

Электромонтер по эксплуатации электросчетчиков.

Код профессии- 19869.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.

Электротехника – это наука о процессах, связанных с практическим применением электрических и магнитных явлений. Так же называют отрасль техники, которая применяет их в промышленности, медицине, военном деле и т. д.

Электрическое поле

В природе существуют только два вида зарядов – положительные и отрицательные. Заряды одного знака (одноименные заряды) отталкиваются, заряды разных знаков (разноименные заряды) притягиваются. Наименьшим (элементарным) зарядом обладают элементарные частицы. Например, протон и позитрон заряжены положительно, электрон антипротон – отрицательно. Элементарный отрицательный заряд по величине равен элементарному положительному заряду. В системе СИ заряд измеряется в кулонах (Кл). величина элементарного заряда $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В природе нигде и никогда не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака.

Этот экспериментально установленный факт называется законом сохранения электрического заряда, который формулируется следующим образом: в электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов остается постоянной:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.}$$

Изолированной называется система, не обменивающаяся зарядами с внешней средой.

В 1785 г. Шарль Кулон (1736 – 1806) экспериментально, с помощью крутильных весов, установил закон взаимодействия двух точечных зарядов, т.е таких заряженных тел, размерами которых в данной задаче можно пренебречь. Этот закон гласит: сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по линии, соединяющей эти заряды.

Взаимодействие между зарядами на расстоянии осуществляется через электрическое поле.

Электрическое поле – это одна из форм материи. Оно обладает свойством действовать на внесенные в него заряды с некоторой силой. Электрическое поле является составной частью электромагнитного поля. Поле, окружающее неподвижные заряды, называется **электростатическим**

Электрические цепи постоянного тока

Простая электрическая цепь

Электрической цепью называют совокупность устройств, предназначенных для получения, передачи, преобразования и использования электрической энергии.

Электрическая цепь состоит из отдельных устройств – элементов электрической цепи: источников, потребителей и передающих элементов.

Источниками электрической энергии являются электрические устройства, в которых какой либо вид энергии преобразуется в электрическую.

К потребителям электрической энергии относятся электрические устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии.

Передающие элементы цепи связывают источники и приемники. Кроме электрических проводов в это звено могут входить аппараты для включения и отключения цепи, приборы для измерения электрических параметров (амперметры, вольтметры), устройства защиты (предохранители), преобразующие устройства (трансформаторы) и др.

Любая электрическая цепь характеризуется током, электродвижущей силой и напряжением.

Закон Ома для электрической цепи

В 1826г. Георг Ом (1787-1854) экспериментально установил, что сила тока на участке цепи прямо пропорционально напряжению, приложенному к концам этого участка, и обратно пропорционально его сопротивлению:

$$I=U/R$$

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого изготовлен проводник, его размеров и геометрической формы, а также от температуры. Для однородного проводника постоянного сечения

$$R=r*L/S$$

где r -удельное сопротивление, т.е. сопротивление проводника единичной длины с единичной площадью поперечного сечения, L -длина проводника, S -площадь поперечного сечения. Сопротивление измеряется в омах (Ом). 1 ом- это сопротивление проводника, по которому течет ток с силой 1 А при напряжении между его концами 1 В. На практике сопротивление также измеряют в килоомах ($1\text{кОм}=10^3\text{ Ом}$) и в мегаомах ($1\text{Мом}=10^6\text{ Ом}$).

Соединение проводников в электрической цепи

При последовательном соединении конец предыдущего проводника соединяют с началом последующего проводника

При последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I.$$

Напряжение U на концах всей цепи равно сумме напряжений на проводниках. Например, для случая трех проводников, указанных на рисунке,

$$U=U_1+U_2+U_3.$$

По закону Ома для участка цепи

$$U_1=IR_1; U_2=IR_2; U_3=IR_3; U=IR,$$

где R_1, R_2, R_3 – сопротивления проводников, R - общее сопротивление всего участка цепи.

Из (2.13) и (2.14) следует: $IR=I(R_1+R_2+R_3)$, откуда

$$R=R_1+R_2+R_3$$

Для n последовательно включенных проводников

$$R=R_1+R_2+R_3+\dots+R_n.$$

Если все они имеют одинаковое сопротивление R_1 , то

$$R=nR_1.$$

При последовательном соединении проводников общее сопротивление равно сумме сопротивлений всех проводников.

Из соотношений (2.14) следует, что

$$U_1/U_2=R_1/R_2.$$

Напряжения на последовательно соединенных проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям.

Параллельное соединение

При параллельном соединении начала всех проводников соединяют в одной точке, а их концы- в другой.

В этом случае сила тока I в неразветвленной цепи равна сумме сил токов в параллельно соединенных проводниках:

$$I=I_1+I_2+I_3.$$

Напряжение на концах всех проводников одинаково:

$$U_1=U_2=U_3=U.$$

По закону Ома (для случая трех проводников)

$$I_1=U/R_1; I_2=U/R_2; I_3=U/R_3; I=U/R,$$

Где R_1, R_2, R_3 – сопротивления проводников, R -общее сопротивление участка. Из (2.20) и (2.21) следует

$$U/R=U/R_1+U/R_2+U/R_3$$

откуда

$$1/R=1/R_1+1/R_2+1/R_3.$$

При параллельном соединении величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех проводников .

Если имеет n параллельно соединенных проводников, имеющих одинаковое сопротивление R_1 , то общее сопротивление цепи

$$R=R/n.$$

Из соотношений (2.21) следует, что

$$I/I=R/R.$$

Силы токов в параллельно соединенных проводниках обратно пропорциональны их сопротивлениям.

Сложные электрические цепи постоянного тока

Два правила Кирхгофа полностью определяют электрическое состояние цепей и дают основу для их расчета. Оба эти правила установлены на основе многочисленных опытов и являются следствием закона сохранения энергии.

Первое правило Кирхгофа

Согласно первому правилу Кирхгофа алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю:

т.е. в любом узле цепи сумма входящих токов равна сумме уходящих токов.

Второе правило Кирхгофа

Согласно второму правилу Кирхгофа в любом замкнутом электрическом контуре сумма всех падений напряжения равна сумме всех ЭДС в нем:

Работа и мощность электрического тока.

Закон Джоуля - Ленца.

Если электрическую цепь замкнуть, то в ней возникнет электрический ток. При этом энергия источника будет расходоваться. Найдем работу, которую совершает источник тока для перемещения заряда q по всей замкнутой цепи. Исходя из определения ЭДС, получим:

$$W_n=Eq.$$

Но так как $q=it$, $E=U+U_{вт}$, то $W_{и}=(U+U_{вт})*it$. или $W_{и}=UIt+U_{вт}It$. где $UIt=W$ -работа, совершаемая источником на внешнем участке цепи; $U_{вт}It=W_{вт}$ -потеря энергии внутри источника.

Используя закон Ома для участка цепи, можно записать

$$W=I^2Rt=(U^2/R)t.$$

Величину, характеризующую скорость, с которой совершается работа, называют мощностью:

$$P=W/t.$$

Соответственно мощность, отдаваемая источником,

$$P_{и}=EIt/t=EI.$$

Мощность потребителей

$$PUIt/t=UI=I^2R=U^2/R.$$

Мощность потерь энергии внутри источника

$$P_{вт} = U_{вт} I = I^2 R_{вт} = U_{вт}^2 / R_{вт}.$$

Единица мощности – ватт (Вт):

$$[P] = 1 \text{ Дж/1с} = 1 \text{ Вт},$$

Т.е. мощность равна 1 Вт, если за 1с совершается работа в 1Дж.

