электронов, т.е. к минусу источника.

Рассматривая процесс перемещения дырки, следует иметь в виду, что единственными физическими носителями заряда являются электроны.

Проводимость полупроводника, обусловленная движением дырок, или точнее, движением электронов валентной зоны, называется **дырочной**. Проводимость, обусловленная движением свободных электронов зоны проводимости, называется **электронной**. Электронная проводимость обозначается буквой *n*, а дырочная проводимость – буквой *p*.

### **Собственная проводимость**

В химически чистых полупроводниках при разрыве электронных связей в одно и то же время возникают электрон и дырка, поэтому число образовавшихся дырок будет равно числу свободных электронов. Одновременно с образованием пар 'электрон – дырка' происходит и их рекомбинация. В результате этого при данной температуре число электронов и дырок остается неизменным. Такая проводимость, при которой нет избыточных положительных или отрицательных зарядов, называется **собственной проводимостью**. Собственная проводимость полупроводников сравнительно невелика и при  $t^{\circ}=0^{\circ}\text{K}$  равна нулю, но с ростом  $t^{\circ}$  она резко увеличивается. Процесс появления в полупроводниках свободных электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне при нагреве полупроводника называется **термогенерацией**.

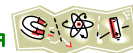
### **Примесная проводимость**

В кристалле полупроводника можно создать искусственным путем такие условия, при которых число электронов не будет равно числу дырок и электропроводность его будет вызываться движением электрических зарядов одного знака: либо электронов, либо дырок. При этом проводимость полупроводника резко вырастает. Получение избыточного числа положительных или отрицательных носителей электричества обеспечивают введением в него примесей. В качестве легирующих элементов используют пятивалентные или трехвалентные вещества.

Пятивалентные вещества применяют для создания электронной проводимости, а трехвалентные – для получения дырочной проводимости. Если в четырехвалентный кремний (*Si*) или германий (*Ge*) ввести в качестве легирующего элемента пятивалентную сурьму (*Sb*), то четыре её электрона образуют обычную ковалентную связь с соседними атомами кремния или германия, а пятый электрон будет иметь слабую связь с атомом и легко может оторваться от него. Такая примесь называется **донорной**. Под действием тепловой энергии или внешнего электрического поля пятые электроны легко переходят в зону проводимости и создают электронную проводимость полупроводника.

Если в качестве легирующего элемента взять трехвалентный алюминий (*Al*), то для ковалентных связей с соседними атомами он предоставит только три электрона. Такая примесь называется **акцепторной**. Незаполненное четвертое место будет являться дыркой. Это место может быть заполнено за счет захвата электрона из валентной зоны другого атома, но это также сопровождается образованием дырки. Значит, появление в кремнии или германии трехвалентной примеси приводит к преобладанию дырочной проводимости.





### Электронно-дырочный переход

В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов. **Электронно-дырочный переход** (или *p-n*-переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

В полупроводнике *n*-типа основными носителями свободного заряда являются **электроны**; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок. В полупроводнике *p*-типа основными носителями являются **дырки**. При контакте двух полупроводников *n*- и *p*-типов начинается процесс диффузии: дырки из *p*-области переходят в *n*-область, а электроны, наоборот, из *n*-области в *p*-область. В результате в *n*-области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В *p*-области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. Таким образом, на границе полупроводников образуется запирающий слой, поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу. Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости обычно достигает толщины порядка десятков и сотен межатомных расстояний. Объемные заряды этого слоя создают между *p*- и *n*-областями запирающее напряжение  $U_z$ , приблизительно равное 0,35 В для германиевых *n-p*-переходов и 0,6 В для кремниевых.

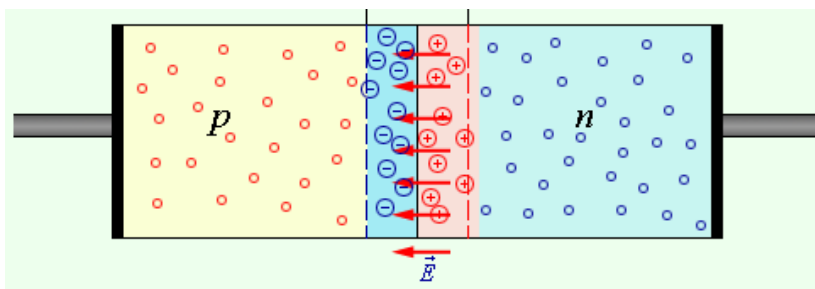


Рисунок 115 - Образование электронно-дырочного перехода

*p-n*-переход обладает свойством односторонней проводимости – **вентильным свойством**.

Если *p-n*-переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с *p*-областью, а отрицательный с *n*-областью, то напряженность электрического поля запирающего слоя будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой. Дырки из *p*-области и электроны из *n*-области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать *p-n*-переход, создавая прямой ток. Сила тока через *p-n*-переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

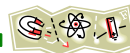
Если *p-n*-переход подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с *n*-областью, а отрицательный – с *p*-областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает. Дырки в *p*-области и электроны в *n*-области будут смещаться от *p-n*-перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое. Ток через *p-n*-переход практически не идет. Напряжение, поданное на *p-n*-переход в этом случае называют **обратным**. Весьма незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, т.е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в *p*-области и дырок в *n*-области.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Дать характеристику различным видам проводимости полупроводников.
- 2 Объяснить процесс получения *p-n*-перехода.
- 3 Как изменяется сопротивление *p-n*-перехода при включении на прямое и обратное напряжение?
- 4 Дать характеристику и указать назначение донорной и акцепторной примеси.
- 5 Пояснить вентильное свойство *p-n*-перехода.





## Устройство и работа диодов

### План лекции

Классификация диодов

Включение диода на прямое и обратное напряжение

Вольтамперная характеристика диода

**Диод** – это полупроводниковый прибор с одним  $p-n$ -переходом.

Первый в мире диод был сконструирован англичанином Д. Флемингом и представлял собой двухэлектродную лампу.

В настоящее время в «семейство» диодов входит не один десяток полупроводниковых приборов, носящих название «**диод**». Существует несколько направлений, по которым классифицируются диоды. Мы рассмотрим два направления:

в зависимости от площади  $p-n$ -перехода;

в зависимости от назначения и функций.

В зависимости от площади  $p-n$ -перехода диоды подразделяются на точечные и плоскостные.

Точечные диоды имеют стеклянный корпус с металлическими фланцами. Между фланцами располагается вольфрамовая контактная пружина. Остро отточенная пружина диаметром около 0,1 мм упирается в пластинку германия  $n$ -типа. На конце пружины нанесена примесь, например 3-х валентный индий. В процессе изготовления диода кратковременно пропускают импульс тока большой величины, и конец пружины вплавляется в пластину германия.

В результате диффузии образуется небольшой по площади  $p-n$ -переход в виде точки, отсюда и название диода – точечный. Такие диоды пропускают ток в несколько сотен миллиампер и применяются в радиотехнике.

Плоскостные диоды имеют металлический корпус, внутри которого проходит алюминиевая проволока. С помощью контакта проволока соединена с  $p-n$ -переходом, полученным, чаще всего, сплавным методом.