Электрическая работа выражается в джоулях, но согласно формуле $P=W/t$ имеем $W=Pt$, откуда

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

На практике пользуются такими единицами работы, как киловатт-час ($\text{кВт} \cdot \text{ч}$): $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600000 \text{ Вт} \cdot \text{с}$.

Когда в цепи с сопротивлением R существует ток, электроны, перемещаясь под действием поля, сталкиваются с ионами кристаллической решетки проводника. При этом кинетическая энергия электронов передается ионам, что приводит к увеличению амплитуды колебательного движения ионов, и, следовательно, к нагреванию проводника. Количество теплоты, выделенной в проводнике,

$$Q = I^2 R t$$

Приведенная зависимость носит название закона Ленца – Джоуля: **количество теплоты, выделяемой при прохождении тока в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.**

Преобразование электрической энергии в тепловую имеет большое практическое значение и широко используется в различных нагревательных приборах как в промышленности, так и в быту.

Электromагнетизм

Магнитное поле и его параметры

Магнитное поле - одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующая воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.

Магнитное поле изображается силовыми линиями, касательные к которым совпадают с ориентацией магнитных стрелок, внесенных в поле. Таким образом, магнитные стрелки как бы являются пробными элементами для магнитного поля.

За положительное направление магнитного поля условно принимают направление северного полюса магнитной стрелки.

Рассмотрим количественные характеристики магнитного поля.

1. Магнитная индукция \mathbf{B} – векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля.

Единицей магнитной индукции является вебер, деленный на квадратный метр, или Тесла (Тл):

$$[B] = 1 \text{ Вб/1м}^2 = 1 \text{ Тл}.$$

2. Абсолютная магнитная проницаемость среды μ_a – величина, являющаяся коэффициентом, отражающим магнитные свойства среды:

$$\mu_a = \mu_0 \mu_r,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (Ом} \cdot \text{с)/м}$ – магнитная постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума.

Единицу Ом - секунда ($\text{Ом} \cdot \text{с}$) называют генри (Гн).

Таким образом, $[\mu_0] = \text{Гн/м}$.

Величину μ называют относительной магнитной проницаемостью среды. Она показывает, во сколько раз индукция поля, созданного током в данной среде, больше или меньше, чем в вакууме, и является безразмерной величиной.

Для большинства материалов проницаемость μ постоянна и близка к единице. Для ферромагнитных материалов μ является функцией тока, создающего магнитное поле, и достигает больших значений (10^2 - 10^5).

3. Напряженность магнитного поля H - векторная величина, которая не зависит от свойств среды и определяется только токами в проводниках, создающими магнитное поле.

Направление вектора H для изотропных сред совпадает с вектором B и определяется касательной, проведенной в данной точке поля (точка A) к

силовой линии. Напряженность связана с магнитной индукцией соотношением $B = \mu aH$.

Единица напряженности магнитного поля – ампер на метр:
 $[H] = 1A/1m$.

Приведенные характеристики магнитного поля являются основными. Теперь рассмотрим производные характеристики.

4. магнитный поток Φ – поток магнитной индукции. На рисунке показано однородное магнитное поле, пересекающее площадку S . Магнитный поток Φ через площадку S в однородном магнитном поле равен произведению нормальной составляющей вектора индукции B на площадь S площадки:

$$\Phi = B_n S = BS \cos \beta$$

5. Магнитное напряжение U на участке AB в однородном магнитном поле определяется как произведение проекции H вектора H на отрезок AB и длину этого отрезка l :

$$U_m = Hl$$

Единица магнитного напряжения - ампер (А).

Закон электромагнитных сил

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила. Эта сила возникает в результате взаимодействия данного магнитного поля с магнитным полем, которое образуется в результате движения электрона.

Она называется силой Лоренца и определяется соотношением

$$F_0 = q_0 v B \sin \alpha$$

где q - заряд электрона; B - магнитная индукция; v - скорость движения электронов; α - угол между направлениям магнитного поля и электронного тока.

Направление силы определяется по правилу левой руки: левую руку следует расположить так, чтобы магнитное поле входило в ладонь, вытянутые четыре пальца располагаются по направлению тока; тогда отогнутый под прямым углом большой палец покажет направление силы.

Сила Лоренца

На проводнике с током, находящийся в магнитном поле, действует сила. Так как ток в металлическом проводнике обусловлен движением электронов, то силу, действующую на проводник, можно рассматривать как сумму сил, действующих на все электроны проводника длиной l . В результате получаем соотношение $F = F_0 n l S$,

где F – сила Лоренца, действующая на электрон; n – концентрации электронов (число электронов в единице объема) ; l, S – длина и площадь поперечного сечения проводника.

С учетом формулы можно записать $F = q_0 n v S B l \sin \alpha$.

Легко понять, что произведение $q_0 n v$ является плотностью тока I ; следовательно, $F = I S B l \sin \alpha$

Произведение IS есть ток I , т.е.

$$\mathbf{F} = I\mathbf{B}\sin\alpha$$

Полученная зависимость отражает закон Ампера.

Закон электромагнитной индукции

Суть закона электромагнитной индукции, открытого английским физиком М.Фарадеем, заключается в следующем: всякое изменение магнитного поля, в котором помещен проводник произвольной формы, вызывает в последнем появлении ЭДС электромагнитной индукции.

Рассмотрим этот закон с количественной стороны при движении прямолинейного проводника в однородном магнитном поле.

Пусть проводник длиной l движется со скоростью v . Тогда на свободные электроны, движущиеся вместе с проводником, будет действовать сила Лоренца, направление которой определяется по правилу левой руки. Под действием этой силы электроны движутся вдоль проводника, что приводит к разделению зарядов: на конце А проводника накапливаются положительные заряды, на конце Б – отрицательные. Но при разделении зарядов возникает электрическое поле, препятствующее этому процессу. Когда силы поля уравниваются силе Лоренца, разделение прекратится. В процессе разделения зарядов силы Лоренца производят работу. Определим значение этой работы по отношению к единичному заряду, т.е. напряжение между точками А и Б, поскольку поле сил Лоренца однородное, $U_{AB} = E_{\text{л}}l$. Но $E_{\text{л}} = F_{\text{л}}/q_0 = q_0 v B \sin\alpha / q_0 = vB$, так как в нашем случае $\alpha = \pi/2$. В результате

$$\text{Получим } U_{AB} = vB l.$$

Это напряжение равно ЭДС электромагнитной индукции и в общем случае, когда $\alpha = \pi/2$, выражается формулой

$$E = vB l \sin\alpha.$$

Направление ЭДС определяется по правилу правой руки: правую руку располагают так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, отогнутый под прямым углом большой палец совмещают с направлением скорости; тогда вытянутые четыре пальца покажут направление ЭДС.

Правило Лоренца

ЭДС, индуцируемая в контуре, стремится вызвать токи, препятствующие изменению магнитного потока. Следовательно, индуцированная в контуре ЭДС и ток всегда имеют такое направление, при котором они препятствуют причине, их вызывающей.

Это положение выражает сформулированный Ленцем закон о направлении индуцированного тока.