Плоскостные диоды имеют большую площадь  $p-n$ -перехода и поэтому рассчитаны на токи в несколько десятков ампер. Такие диоды наиболее широко используют в электронных устройствах.

В зависимости от назначения функций диоды различают: выпрямительные, импульсные, туннельные, светодиоды, стабилитроны (опорные диоды) и стабисторы и т.д.

**Выпрямительный диод** предназначен для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный.

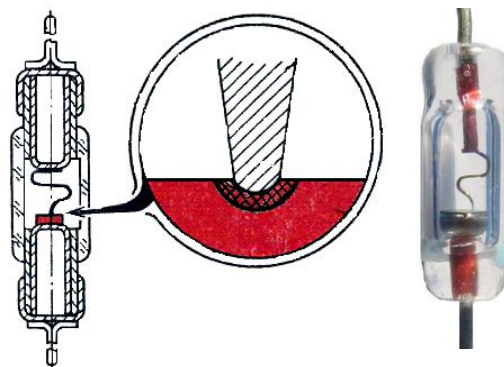


Рисунок 116 - Точечный диод

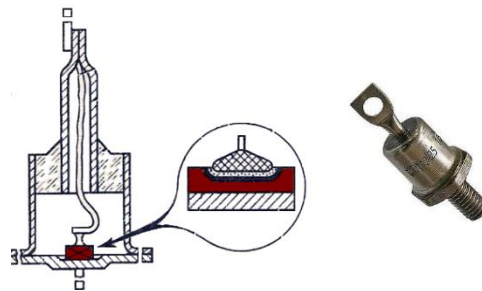
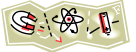


Рисунок 117 - Плоскостной диод



Рисунок 118 - Условное обозначение выпрямительного диода



Для использования диодов в силовых цепях (высоковольтных и высокоамперных) необходимо использовать плоскостные диоды с увеличенной площадью  $p$ - $n$ -перехода. Такие диоды называют **силовыми**.

Силовые диоды изготавливают двух видов: штыревой конструкции и таблеточной.

Штыревые диоды имеют металлический корпус внутри которого располагается пластинка с  $p$ - $n$ -переходом.

Пластинка с помощью сплава серебра с сурьмой припаивается к двум вольфрамовым дискам. Вольфрамовые диски уменьшают механические напряжения, возникающие между кристаллом кремния и медным основанием диода при нагревании перехода.

Выводной гибкий медный шунт крепится к верхнему вольфрамовому диску с посредством прижимной чашечки. Изоляция шунта от корпуса осуществляется с помощью свинцового стекла.

Медный шунт для защиты от коррозии покрывается хромом так же, как и нижнее медное основание.

Шунт является анодом диода, а медное основание – катодом. Наибольшая температура, при которой работают кремниевые диоды, допускается  $140^{\circ}\text{C}$ , поэтому для охлаждения  $p$ - $n$ -перехода диоды снабжены радиаторами охлаждения.

Штыревые диоды изготавливают на токи порядка 300 А. Для работы в цепях с большими токами используют силовые таблеточные диоды.

Таблеточные диоды имеют большую площадь  $p$ - $n$ -перехода и выполняются на токи в несколько тысяч ампер. Корпус диода керамический или металлостеклянный. Для охлаждения таких диодов применяют двухсторонние охладители.

В принципе работы выпрямительного диода заложено вентильное свойство  $p$ - $n$ -перехода.

При включении диода на прямое напряжение положительный потенциал источника попадает на  $p$ -область  $p$ - $n$ -перехода, а отрицательный потенциал на  $n$ -область.

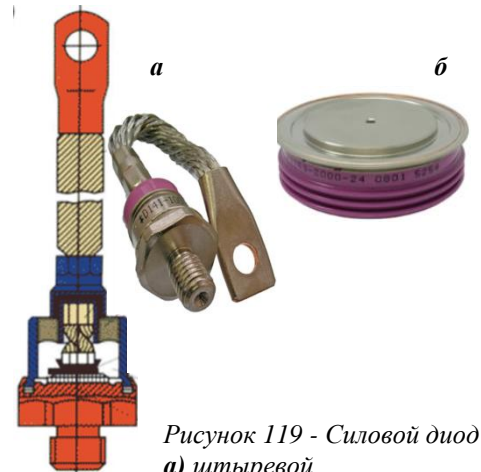


Рисунок 119 - Силовой диод  
а) штыревой  
б) таблеточный

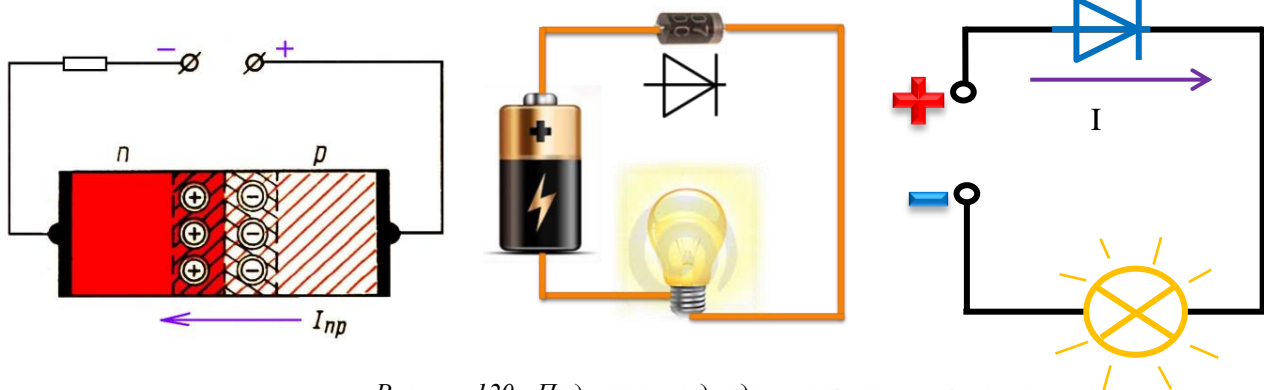
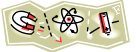


Рисунок 120 - Подключение диода на прямое напряжение

$p$ -область диода это анод,  $n$ -область – катод. Следовательно, если «плюс» источника подключен к аноду, а «минус» к катоду, то диод находится под прямым напряжением. Иначе такое включение диода называют прямым. На прямом включении диод имеет такие же свойства, как  $p$ - $n$ -переход на прямом напряжении. Сопротивление диода становится минимальным, диод открыт. Через открытый диод по цепи проходит прямой ток.

При включении диода на обратное напряжение положительный потенциал источника попадает на  $n$ -область  $p$ - $n$ -перехода, а отрицательный потенциал на  $p$ -область. На обратном включении диода на катод попадает «плюс» источника, на анод – «минус» источника. При этом



ширина  $p$ - $n$ -перехода увеличивается. Сопротивление диода возрастает, ток по цепи не проходит.

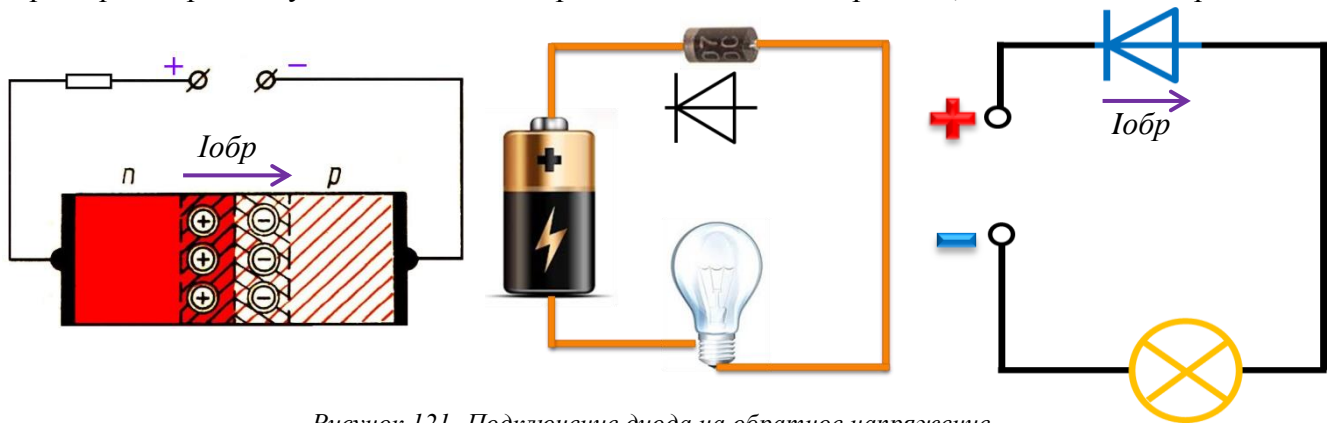


Рисунок 121- Подключение диода на обратное напряжение

На обратном включении диод заперт, в пределах  $p$ - $n$ -перехода проходит незначительный обратный ток. Этим током можно пренебречь до тех пор, пока обратное напряжение не достигнет максимального значения, при котором наступит пробой  $p$ - $n$ -перехода.

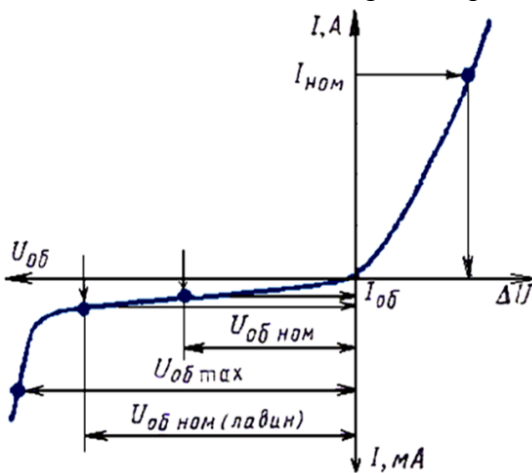


Рисунок 122 - Вольтамперная характеристика диода

Свойства диода, его параметры определяют по вольтамперной характеристике. В первом квадранте располагается прямая ветвь, которая представляет собой зависимость прямого тока от прямого напряжения.

Нередко прямое напряжение заменяется падением напряжения на самом диоде при прямом включении.

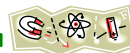
В третьем квадранте располагается обратная ветвь вольтамперной характеристики – зависимость обратного тока от обратного напряжения. При достижении обратного напряжения максимального значения происходит пробой диода.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Дать характеристику различным видам проводимости полупроводников.
- 2 Объяснить процесс получения  $p$ - $n$ -перехода.
- 3 Как изменяется сопротивление  $p$ - $n$ -перехода при включении на прямое и обратное напряжение?
- 4 Дать характеристику и указать назначение донорной и акцепторной примеси.
- 5 Пояснить вентильное свойство  $p$ - $n$ -перехода.





## Разновидности полупроводниковых приборов

### План лекции

Общие сведения о биполярном транзисторе

Общие сведения о тиристоре

**Транзистором** называется полупроводниковый прибор с несколькими р-п-переходами, имеющий 3 или более выводов, позволяющих осуществлять усиление и генерирование электрических сигналов. Транзисторы получили своё название от сокращенного **TRANS**fer res**ISTOR** (управляемое сопротивление, преобразователь сопротивления), что соответствует основному назначению транзисторов.

По конструктивному исполнению транзисторы делятся на точечные и плоскостные. Для практических целей наибольшее распространение получили плоскостные.

Наибольшее распространение получили транзисторы с двумя р-п-переходами. Двухпереходные транзисторы, в которых используется два различных типа носителей заряда (электронов и «дырок»), называются **биполярными**.

Транзисторы, которые работают с носителями заряда только одного знака (электронами или «дырками») называются **полевыми** или униполярными.

Биполярные транзисторы бывают двух типов: *p-n-p*-транзисторы и *n-p-n*-транзисторы. Например, германиевый транзистор *p-n-p*-типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т.е. из полупроводника *n*-типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т.е. области с дырочной проводимостью (рисунок 124). В транзисторе *n-p-n*-типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью *p*-типа, а созданные на ней две области – проводимостью *n*-типа (рисунок 125).

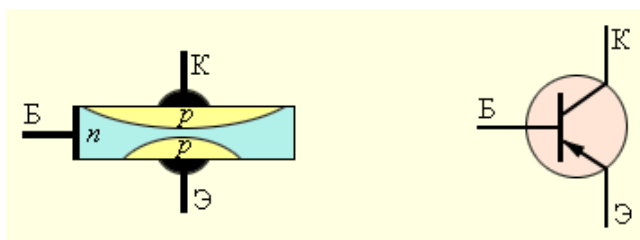


Рисунок 124

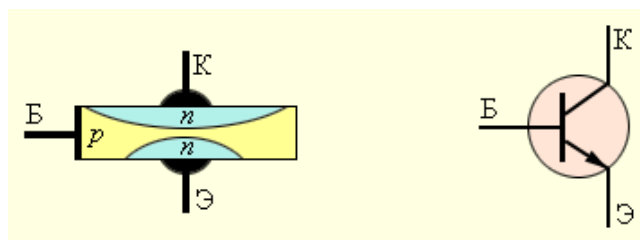


Рисунок 125

Пластинку транзистора называют **базой** (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости – **коллектором** (К), а вторую – **эмиттером** (Э). Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях на схемах стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

Оба *n-p*-перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рисунке 124 показано включение в цепь транзистора *p-n-p*-структуры. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» – в запирающем направлении (цепь коллектора).

Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда – электронов в базе и дырок в коллекторе – переход заперт. При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток  $I_3$ .