Явление индукции и самоиндукции

Рассмотрим процесс, происходящий в цепи при замыкании ключа К. до замыкания ключа ток в цепи $I=0$. после замыкания ключа ток в цепи устанавливается не мгновенно и лишь через определенное время достигает значения $I=U/R_k$. Следовательно, ток, проходящий через катушку, изменяется, а значит, изменяется поток Φ_L каждого витка и потокосцепление катушки WL .

Получим

$$E_L = -L di/dt$$

ЭДС e называют ЭДС самоиндукции, а рассмотренное явление возникновения ЭДС в катушке вследствие изменения тока в этой катушке – самоиндукцией.

ЭДС самоиндукции, согласно принципу Ленца, препятствует изменению тока в катушке, поэтому ток достигает установившегося значения $I=U/R$ постепенно. Если замкнуть

катушку на резистор, то ток в цепи не исчезнет мгновенно, так как ЭДС самоиндукции препятствует его уменьшению.

Взаимная индукция

В том случае, когда переменное магнитное поле, созданное током одной катушки, и наоборот, на зажимах последней катушки возникает ЭДС, которую называют ЭДС взаимной индукции.

Явление взаимной индукции находит широкое применение в различных электро- и радиотехнических устройствах. В частности, оно используется для трансформации электроэнергии в целях переменного тока.

Однако это явление может проявлять себя и как вредное. Например, в сердечнике катушки или трансформатора за счет явления взаимной индукции возникает кольцевой ток, который называют вихревым. Протекание вихревых токов в сердечнике вызывает большие тепловые потери. Для уменьшения этих потерь ферромагнитные сердечники набирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали с повышенным удельным электрическим сопротивлением.

Электрические цепи переменного тока

Основные понятия переменного тока. Получение и изображение тока.

Переменный однофазный ток

Переменным называют электрический ток, периодически (т.е. через равные промежутки времени) меняющий свое направление и непрерывно изменяющийся по величине. Мгновенные значения переменного тока (а также переменной ЭДС и напряжения) через равные промежутки времени повторяются.

Параметры переменного тока

Величины, которые полностью характеризуют переменный ток, т. е. дают полное представление о нем, называются параметрами переменного тока. *Амплитудным значением* или просто амплитудой называется наибольшее значение переменного тока, которого он достигает в процессе изменений. Амплитудные значения силы тока, напряжения и ЭДС обозначаются соответственно I_m , U_m , E_m .

Мгновенным значением называется значение переменного тока в любой момент времени. Мгновенные значения силы тока обозначаются буквой i , напряжения — буквой u , ЭДС — буквой e . $i=I \sin \omega t$; $u=U \sin \omega t$; $e=E \sin \omega t$.

Действующие значения переменного тока, напряжения и ЭДС обозначаются соответственно I , U , E . Величина действующего значения переменного тока равна такой величине постоянного тока, который, проходя через одно и то же сопротивление в течение одного и того же времени, что и рассматриваемый нами переменный ток, выделяет одинаковое с ним количество тепла. Найдем соотношение между действующим и амплитудным значениями тока. Согласно определению, $Q_{\sim} = Q$ (Q_{\sim} — количество теплоты, выделяемое постоянным и переменным токами)

$$Q_{\sim} = I^2 R t; Q = i^2 R dt,$$

где $i^2 R dt$ - количество теплоты, выделяемое переменным током за время dt .

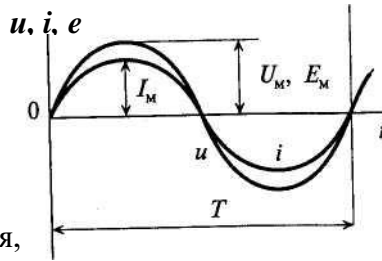
Приравняв эти выражения, получим

$$I^2 R t = \int i^2 R dt.$$

Сократив на общий множитель R и учтя, что $i = I \sin \omega t$, найдем выражения для действующего значения тока:

$$I = \sqrt{(1/T) \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt},$$

Ток, у которого мгновенные значения повторяются через определенный промежуток времени, называется периодическим.



Периодом T называется время, полное изменение величины

за которое происходит тока

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f,$$

Циклическая частота f – величина, обратная периоду T , т.е.

$$f = 1/T,$$

И характеризующая число полных колебаний тока за 1с.

Единицей циклической частоты является герц (Гц)

$$[f] = 1/c = 1 \text{ Гц}.$$

Промышленной частотой в РФ считается частота 50 Гц.

Сопоставив формулы 1 и 2, получим

$$\omega = 2\pi f.$$

Найдем соотношение между действующим и амплитудным значениями тока. Согласно определению, $Q_{\sim} = Q$ (Q_{\sim} – количество теплоты, выделяемое переменным током и постоянным током)

$$Q_{\sim} = I^2 R t; Q = i^2 R dt,$$

где $i^2 R dt$ – количество теплоты, выделяемое переменным током за время dt .

Приравняв эти выражения, получим

$$I^2 R t = \int_0^T i^2 R dt.$$

Сократив на общий множитель R и учтя, что $i = I \sin \omega t$, найдем выражения для действующего значения тока:

$$I = \sqrt{(1/T) \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt},$$

Или после интегрирования

$$I = I_m / \sqrt{2} \approx 0,707 I_m$$

Электрическая цепь с активным и индуктивным сопротивлением

На зажимах цепи переменного тока действует напряжение $u = U \sin \omega t$. Так как цепь обладает только активным сопротивлением, то, согласно закону Ома для участка цепи,

$$I = u/R = U_m \sin \omega t / R = I_m \sin \omega t,$$

где $I = U/R$ представляет собой выражение закона Ома для амплитудных значений.

Разделив левую и правую части этого выражения на 2, получим закон Ома для действующих значений:

$$I = U/R.$$

Сопоставляя выражения для мгновенных значений тока и напряжения, приходим к выводу, что токи и напряжения в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе.

Мгновенная мощность. Как известно, мощность определяет скорость расхода энергии и, следовательно, для цепей переменного тока является переменной величиной. По определению, мощность

$$P = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Учитывая, что $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$ и $I_m U_m / 2 = UI$, окончательно получим

$$P = UI - UI \cos 2\omega t.$$

Анализ формулы и рисунка, соответствующего этой формуле, показывает, что мгновенная мощность, оставаясь все время положительной, колеблется около уровня UI .

Средняя мощность. Для определения расхода энергии за длительное время целесообразно пользоваться средним значением мощности. Для вывода выражения средней мощности найдем сначала расход энергии в цепи с активным сопротивлением R за время $T/2$:

$$W = \int_0^{T/2} (UI - UI \cos 2\omega t) dt = UI \int_0^{T/2} dt - UI \int_0^{T/2} \cos 2\omega t dt.$$

$$\text{Так как } \int_0^{T/2} \cos 2\omega t dt = 0, \text{ то } W = UI(T/2).$$

Разделив полученное выражение для W на $T/2$, получим среднюю (активную) мощность:

$$P = UI.$$

Единицами активной мощности являются ватт (Вт), киловатт (кВт) и мегаватт (МВт): $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт}$; $1 \text{ МВт} = 1000000 \text{ Вт}$.