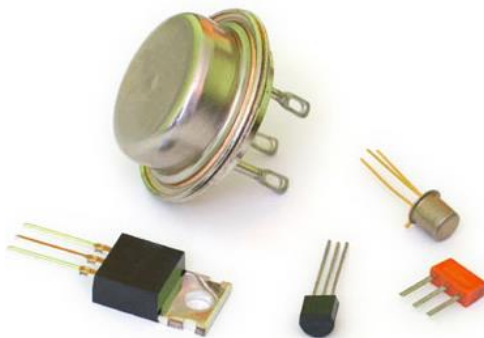
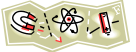


Рисунок 123 - Транзисторы



Но для дырок, попавших в базу из эмиттера,  $p-n$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток  $I_K$ . Для того, чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

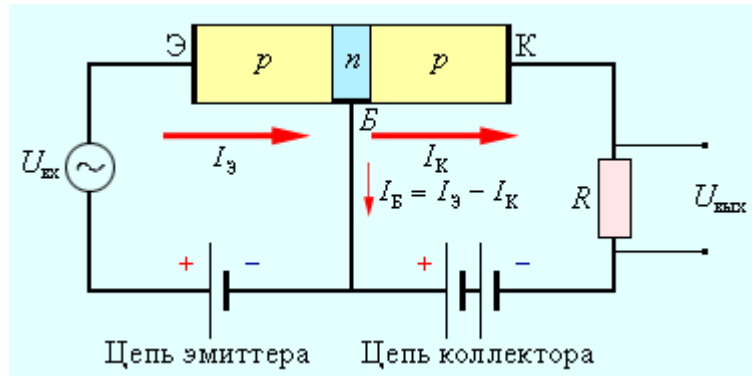


Рисунок 126 - Включение в цепь транзистора  $p-n-p$ -структуры

Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения (рисунок 126), то на резисторе  $R$ , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Следовательно, транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.



Рисунок 127

**Тиристор** – полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями, имеющий три и более  $p-n$ -перехода и один управляющий вывод. Electroдами тиристора являются анод, катод и управляющий электрод (рисунок 127).

Для работы тиристора без управляющего электрода необходимо приложить значительное прямое напряжение. Поэтому эффективной будет работа тиристора с управляющим электродом. Кратковременное включение управляющего электрода снижает напряжение включения тиристора, что дает возможность регулировать напряжение на потребителе  $R_n$  (рисунок 128).

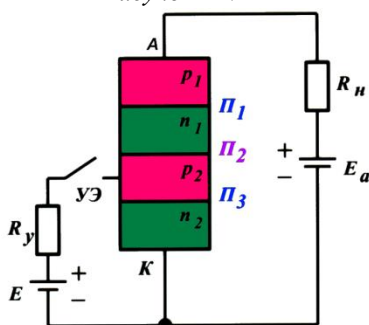


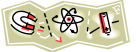
Рисунок 128 – Структура тиристора

Тиристор иначе называют управляемым диодом. Также как диод, тиристор позволяет проводить ток только в одном направлении. Тиристоры часто используют в качестве электронных ключей или выпрямительных элементов в управляемых выпрямителях.

**Вопросы для самопроверки**



- 1 Дать классификацию транзисторов.
- 2 Пояснить назначение транзисторов.
- 3 Указать название электродов транзистора и тиристора.
- 4 Дать определение и назначение тиристор.



## Тема 2.2 Выпрямители

### Однофазные выпрямители

#### План лекции

Структура выпрямителя

Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Однофазный мостовой выпрямитель

**Выпрямитель** - устройство, предназначенное для преобразования переменного тока в постоянный или пульсирующий ток одного направления.

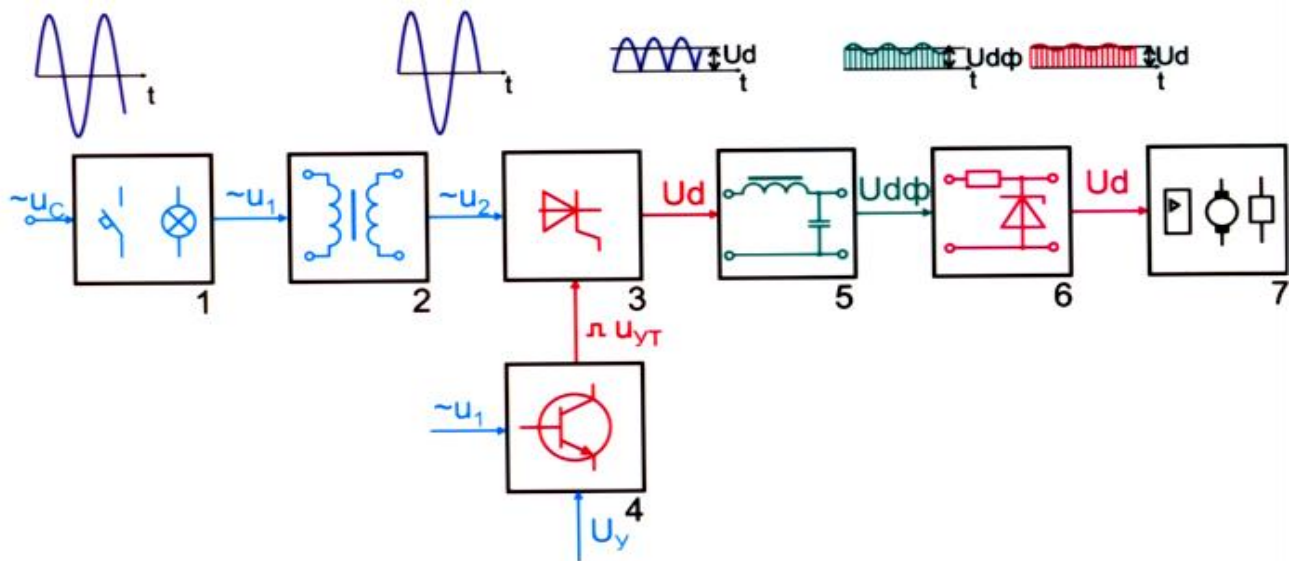


Рисунок 129 - Структура выпрямителя

В состав выпрямителя (рисунок 129) входит несколько устройств:

- 1 – блок защиты от короткого замыкания и сигнализации о перенапряжении;
- 2 – понижающий трансформатор;
- 3 – блок вентилей (если это диоды, то выпрямитель неуправляемый, если тиристоры, то выпрямитель управляемый);
- 4 – блок управления тиристорами (будет отсутствовать, если блок вентилей диодный);
- 5 – сглаживающие фильтры;
- 6 – блок стабилизации;
- 7 – потребители.

#### Однофазный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой

Упрощенная схема однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой состоит из однофазного трансформатора, у которого вторичная обмотка разделена на две равные части и двух диодов (рисунок 130).

Если по первичной обмотке проходит переменный ток, то в сердечнике образуется переменный магнитный поток. Магнитный поток пересекает вторичную обмотку и наводит в ней переменную ЭДС взаимной индукции.

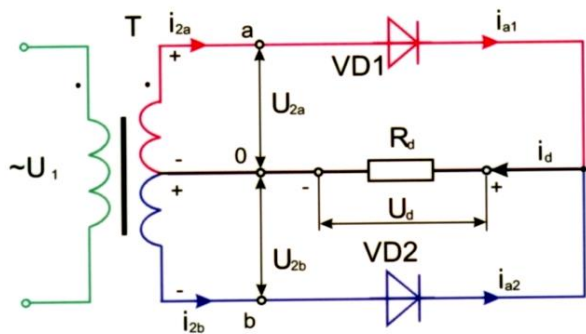
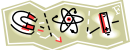


Рисунок 130 - Схема однофазного двухполупериодного выпрямителя со средней точкой

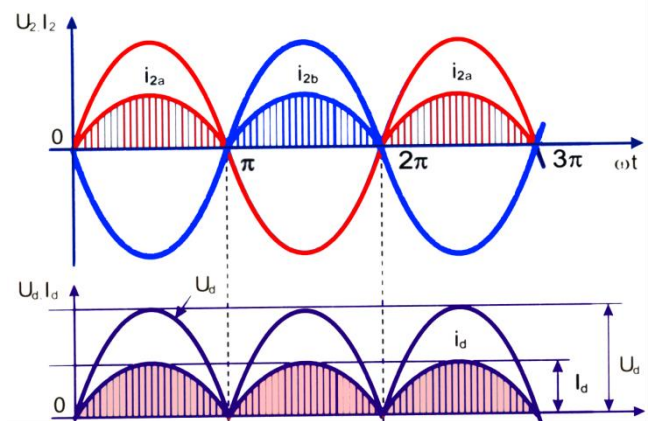


Рисунок 131

Пусть в первый момент времени полярность ЭДС такая как на рисунке 130. Всё напряжение вторичной обмотке делится средней точкой на две равные части, которые находятся в противофазе (рисунок 131).

Отрицательный потенциал попадает на катод диода VD2, диод оказывается под обратным напряжением и поэтому закрыт. Положительный потенциал попадает на анод VD1, диод оказывается под прямым напряжением и открывается. Через открытый диод VD1 на нагрузку проходит ток в среднюю точку. Так продолжается в течение одной половины периода.

Через половину периода полярность ЭДС вторичной обмотки изменяется. Диод VD1 попадает под обратное напряжение и закрывается. Под прямое напряжение попадает диод VD2 и через него на нагрузку проходит ток.

В течение всего периода ток проходит по потребителю без изменения направления. Графики выпрямленного тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  на рисунке 131.

### Однофазный мостовой выпрямитель

В схему (рисунок 132) входит диодный мост, в одну диагональ которого подключена вторичная обмотка трансформатора, а в другую подключается потребитель.

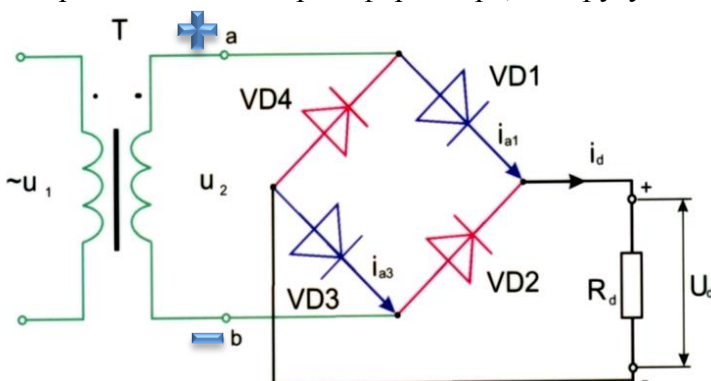


Рисунок 132

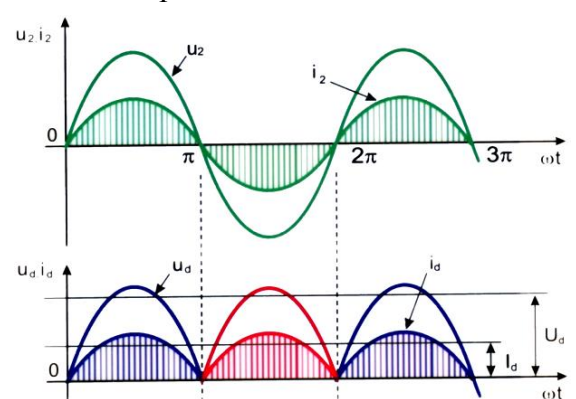
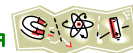


Рисунок 133

Если по первичной обмотке проходит переменный ток, то в сердечнике образуется переменный магнитный поток. Магнитный поток пересекает вторичную обмотку и наводит в ней переменную ЭДС взаимной индукции.

Пусть в первый момент времени полярность ЭДС такая как на рисунке 132. Тогда положительный потенциал попадает на анод диода VD1, этот диод оказывается под прямым



напряжением и открывается, а также на катод диода VD4, он оказывается под обратным напряжением и закрывается.

Отрицательный потенциал попадает на катод диода VD3, этот диод оказывается под прямым напряжением и открывается, а также на анод диода VD2, он оказывается под обратным напряжением и закрывается.

Образуется путь тока через открытые диоды:  $\rightarrow$ VD1  $\rightarrow$ Rd  $\rightarrow$ VD3  $\rightarrow$

Через половину периода полярность ЭДС меняется и диоды VD1 и VD3 оказываются под обратным напряжением, они закрываются. Диоды VD2 и VD4 попадают под прямое напряжение, поэтому открываются.

Образуется путь тока через открытые диоды:  $\rightarrow$ VD2  $\rightarrow$ Rd  $\rightarrow$ VD4  $\rightarrow$

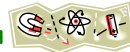
Мостовой выпрямитель является двухполупериодным, т.к. обе половины периода ток одного направления проходит по нагрузке. Графики выпрямленного тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  на рисунке 133.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Перечислить устройства, входящие в состав структурной схемы выпрямителя.
- 2 Объяснить назначение выпрямителей.
- 3 Пояснить работу однофазного выпрямителя со средней точкой.
- 4 Пояснить работу однофазного мостового выпрямителя.





## Трехфазные выпрямители

### План лекции

Трехфазный выпрямитель с нулевой точкой

Трехфазный мостовой выпрямитель

### Трехфазный выпрямитель с нулевой точкой

Упрощенная схема выпрямителя содержит трехфазный трансформатор и три диода (рисунок 134). Первичная обмотка трансформатора может быть соединена «звездой» или «треугольником», вторичная – только «звездой». Диоды анодами соединены со вторичной обмоткой трансформатора, катоды диодов соединены в одну точку, к которой подключается потребитель.

В схеме выпрямителя в любой момент открыт только один диод, на аноде которого больший положительный потенциал. Величину и полярность потенциалов определяют по кривым напряжений вторичной обмотки (рисунок 135).

В первый момент времени самый большой положительный потенциал в фазе C. Он попадает на анод диода VD3, диод попадает под прямое напряжение и открывается. Через открытый VD3 положительный потенциал попадает на катоды диодов VD1 и VD2, запирая их. Следовательно, по цепи проходит ток от фазы C, через VD1, по нагрузке к нейтральной точке.

В промежутке времени *a-b* (рисунок 135) самый большой положительный потенциал в фазе A. Этот потенциал попадает на анод диода VD1, диод открывается и через него на нагрузку проходит ток. Диоды VD2 и VD3 заперты положительным потенциалом на катодах.

Каждый диод в схеме работает третью часть периода, периодичность включения диодов определяется по кривым напряжений вторичной обмотки (рисунок 135).

Графики выпрямленного тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  на рисунке 135 до нуля не снижаются, что приводит к увеличению среднего значения выпрямленной величины, по сравнению с однофазным выпрямлением.