Под действием синусоидального напряжения в цепи с индуктивной катушкой без ферромагнитного сердечника проходит синусоидальный ток $i = I \sin \omega t$. В результате этого вокруг катушки возникает переменное магнитное поле и в катушке индуцируется ЭДС самоиндукции. При $R=0$ напряжение источника целиком идет на уравнивание этой ЭДС; следовательно, $u = -e_L$. Так как $e_L = -L di/dt$, то

$$U = L(di/dt) = L(d(I \sin \omega t)/dt) = I_m L \cos \omega t,$$

Или

$$U = U_m \sin(\omega t + \pi/2),$$

Где

$$U_m = I_m \omega L$$

Сопоставляя выражения для мгновенных значения тока и напряжения, приходим к выводу, что ток в цепи с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на угол $\pi/2$. физически это объясняется тем, что индуктивная катушка реализует инерцию электромагнитных процессов. Индуктивность катушки L является количественной мерой этой инерции. Фазовые соотношения между током, напряжением и ЭДС для цепи с индуктивностью показаны на рисунках.

Выведем закон Ома для этой цепи. Из выражения следует, что $I = U/(\omega L)$. Пусть $\omega L = 2\pi f L = X_L$, где X_L – индуктивное сопротивление цепи. Тогда получим выражение

$$I_m = U_m / X_L,$$

которое является законом Ома для амплитудных значений. Разделив левую и правую части этого выражения на 1.7, получим закон Ома для действующих значений:

$$I = U / X_L.$$

Проанализируем выражение для $X_L = 2\pi f L$. С увеличением частоты тока f индуктивное сопротивление X_L увеличивается. Физически это объясняется тем, что возрастает скорость изменения тока, а следовательно, ЭДС самоиндукции.

Рассмотрим энергетические характеристики цепи с индуктивностью.

Мгновенная мощность. Как и для цепи с R , мгновенное значение мощности определяется произведением мгновенных значений напряжения и тока: $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \pi/2) \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t$.

Так как $\sin \omega t \cos \omega t = \sin 2\omega t / 2$ и $U_m I_m / 2 = UI$, то окончательно имеем

$$P = UI \sin 2\omega t.$$

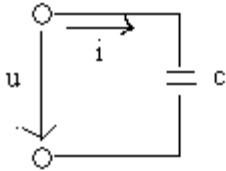
Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и катушкой служит реактивная мощность:

$$Q = UI.$$

Единицей реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (вар)

Электрическая цепь с активным и емкостным сопротивлением и индуктивностью

Проанализируем процессы в цепи, представленной на рисунке.



Зададимся напряжением на зажимах источника $u = U_m \sin \omega t$, тогда ток в цепи также будет меняться по синусоидальному закону. Ток определяют по формуле $i = dQ/dt$. Количество электричества Q на обкладках конденсатора связано с напряжением на емкости и его емкостью: $Q = Cu$. Следовательно,

Таким образом, ток в цепи с емкостью опережает по фазе напряжения на угол $\pi/2$.

Физически это объясняется тем, что напряжение на емкости возникает за счет разделения зарядов на обкладках в результате прохождения тока. Следовательно, напряжение появляется только после возникновения тока (сравните процесс появления напряжения на емкости с процессом увеличения уровня жидкости при заполнении бака). Выведем закон Ома для цепи с емкостью. Из выражения следует, что $I_m = U_m \omega C$, или

$$I_m = U_m / 1/(\omega C).$$

Введем обозначение:

$$1/(\omega C) = 1/(2\pi f C) = X_c,$$

где X_c – емкостное сопротивление цепи.

Тогда выражение закона Ома можно представить в следующем виде:

Для амплитуды значений

$$I_m = U_m / X_c;$$

для действующих значений

$$I = U / X_c.$$

Из формулы и рисунка следует, что емкостное сопротивление X_c уменьшается с ростом частоты f . Это объясняется тем, что при большой частоте через поперечное сечение диэлектрика в единицу времени протекает большее количество электричества при том же напряжении, что эквивалентно уменьшению сопротивления цепи.

Рассмотрим энергетические характеристики в цепи с емкостью.

Мгновенная мощность. Пусть начальная фаза тока в цепи равна нулю, тогда $i = I_m \sin \omega t$. Так как напряжение на емкости отстает от тока на угол $\pi/2$, то $u = U_m \sin(\omega t - \pi/2)$ или

$$u = -U_m \cos \omega t. \text{ Выражение для мгновенной мощности примет вид}$$

$$p = ui = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t = -UI \sin 2\omega t.$$

Реактивная мощность. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и конденсатором служит реактивная мощность $Q = UI$.

Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью представляет собой общий случай последовательного соединения активных и реактивных сопротивлений и является последовательным колебательным контуром.

Принимаем фазу тока нулевой: $i = I_m \sin \omega t$. Тогда напряжение на активном сопротивлении $u_R = U_R m \sin \omega t$, напряжение на индуктивности $u_L = U_L m \sin (\omega t + \pi/2)$, напряжение на емкости $u_C = U_C m \sin (\omega t - \pi/2)$. Построим векторную диаграмму при условии $X_L > X_C$, т.е.

$$U_L = I X_L > U_C = I X_C.$$

Вектор результирующего напряжения U замыкает многоугольник векторов U_R, U_L и U_C . Вектор $U_L + U_C$ определяет напряжение на индуктивности и емкости. Как видно из диаграммы, это напряжение может быть меньше напряжения на каждом из участков в отдельности. Это объясняется процессом обмена энергией между индуктивностью и емкостью. Выведем закон Ома для рассматриваемой цепи. Так как модуль вектора $U_L + U_C$ рассчитывают как разность действующих значений $U_L - U_C$, то из диаграммы следует, что $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$. Но $U_R = IR$; $U_L = I X_L$, $U_C = I X_C$; следовательно, $U = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, откуда

$$I = U / (\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}).$$

Введя обозначение $\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = Z$, где Z – полное сопротивление цепи, найдем

$$I = U / Z.$$

Разность между индуктивным и емкостным сопротивлениями $X_L - X_C = X$ называют реактивным сопротивлением цепи. Учитывая это, получим треугольник сопротивлений для цепи с R, L и C . При $X_L > X_C$ реактивное сопротивление цепи носит активно-индуктивный характер. При $X_L < X_C$ реактивное сопротивление отрицательно и сопротивление цепи носит активно – емкостный характер. Знак сдвига фаз между током и напряжением получим автоматически, так как реактивное сопротивление – величина алгебраическая:

$$\operatorname{tg} \Phi = X / R.$$

Таким образом, при $X_L \neq X_C$ преобладает или емкостное сопротивление, т.е. с энергетической точки зрения цепь с R, L и C сводится к цепи с R, L или с R, C . Тогда мгновенная мощность

$$P = UI \cos \Phi - UI \cos (2\omega t + \Phi),$$

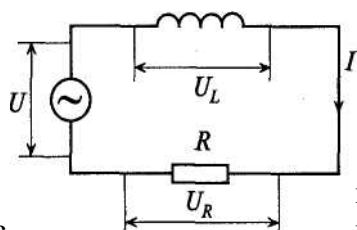
причем знак Φ определяется по формуле. Соответственно активная, реактивная и полная мощности характеризуются выражениями $P = UI \cos \phi$; $Q = UI \sin \phi$; $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$.

Расчет электрических цепей со смещенной нагрузкой соединенной последовательно

Пусть электрическая цепь содержит одну или несколько индуктивностей и емкостей. Под резонансным режимом работы цепи понимают режим, при котором сопротивление является чисто активным. По отношению к источнику питания элементы цепи ведут себя в резонансном режиме как активное сопротивление, поэтому ток и напряжение в неразветвленной части совпадают по фазе. Реактивная мощность цепи при этом равна нулю.