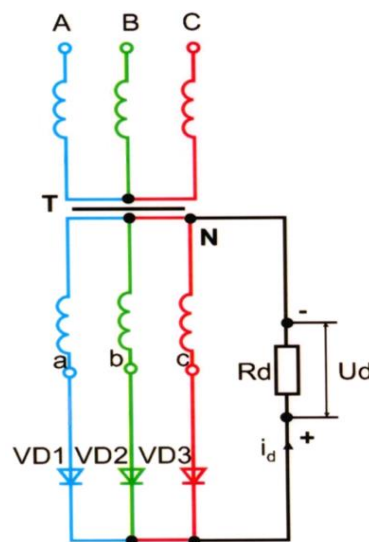


Рисунок 134

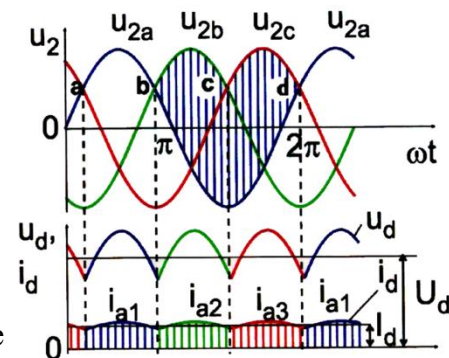


Рисунок 135

### Трехфазный мостовой выпрямитель

Упрощенная схема выпрямителя содержит трехфазный трансформатор и шесть диодов (рисунок 136). Первичная и вторичная обмотки трансформатора могут быть соединены как «звездой» так и «треугольником».

Диоды в схеме соединены в две группы: V1, V3, V5 составляют катодную группу; V4, V6, V2 составляют анодную группу. В любой момент времени в схеме будут открыты два диода – один в анодной группе, другой в катодной. В анодной группе откроется тот диод, на катоде которого появится больший отрицательный потенциал. В катодной группе откроется тот диод, на аноде

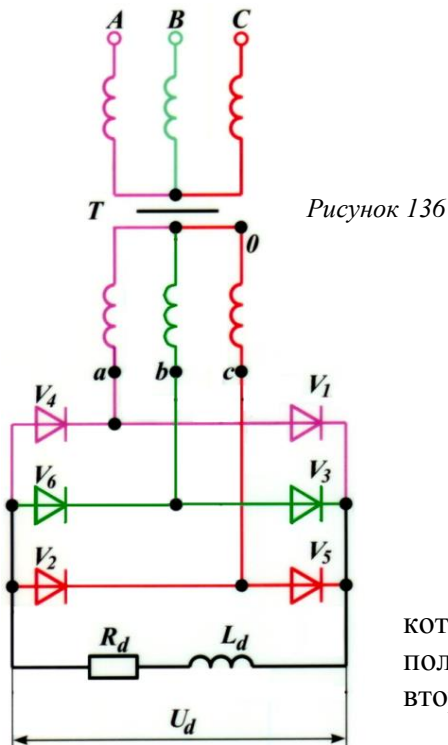
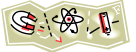


Рисунок 136

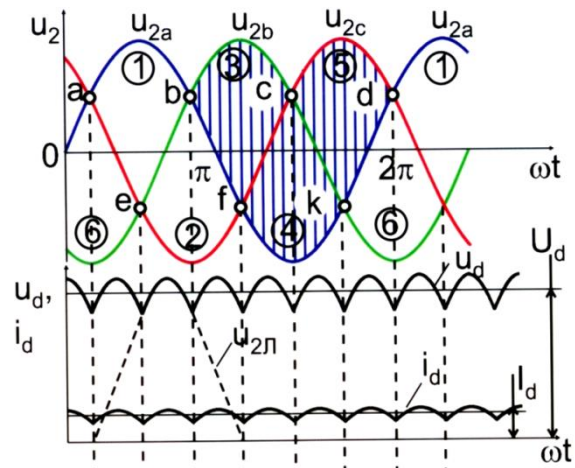


Рисунок 137

которого появится больший положительный потенциал. Величину и полярность потенциалов определяют по кривым напряжений вторичной обмотки (рисунок 137).

Например, в промежутке времени *a-e* (рисунок 137) больший положительный потенциал на фазе **A**, больший положительный в фазе **B**. Положительный потенциал попадает на анод диода **V1**, отрицательный на катод диода **V6**. Эти диода окажутся под прямым напряжением, откроются и на нагрузку пойдет ток. Путь прохождения тока:  
 $A \rightarrow V1 \rightarrow L_d, R_d \rightarrow V6 \rightarrow B$ .

Каждый диод в схеме работает третью часть периода, периодичность включения диодов определяется по кривым напряжений вторичной обмотки (рисунок 137).

Графики выпрямленного тока  $i_d$  и напряжения  $u_d$  представлены на рисунке 137.

### Вопросы для самопроверки



- 1 Пояснить работу трехфазного выпрямителя с нулевой точкой.
- 2 Пояснить работу трехфазного мостового выпрямителя.



## Тема 2.3 Основы микроэлектроники

### Классификация устройств микроэлектроники

#### План лекции

Общие сведения об интегральных микросхемах

Классификация устройств микроэлектроники

#### Общие сведения об интегральных микросхемах

Что изображено на рисунке 138? Часто можно слышать что это микросхема. Но это ошибочное мнение, поскольку это просто электрическая плата, на которой расположены элементы электрической цепи. В состав этих элементов входит, в том числе и *микросхема*.

Понятие микросхема появилось в 20 веке. Ещё в ламповый период развития электроники большое внимание уделялось уменьшению габаритных размеров, массы, потребляемой электроэнергии, повышению надежности электронных приборов. В частности, большие требования предъявлялись к созданию электронно-вычислительных машин и многих элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Создание таких устройств из *дискретных* элементов, т.е. из элементов, представляющих собою самостоятельные изделия (диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы) стало практически невозможным. Представление об этом дает следующий пример.

Если надо построить ЭВМ, состоящую из  $10^8$  элементов, и каждый дискретный элемент имеет в среднем массу 1г, объем  $1\text{ см}^3$ , потребляемую мощность 10 мВт, стоимость 50 коп. и интенсивность отказов  $10^{-5}\text{ ч}^{-1}$ , то вся ЭВМ будет иметь массу 100 т, объем  $100\text{ м}^3$ , потребляемую мощность 1000 кВт, стоимость 50 млн. руб. и совершенно непригодную интенсивность отказов  $10^3\text{ ч}^{-1}$ . Это означает что, примерно каждые три секунды будет выходить из строя один элемент. Совершенно ясно, что на дискретных элементах такую ЭВМ построить нельзя. Потребовались новые решения конструктивно-технологических, схемотехнических, физических проблем.

Эти решения привели к созданию новой отрасли электроники – микроэлектроники, которая охватывает проблемы разработки и применения новых электронных приборов – *интегральных микросхем* (ИМС).

Переход к микроэлектронике произошел постепенно. Сначала в радиоэлектронной аппаратуре на дискретных элементах стали применять вместо старого навесного (объемного) монтажа *печатные схемы*. Они представляли собой нанесенные на платы из диэлектрика соединительные провода в виде металлических пленок, к которым припаивались дискретные элементы. Объем аппаратуры при этом снижался. Далее стали конструировать радиоэлектронную аппаратуру из *модулей* и *микромодулей*. Это были смонтированные в миниатюрных корпусах устройства (усилители, генераторы, различные преобразователи и др.). Микромодули можно было быстро заменять в случае отказа. Специально для таких микромодулей были разработаны миниатюрные диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы, катушки и другие элементы. В некоторых типах микромодулей были использованы миниатюрные печатные схемы. Однако и микромодули не дали полного решения проблем.

Огромный шаг вперед в создании сложнейших типов радиоэлектронной аппаратуры позволили сделать интегральные микросхемы.

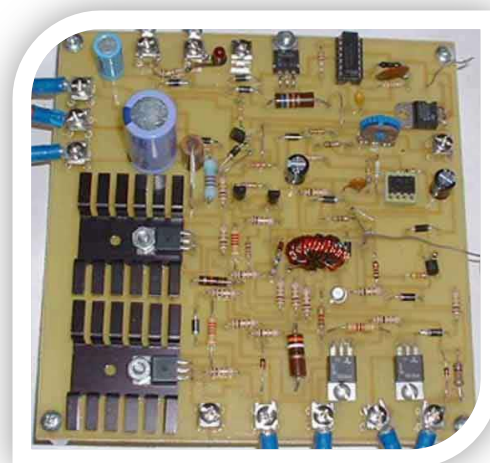
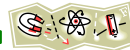


Рисунок 138





В 1958 году двое учёных, живущих в совершенно разных местах, изобрели практически идентичную модель интегральной схемы. Один из них, Джек Килби, работал на Texas Instruments, другой, Роберт Нойс, был одним из основателей небольшой компании по производству полупроводников Fairchild Semiconductor. Обоих объединил вопрос: «Как в минимум места вместить максимум компонентов?». Транзисторы, резисторы, конденсаторы и другие детали в то время размещались на платах отдельно, и учёные решили попробовать их объединить в один монолитный кристалл из полупроводникового материала. Только Килби воспользовался германием, а Нойс предпочёл кремний.

В 1959 году они отдельно друг от друга получили патенты на свои изобретения — началось противостояние двух компаний, которое закончилось мирным договором и созданием совместной лицензии на производство чипов.

После того как в 1961 году Fairchild Semiconductor Corporation пустила интегральные схемы в свободную продажу, их сразу стали использовать в производстве калькуляторов и компьютеров вместо отдельных транзисторов, что позволило значительно уменьшить размер и увеличить производительность.

Первая советская полупроводниковая микросхема была создана в 1961 г. в Таганрогском радиотехническом институте, в лаборатории Л. Н. Колесова.

Первая в СССР полупроводниковая интегральная микросхема была разработана (создана) на основе планарной технологии, разработанной в начале 1960 года в НИИ-35 (затем переименован в НИИ "Пульсар") коллективом, который в дальнейшем был переведён в НИИМЭ (Микрон). Создание первой отечественной кремниевой интегральной схемы было сконцентрировано на разработке и производстве с военной приёмкой серии интегральных кремниевых схем ТС-100 (37 элементов – эквивалент схмотехнической сложности триггера, аналога американских ИС серии SN-51 фирмы Texas Instruments). Образцы-прототипы и производственные образцы кремниевых интегральных схем для воспроизводства были получены из США. Работы проводились НИИ-35 (директор Трутко) и Фрязинским заводом (директор Колмогоров) по оборонному заказу для использования в автономном высотомере системы наведения баллистической ракеты. Разработка включала шесть типовых интегральных кремниевых планарных схем серии ТС-100 и с организацией опытного производства заняла в НИИ-35 три года (с 1962 по 1965 год). Ещё два года ушло на освоение заводского производства с военной приёмкой во Фрязино (1967 год).

ИМС становится основной элементной базой в технике связи, в космической электронике и особенно в ЭВМ.

**Интегральная микросхема** – это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов (элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, постановке и эксплуатации рассматривается как единое целое (ГОСТ 17021-88).

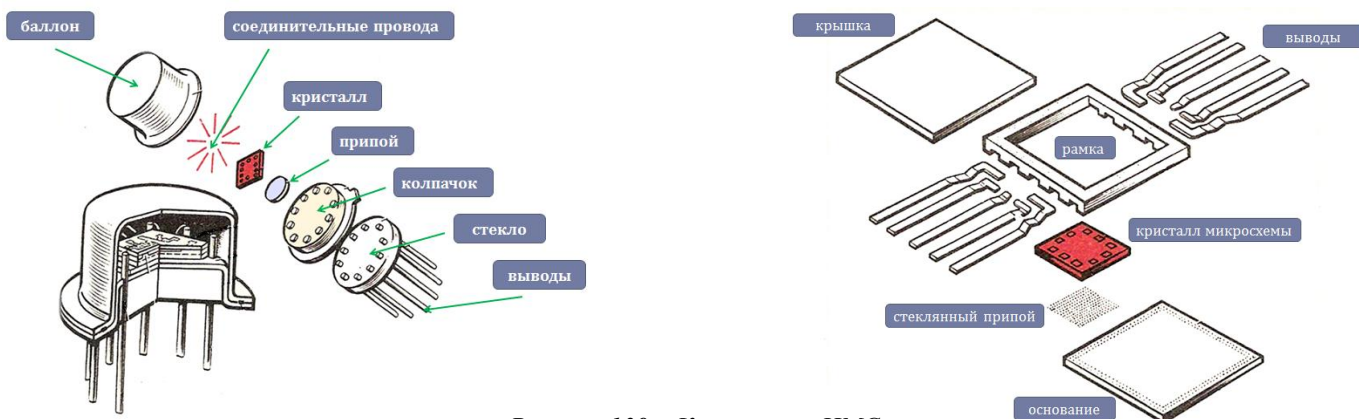
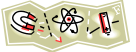
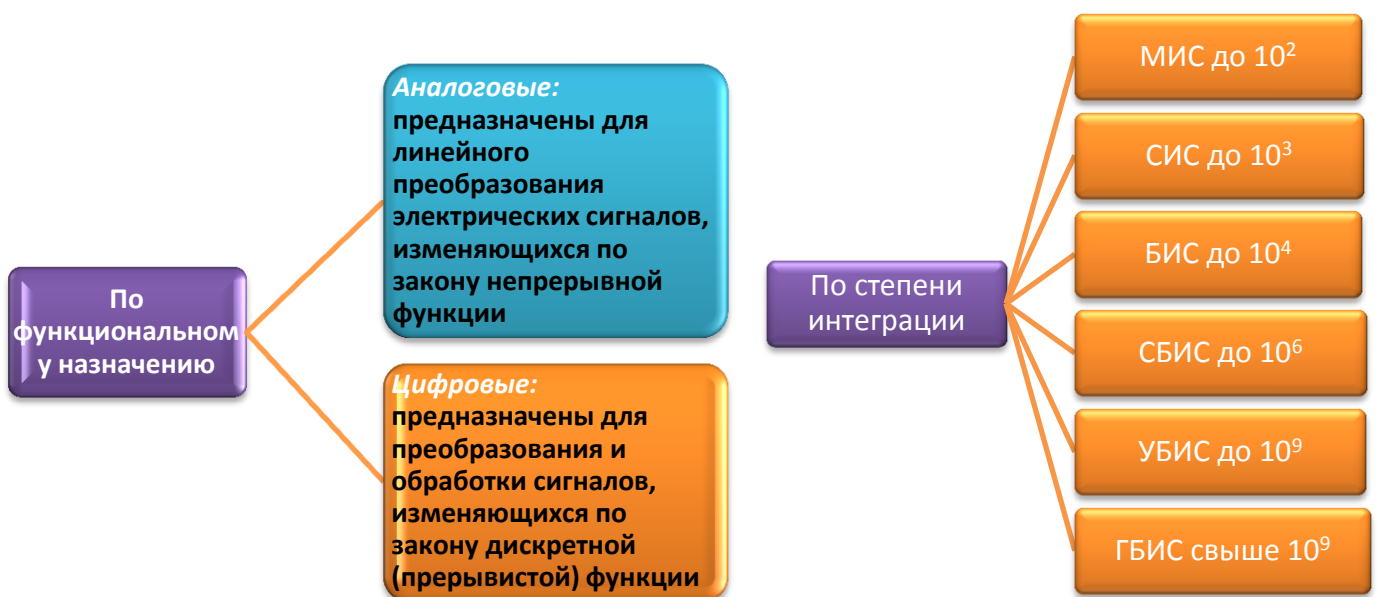