Различают два основных режима: резонанс напряжений и резонанс токов.

Резонанс напряжений



фазе с

Резонанс напряжений называют явление в цепи с последовательным контуром, когда ток в цепи совпадает по напряжением источника.

На рисунке показана схема последовательного колебательного контура.

Найдем условие резонанс напряжений. Для того чтобы ток цепи совпадал по фазе с напряжением, реактивное сопротивление должно быть равно нулю, так как $\operatorname{tg} \phi = X / R$.

Таким образом, условием резонанса является $X = 0$ или $X_L = X_C$. но $X_L = 2\pi f L$, а $X_C = 1 / (2\pi f C)$, где f – частота источника питания. В результате можно записать

$$2\pi fL=1/(2\pi fC).$$

Решив это уравнение относительно f , получим

$$F=1/(2\pi\sqrt{LC})=f_0.$$

При резонансе напряжений частота источника равна собственной частоте колебаний контура.

Выражение является определяющей зависимостью собственной частоты колебаний контура f_0 от параметров L и C . Следует вспомнить, что если конденсатор контура зарядить от источника постоянного тока, а затем замкнуть его на индуктивную катушку, то в контуре возникнет переменный ток частоты f_0 . вследствие потерь колебания в контуре будут затухать, причем время затухания зависит от значения возникших потерь.

Резонансу напряжений соответствует векторная диаграмма показанная на рисунке.

На основании этой диаграммы и закона Ома для цепи с R, L и C сформулируем признаки резонанса напряжений:

- а) сопротивление цепи $Z=R$ минимальное и чисто активное;
- б) ток цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает максимального значения;
- в) напряжение на индуктивной катушке равно напряжению на конденсаторе и каждое в отдельности может во много раз превышать напряжение на зажимах цепи.

Физически это объясняется тем, что напряжение источника при резонансе идет только на покрытие потерь в контуре. Напряжение на катушке и конденсаторе обусловлено накопленной в них энергией, значение которой тем больше, чем меньше потери в цепи. Количество указанное явление характеризуется добротностью контура Q , которая представляет собой отношение напряжения на катушке или конденсаторе к напряжению на зажимах цепи при резонансе:

$$Q=U_L/U=U_L/U_R=IX_L/(IR)=X_L/R=X_C/R.$$

При резонансе $X_L=2\pi fL=2\pi 1/(2\pi\sqrt{LC})L=\sqrt{LC}$. Величину $\sqrt{L/C}=Z_B$ называют волновым сопротивлением контура. Таким образом,

$$Q=Z_B/R.$$

Способность колебательного контура выделять токи резонансных частот и ослаблять токи других частот характеризуется резонансной кривой.

Резонансная кривая показывает зависимость действующего значения тока в контуре от частоты источника при неизменной собственной частоте контура.

Эта зависимость определяется законом Ома для цепи с R, L и C . Действительно, $I=U/Z$, где $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{R^2+[(2\pi fL-1)/(2\pi fC)]^2}$.

На рисунке показана зависимость реактивного сопротивления $X=X_L-X_C$ от частоты источника f . Анализ этого графика и выражения показывает, что при низких и высоких частотах реактивное сопротивление велико и ток в контуре мал. При частотах, близких к f_0 , реактивное сопротивление мало и ток контура велик. При этом, чем больше добротность контура Q , тем острее резонансная кривая контуров.

Резонанс напряжений широко используется в радиотехнике и электронике выделения сигналов заданной частоты.

Расчет электрической цепи с нагрузкой соединенной параллельно.

Резонанс токов.

Резонансом токов называют такое явление в цепи с параллельным колебательным контуром, когда ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника.

На рисунке представлена схема параллельного колебательного контура. Сопротивление R в индуктивной ветви обусловлено тепловыми потерями на активном сопротивлении катушки. Потерями в емкостной ветви можно пренебречь.

Найдем условие резонанса токов. Согласно определению, ток совпадает по фазе с напряжением U . Следовательно, проводимость контура должна быть чисто активной, а реактивная проводимость равна нулю:

$$b = b_1 + b_2 = 0,$$

$$\text{где } b_1 = b_L = X_L / (R^2 + X_L^2); \quad b_2 = -b_C = -1/X_C.$$

Условием резонанса токов является равенство нулю реактивной проводимости контура.

Для выяснения признаков резонанса токов построим векторную диаграмму.

Для того чтобы ток I в неразветвленной части цепи совпадал по фазе с напряжением, реактивная составляющая тока индуктивной ветви I_{Lp} должна быть равна по модулю току емкостной ветви I_C . Активная составляющая тока индуктивной ветви I_{La} оказывается равной току источника I . Определением сопротивление контура в предположении $R \ll X_L$.

Так как сопротивление контура $Z_k = 1/Y_k$, найдем сначала Y_k . Согласно выражению, $Y_k = g_1 + g_2$, поскольку $b_1 + b_2 = 0$, но $g_2 = 0$ ввиду того, что потери в емкостной ветви пренебрежимо малы. Таким образом,

$$Y_k = g_1 = R / (R^2 + X_L^2) \approx R / X_L^2.$$

В этом случае частота, при которой наступает резонанс токов, практически совпадает с собственной частотой контура и, следовательно,

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi 1 / (2\pi \sqrt{LC}) = \sqrt{L/C} = Z_b.$$

Окончательно имеем

$$Z_k = Z_b^2 / R.$$

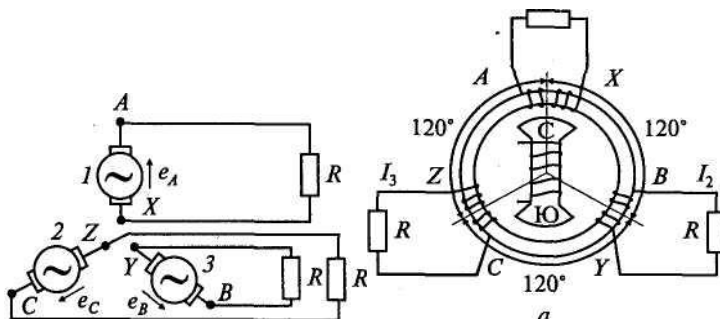
Сформулируем признаки резонанса токов:

- а) сопротивление контура Z_k максимальное и чисто активное;
- б) ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением источника и достигает практически минимального значения;
- в) реактивная составляющая тока в катушке равна емкостному току, причем эти токи могут во много раз превышать ток источника.

Физически это объясняется тем, что при малых потерях в контуре (при малом R) ток источника требуется только для покрытия этих потерь. Ток в контуре обусловлен обменом энергией между катушкой и конденсатором. В идеальном случае (контур без потерь) ток источника отсутствует.

В заключение необходимо отметить, что явление резонанса токов сложнее и многообразнее явления резонанса напряжений. Фактически был рассмотрен только частный случай радиотехнического резонанса.

Трехфазные электрические цепи переменного тока



Три синусоидальные ЭДС фазе на 120° , образуют получающиеся трехфазные системы

В настоящее время трехфазные объясняется главным образом условиях питания трехфазным экономии материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями; 2) при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности; то же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам; 3) трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей; 4) при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

На рисунке изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС. В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угловой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

В момент времени $t=0$ рамка АХ расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t$. Точно такая же будет индуцироваться и в рамке ВУ, когда она повернется на 120° и займет положение рамки АХ. Следовательно, при $t=0$ $e_B = E_m \sin (\omega t - 120^{\circ})$.