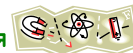
Рисунок 139 – Компоновка ИМС



ИМС обладает следующими особенностями:

- Все элементы ИМС заключены в один герметический корпус с выводами наружу;
- Элементы ИМС не являются дискретными: диоды, транзисторы, резисторы и т.д. и соединяющие их элементы составляют единое целое;
- Состоит из множества элементов и выполняет определённую функцию: усиление, генерацию, выпрямление, выполнение отдельных логических операций или нескольких функций.





## Глоссарий

**Активное сопротивление** - сопротивление, в котором электрическая энергия необратимо преобразуется в другой вид.

**Амплитудное значение** – максимальное значение переменной величины за половину периода.

**Баланс мощностей** - равенство между мощностью источника и мощностью потребителя с учетом потерь.

**Действующее значение переменного тока** - значение постоянного тока, при котором выделяется столько же тепла как при переменном, на том же сопротивлении и за то же время

**Диэлектрик** – материал, у которого нет свободных электрических зарядов.

**Заряд** - количество электричества, содержащегося в заряженном теле.

**Интегральная микросхема** – это микροэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов (элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, постановке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

**Ион** – атом, в котором преобладает какая либо энергия.

**Ионизация** - процесс превращения атомов в ионы.

**Конденсатор** - устройство, состоящее из двух и более проводников, разделенных слоем диэлектрика.

**Магнитная индукция** – силовая характеристика магнитного поля, которая определяет интенсивность поля, т.е. способность его производить работу.

**Магнитное напряжение** – напряженность магнитного поля между двумя точками.

**Магнитный поток** – интенсивность линий магнитной индукции через площадь  $S$ , ограниченную контуром.

**Мощность постоянного тока** - скорость преобразования одного вида энергии в другой.

**Напряжение** – разность потенциалов двух точек электрической цепи.

**Напряженность магнитного поля** – силовая характеристика поля, которая учитывает влияние тока и формы проводников.

**Напряжённость электрического поля** – силовая характеристика точки поля, отношение силы, действующей на заряд, к величине этого заряда.

**Начальная фаза** – угол, определяющий значение переменной величины в первый момент времени.

**Нейтральный атом** – атом, в котором величина энергии ядра и электронов одинакова.

**Период** – время, в течение которого переменная величина совершает полный цикл своего изменения.

**Переменный ток** – ток, изменяющийся по величине и направлению с течением времени.

**Полупроводник** – материал, в котором свободные электрические заряды появляются при определенных условиях (нагрев, освещение, наличие примесей и др.).

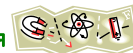
**Постоянный ток** – ток, значение и направление которого в любой момент времени остаются неизменными.

**Потенциометр** – регулируемое сопротивление, предназначенное для изменения напряжения в цепи, включается параллельно.

**Проводимость** - величина, обратная сопротивлению.

**Проводник** – материал, в котором имеются электрические заряды, способные перемещаться под действием электрического поля.

**Реактивное сопротивление** - сопротивление, обусловленное передачей энергии переменным током электрическому или магнитному полю (и обратно).



**Резистор** – устройство с неизменным сопротивлением, предназначенное для ограничения тока в цепи.

**Реостат** – регулируемое сопротивление, предназначенное для изменения тока в цепи, включается последовательно.

**Ротор** – подвижная часть электрической машины переменного тока

**Самоиндукция** – явление возникновения ЭДС в проводнике с током под действием собственного изменяющегося магнитного поля.

**Сдвиг по фазе** - разность начальных фаз двух переменных величин с одинаковой частотой.

**Статор** – неподвижная часть электрической машины

**Точечный заряд** - заряженное тело, размерами которых в условиях данной задачи можно пренебречь.

**Трехфазный ток** - ток, получаемый от источника с тремя обмотками – фазами

**Узел** – точка соединения трех и более проводников.

**Частота** – количество полных изменений переменной величины за секунду.

**Электрическая емкость** – способность проводника накапливать заряд.

**Электрическая энергия** - работа, совершаемая током по переносу заряженных частиц.

**Электрический потенциал** – энергетическая характеристика точки электрического поля, которая определяет запас энергии, работу, которую можно будет совершить.

**Электрическое сопротивление** - свойство материала проводника препятствовать прохождению через него электрического тока.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** - работа, совершаемая сторонними силами по разделению зарядов в источнике.

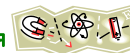
**Электромагнитная индукция** – явление возникновения ЭДС в проводнике, при движении его в магнитном поле.

**Электронная теория** - теория, объясняющая электрические свойства тел, наличием в них электронов и их движением.

**Электрический ток** - направленное движение заряженных частиц.

**Якорь** – подвижная часть электрической машины постоянного тока





## Информационное обеспечение

### Основные источники:

1 Кацман, М. М. Электрические машины [Текст]: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. – 10-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 496 с. - ISBN 978-5-7695-7743-7

2 Петленко, Б. И. Электротехника и электроника [Текст]: учебник для студентов среднего профессионального образования / Б. И. Петленко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников и др.; Под ред. Ю.М. Инькова. - 7-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательский центр «Академия», 2012.-368 с.- ISBN 978-5-7695-8358-2

### Дополнительные источники:

1 Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники [Текст]: учебник для студентов образовательных учреждений сред. проф. образования / Ф. Е. Евдокимов. – 9-е изд., стереотип. - М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с.- 20000экз. - ISBN 5-7695-1106-0

### Электронные образовательные ресурсы:

1 Электрические машины постоянного тока: компьютерная обучающая программа [Электронный ресурс]. М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2005.

2 Электротехника (постоянный ток): компьютерная обучающая программа [Электронный ресурс]. М.: ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2001.

3 Компьютерная обучающая программа по составлению электрических схем «Начало электроники» [Электронный ресурс]. Учебная Лаборатория Компьютерного Моделирования механико-математического факультета НИИ механики и математики Казахского государственного национального университета имени аль-Фараби. 2000.

### Интернет-ресурсы:

1 «Электро» – журнал. Форма доступа: [www.elektro.elektrozavod.ru](http://www.elektro.elektrozavod.ru)

2 Видеокурс «Электротехника и электроника». Форма доступа: [www.eltray.com](http://www.eltray.com)

3 Свободная энциклопедия. Сайт. Форма доступа: <http://ru.wikipedia.org>