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке СZ:

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^{\circ}) = E_m \sin (\omega t + 120^{\circ}).$$

На рисунке представлен график мгновенных значений ЭДС e_a , e_b , e_c и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

Если к каждой из рамок АХ, ВУ и СZ подсоединить нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует трехфазную цепь.

В трехфазной цепи протекает трехфазная система токов, т.е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют фазой трехфазной цепи.

В цепях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

При соединении звездой концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают О. начала обмоток обозначают буквами А, В, С.

При соединении треугольником конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. К точкам А, В, С подсоединяют провода соединительной линии.

Соединение трехфазной цепи «Звездой». Назначение нулевого провода.

Рассмотрим соединение генератора с нагрузкой, включенной звездой.

Провод ОО' называют нулевым (четырёхпроводная цепь). В соответствии с первым законом Кирхгофа вектор тока в нулевом проводе

$$I_0 = I_A + I_B + I_C$$

одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутые по трехфазную симметричную систему. Аналогично напряжений и токов.

системы получили широкое распространение, что следующими причинами: 1) при одинаковых током позволяет получить значительную экономию материала проводов по сравнению с тремя однофазными линиями; 2) при прочих равных условиях трехфазный генератор дешевле, легче и экономичнее, чем три однофазных генератора такой же общей мощности; то же относится к трехфазным двигателям и трансформаторам; 3) трехфазная система токов позволяет получить вращающееся магнитное поле с помощью трех неподвижных катушек, что существенно упрощает производство и эксплуатацию трехфазных двигателей; 4) при равномерной нагрузке трехфазный генератор создает на валу приводного двигателя постоянный момент в отличие от однофазного генератора, у которого мощность и момент на валу пульсируют с двойной частотой тока.

На рисунке изображена схема простейшего трехфазного генератора, с помощью которой легко пояснить принцип получения трехфазной ЭДС. В однородном магнитном поле постоянного магнита вращаются с постоянной угловой скоростью ω три рамки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

В момент времени $t=0$ рамка АХ расположена горизонтально и в ней индуцируется ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t$. Точно такая же будет индуцироваться и в рамке ВУ, когда она повернется на 120° и займет положение рамки АХ. Следовательно, при $t=0$ $e_B = E_m \sin (\omega t - 120^{\circ})$.

Рассуждая аналогичным образом, находим ЭДС в рамке СZ:

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 240^{\circ}) = E_m \sin (\omega t + 120^{\circ}).$$

На рисунке представлен график мгновенных значений ЭДС e_a , e_b , e_c и векторная диаграмма трехфазной системы ЭДС.

Если к каждой из рамок АХ, ВУ и СZ подсоединить нагрузку (посредством щеток и контактных колец), то в образовавшихся цепях появятся токи.

Трехфазный генератор, соединенный проводами с трехфазным потребителем, образует трехфазную цепь.

В трехфазной цепи протекает трехфазная система токов, т.е. синусоидальные токи с тремя различными фазами. Участок цепи, по которому протекает один из токов, называют фазой трехфазной цепи.

В цепях экономии обмотки трехфазного генератора соединяют звездой или треугольником. При этом число соединительных проводов от генератора к нагрузке уменьшается до трех или четырех.

При соединении звездой концы этих обмоток объединяют в одну точку, которую называют нулевой точкой генератора и обозначают О. начала обмоток обозначают буквами А, В, С.

При соединении треугольником конец первой обмотки генератора соединяют с началом второй, конец второй – с началом третьей, конец третьей – с началом первой. К точкам А, В, С подсоединяют провода соединительной линии.

Как отмечалось, при симметричной нагрузке, когда сопротивления Z_A, Z_B и Z_C равны между собой и имеют одинаковой характер, векторы токов I_A, I_B, I_C равны по абсолютному значению и образуют трех лучевую звезду, у которой углы между лучами равны 120° .

Из геометрического построения, показанного на рисунке, следует, что в это случае векторная сумма токов равна нулю:

$$I_A + I_B + I_C = 0.$$

Таким образом, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен. Получается схема трехфазной трехпроводной цепи, изображенная на рисунке. Соединение звездой с нулевым проводом принято условно обозначать значком \star , а соединение звездой без нулевого провода – значком Δ .

Площадь поперечного сечения нулевого провода принимают равной половине площади поперечного сечения каждого из остальных трех проводов (их сечения равны между собой).

Рассмотрим симметричную нагрузку, для которой

$$Z_A = Z_B = Z_C = Z, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi.$$

К зажимам А, В, С подходят провода линии электропередачи – линейные провода.

Введем обозначения: I_L – линейный ток в проводах линии электропередач; I_ϕ – ток в сопротивлениях (фазах) нагрузки; U_L – линейное напряжение между линейными проводами; U_ϕ – фазное напряжение на фазах нагрузки.

В рассматриваемой схеме фазные и линейные токи совпадают: $I_L = I_\phi$, напряжения U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} являются линейными, а напряжения U_A, U_B, U_C – фазными. Складывая напряжения, находим:

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{BC} = U_B - U_C; \quad U_{CA} = U_C - U_A.$$

Векторную диаграмму, удовлетворяющую этим уравнениям, начинаем строить с изображения звезды фазных напряжений U_A, U_B, U_C . Затем строим вектор U_{AB} – как геометрическую сумму векторов U_A и $-U_B$, вектор U_{BC} – как геометрическую сумму векторов U_B и $-U_C$, вектор U_{CA} – как геометрическую сумму векторов U_C и $-U_A$.

При симметричной нагрузке модули векторов фазных (и линейных) напряжений равны между собой. Тогда топографическую диаграмму можно изобразить так, как показано на рисунке.

Опустив перпендикуляр OM , из прямоугольного треугольника находим

$$U_L/2 = \sqrt{U_\phi^2 - U_\phi^2/4} = \sqrt{3}U_\phi/2.$$

В симметричной звезде фазные и линейные токи и напряжения связаны соотношениями $I_L = I_\phi$; $U_L = \sqrt{3}U_\phi$.

Ток в нулевом проводе равен нулю при строго симметричной нагрузке. Если нагрузка несимметричная, т.е. $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$, то неравными будут и токи: $I_A \neq I_B \neq I_C$.

При не симметрии нагрузки и отсутствии нулевого провода фазные напряжения U_A, U_B, U_C будут различными.

Таким образом, нулевой провод в четырех проводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Не симметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей, рассчитанных на определенное рабочее напряжение.

Соединение обмоток генератора и потребителей «Треугольником»

Треугольником могут быть соединены как обмотки генератора, так и фазы нагрузки. При соединении треугольником фазные и линейные напряжения равны: $U_L = U_\phi$. Применяв первый закон Кирхгофа к узлам А, В и С, найдем связь между линейными I_A, I_B, I_C и фазными I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} токами. Для векторов токов справедливы соотношения

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

Этим уравнениям удовлетворяют векторные диаграммы, представленные на рисунке.

При симметричной нагрузке

$$I_A=I_B=I_C=I_L; I_{AB}=I_{BC}=I_{CA}=I_\Phi.$$

Из треугольника фазных и линейных токов находим

$$I_L=2I_\Phi \cos 30^\circ=2I_\Phi \sqrt{3}/2=\sqrt{3}I_\Phi.$$

Таким образом, при соединении треугольником

$$U_L=U_\Phi; I_L=\sqrt{3}I_\Phi.$$

Мощность трехфазной цепи. Решение задач по расчету электрических цепей.

Активная мощность трехфазной цепи равна сумме активных мощностей ее фаз:

$$P=P_A+P_B+P_C.$$

Реактивная мощность трехфазной цепи равна сумме реактивных мощностей ее фаз:

$$Q=Q_A+Q_B+Q_C.$$

Очевидно, что в симметричной трехфазной цепи

$$P_A=P_B=P_C=P_\Phi; Q_A=Q_B=Q_C=Q_\Phi.$$

Тогда $P=3P_\Phi$, $Q=3Q_\Phi$.

Мощность одной фазы определяется по формулам для однофазной цепи. Таким образом,

$$P=3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi; Q=3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi.$$

Эти формулы можно использовать для расчета мощности симметричной трехфазной цепи. Однако измерения фазных напряжений и токов связаны с некоторыми трудностями, так как необходим доступ к нулевой точке, которая не всегда имеет специальный вывод и находится внутри машины. Проще измерить линейные токи и напряжения непосредственно на клеммах щита питания. Поэтому формулы мощности трехфазной системы записывают через линейные токи и напряжения.

При соединении звездой

$$P=3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3(U_L/\sqrt{3})I_L \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi.$$

При соединении треугольником

$$P=3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = 3U_L(I_L/\sqrt{3}) \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi/$$

Таким образом, в обоих случаях активная мощность симметричной цепи

$$P=\sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

Аналогично, реактивная мощность

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=\sqrt{3}U_L I_L$$

Полная мощность

Коэффициент мощности симметричной трехфазной цепи находят как отношение активной и полной мощностей:

$$\cos \varphi = P/S = P/(\sqrt{3}U_L I_L)$$

Эти формулы точны для симметричных цепей. Реальные цепи рассчитывают таким образом, чтобы их нагрузка была близка к симметричной. Поэтому приведенные формулы имеют широкое применение.

Трансформаторы

Назначение, классификация и устройства однофазного трансформатора.

Трансформатор предназначен для преобразования переменного тока одного напряжения в ток другого напряжения без изменения частоты. Увеличение напряжения осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, уменьшение - понижающих.

Трансформаторы применяют в линии электропередачи, в техники связи, в автоматике, измерительной технике и других областях.

В соответствии с назначением различают: силовые трансформаторы для питания электрических двигателей и осветительных сетей; специальные трансформаторы для питания

сварочных аппаратов, электропечей и других потребителей особого назначения; измерительные трансформаторы для подключения измерительных приборов.

Простейший трансформатор (рис. 2.1) состоит из замкнутого сердечника, набранного из отдельных, изолированных друг от друга листов трансформаторной стали. На сердечнике размещаются обмотки. Обмотка, которая подключается к источнику переменного тока, называется первичной. Обмотка, к которой присоединяют нагрузку, называется вторичной.

Переменный ток, протекая по первичной обмотке, создает в сердечнике магнитный поток Φ , который пронизывает все обмотки одновременно и в каждой из них индуцирует переменную ЭДС, величина которой пропорциональна числу витков в обмотке. Чем больше витков, тем больше ЭДС:

$$(2.1) \quad E_1 = -j\omega_1 N_1 \Phi$$

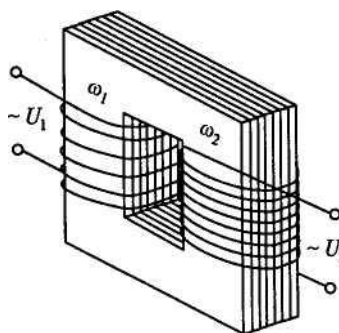
где E_1 — ЭДС первичной обмотки (ЭДС самоиндукции); E_2 — ЭДС вторичной обмотки (ЭДС взаимной индукции); ω_1 и ω_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках.

Пренебрегая падением напряжения внутри обмоток, можно считать, что при отключенной нагрузке (холостом ходе) индуцируемые ЭДС в обмотках равны напряжениям, действующим на первичной и вторичной обмотках:

$$E_1 = U_1; E_2 = U_2, \text{ тогда}$$

$$U_1 = \omega_1 \Phi; U_2 = \omega_2 \Phi \quad (2.2)$$

где U_1 и U_2 — напряжения на первичной и вторичной обмотках. Следовательно, напряжение на вторичной обмотке тем больше, чем



По числу фаз трансформаторы делятся на одно- и трехфазные. Трансформаторы, используемые в технике связи подразделяют на низко- и

б

Рис. 2.1. Принципиальная схема трансформатора (а) и

высокочастотные.

Расчетные мощности трансформаторов различны- от долей вольт-ампер до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты- от единиц герц до сотен кило-герц.

Трансформатор- простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%. КПД трансформатора η определяемый как отношение мощности на выходе P_2 , к мощности на входе P_1 , зависит от нагрузки. Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке равной примерно половине номинального значения.

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько обмоток.

Для уменьшения потерь на гистерезис магнитопровод изготавливают из магнитного материала- трансформаторной стали, имеющей узкую петлю намагничивания. Для уменьшения потерь на вихревые токи на материал магнитопровод вводят примесь кремния, повышающую его электрическое сопротивление, а сам магнитопровод собирают

из отдельных листов электрической стали толщиной 0,35-0,5 мм, изолированных друг от друга теплостойким лаком или специальной бумагой.

Различают трансформаторы стержневого и броневые типов. Последний хорошо защищает обмотки катушек от механических повреждений. Верхнюю часть магнитопровода, называемую ярмом крепят после насадки на стержень катушек (обмоток). Стержни и ярмо соединяют очень плотно, чтобы исключить воздушные засоры на стыках.

Обмотки трансформаторов изготавливают из медного провода и располагают на одном и том же или на разных стержнях, рядом или одну под другой. В последнем случае непосредственно к стержню примыкает обмотка низшего напряжения, а поверх нее размещается обмотка высшего напряжения.

Обмотку трансформатора, к которой подводится напряжение питающей сети, называют первичной, а обмотку, к которой подсоединяется нагрузка, - вторичной. На сердечнике может быть размещено несколько вторичных обмоток с разным числом витков, что позволяет получить различные по значению вторичные напряжения.

При работе трансформаторы за счет токов в обмотках, а также впоследствии перемагничивания магнитопровода и вихревых токов выделяется теплота. Трансформаторы небольшой мощности (до 10 кВ. А), для которых достаточно воздушного охлаждения, называют сухими.

В мощных трансформаторах применяют масляное охлаждение.

Принцип действия трансформатора. Коэффициент трансформации. Расчет трансформатора.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции, которое является следствием закона электромагнитной индукции.

При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением U_1 по обмотке начнет проходить ток I_1 , который создаст в магнитопровод переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки, индуктирует в ней ЭДС E_2 , которую можно использовать для питания нагрузки.

Поскольку первичная и вторичная обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным потоком Φ , выражения индуцируемых в обмотке ЭДС можно записать в виде

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_m$$

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_m$$

где f – частота переменного тока; ω_1, ω_2 - число витков обмоток.

Поделив одно равенство на другое, получим $E_2/E_1 = \omega_2/\omega_1 = k$.

Отношение чисел витков обмоток трансформатора называют коэффициентом трансформации k .

Таким образом, коэффициент трансформации показывает, как относятся действующие значения ЭДС вторичной и первичной обмоток.

На основании закона электромагнитной индукции можно написать

$$E_1 = -\omega_1 (d\Phi/dt); e_2 = -\omega_2 (d\Phi/dt).$$

Поделив одно, равенство на другое, получим $e_2/e_1 = \omega_2/\omega_1 = k$.

Следовательно, в любой момент времени отношение мгновенных значений ЭДС вторичной и первичной обмоток равно коэффициенту трансформации. Нетрудно понять, что это возможно только при полном совпадении по фазе ЭДС e_1 и e_2 .

Если цепь вторичной обмотки трансформатора разомкнута (режим холостого хода), то напряжение на зажимах обмотки равно ее ЭДС: $U_2 = E_2$, а напряжение источника питания почти полностью уравнивается ЭДС первичной обмотки $U \approx E_1$. следовательно, можно написать, что $k = E_2/E_1 \approx U_2/U_1$.

Таким образом, коэффициент трансформации может быть определен на основании измерений напряжения на входе и выходе ненагруженного трансформатора. Отношение напряжений на обмотках ненагруженного трансформатора указывается в его паспорте.

Учитывая высокий КПД трансформатора, можно полагать, что $S_1 \approx S_2$, где $S_1 = U_1 I_1$ – мощность, потребляемая из сети; $S_2 = U_2 I_2$ – мощность, отдаваемая в нагрузку.

Таким образом, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, откуда $I_1 / I_2 \approx U_2 / U_1 = k$.

Отношение токов первичной и вторичной обмоток приближено равно коэффициенту трансформации, поэтому ток I_2 во сколько раз уменьшается (увеличивается U_2).

Трехфазные и специальные трансформаторы. Схемы соединения трехфазного трансформаторы.

В линиях электропередачи используют в основном трехфазные силовые трансформаторы. Внешний вид, конструктивные особенности и компоновка основных элементов этого трансформатора представлены на рисунке. Магнитопровод трехфазного трансформатора имеет три стержня, на каждом из которых размещаются две обмотки одной фазы.

Для подключения трансформатора к линиям электропередачи на крышке бака имеются вводы, представляющие собой фарфоровые изоляторы, внутри которых проходят медные стержни. Вводы высшего напряжения обозначают буквами А, В, С, вводы низшего напряжения – буквами а, в, с. Ввод нулевого провода располагают слева от ввода а и обозначают О.

Принцип работы и электромагнитные процессы в трехфазном трансформаторе аналогичны рассмотренным ранее. Особенностью трехфазного трансформатора является зависимость коэффициента трансформации линейных напряжений от способа соединения обмоток.

Применяются главным образом три способа соединения обмоток трехфазного трансформатора: 1) соединение первичных и вторичных обмоток звездой; 2) соединение первичных обмоток звездой, вторичных – треугольником; 3) соединение первичных обмоток треугольником, вторичных – звездой.

Обозначим отношение чисел витков обмоток одной фазы буквой k , что соответствует коэффициенту трансформации однофазного трансформатора и может быть выражено через отношение фазных напряжений:

$$K = \omega_2 / \omega_1 \approx U_{\phi 2} / U_{\phi 1}.$$

Обозначим коэффициент трансформации линейных напряжений буквой s .

При соединении обмоток по схеме звезда- звезда

$$S = U_{л 2} / U_{л 1} = \sqrt{3} U_{\phi 2} / (\sqrt{3} U_{\phi 1}) = k.$$

При соединении обмоток по схеме звезда – треугольник

$$S = U_{л 2} / U_{л 1} = U_{\phi 2} / (\sqrt{3} U_{\phi 1}) = k / \sqrt{3}.$$

При соединении обмоток по схеме треугольник – звезда

$$S = U_{л 2} / U_{л 1} = \sqrt{3} U_{\phi 2} / U_{\phi 1} = \sqrt{3} k.$$

Таким образом, при одном и том же числе витков обмоток трансформатора можно в $\sqrt{3}$ раза увеличить или уменьшить его коэффициент трансформации, выбирая соответствующую схему соединения обмоток.

Асинхронные двигатели

Асинхронным двигателем называется машина, преобразующая электрическую энергию переменного тока в механическую, у которой скорость вращения ротора зависит

от нагрузки. Асинхронные двигатели бывают трехфазные, двухфазные и однофазные и состоят из двух основных частей: статора и ротора.

Статор — неподвижная часть двигателя (рис. 2.2, й). С внутренней его стороны сделаны пазы, в которые укладываются фазные обмотки.

У трехфазного асинхронного двигателя три обмотки. Они выполнены одинаково и размещаются под углом 120° . По обмоткам протекает трехфазный ток, который создает магнитное поле, вращающееся с частотой

$$n = \frac{60}{p} \quad (2.5)$$

где n — частота вращения, мин^{*}; f — частота переменного тока, Гц; p — число пар полюсов.

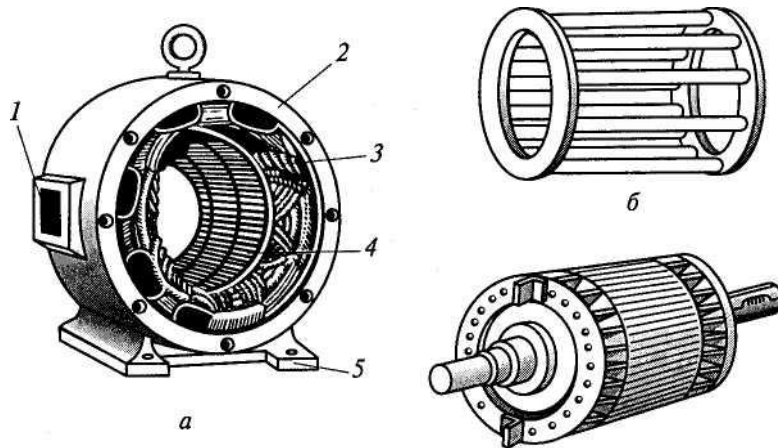


Рис. 2.2. Устройство асинхронного двигателя:

а — статор; *б* — короткозамкнутая обмотка ротора (беличья клетка); *в* — ротор в собранном виде; 1 — клеммный щиток; 2 — станина; 3 — обмотка; 4 — сердечник; 5 — лапа

Ротор — вращающаяся часть двигателя. Он может быть короткозамкнутым и фазным. В двигателях с короткозамкнутым ротором обмотка выполнена в виде медных или литых алюминиевых стержней, замкнутых по торцам между собой (рис. 2.2, б, в).

В двигателях с фазным ротором последний имеет фазные обмотки (рис. 2.3, а, б). Они выполняются по типу обмоток статора и имеют такое же число фаз. Обмотки соединяются в «звезду», т. е. концы их соединены в одну точку, а начала подсоединяются к медным кольцам, закрепленным на валу. У таких двигателей есть приспособление, дающее возможность либо включать роторную обмотку последовательно с реостатом во время пуска, либо замыкать ее накоротко во время работы.

Для уменьшения потерь на вихревые токи статоры и роторы асинхронных двигателей набираются из отдельных, изолированных друг от друга, листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

Если подключить статорные обмотки двигателя к сети трехфазного переменного тока, то внутри статора возникает вращающееся магнитное поле. Это поле пересекает одновременно обмотки статора и ротора. В статорных обмотках индуцируются противоположно направленные силы, определяющие величину сил токов обмотки.

В роторных обмотках индуцируется ЭДС, под действием которой в обмотках протекают токи, которые, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создают вращающий момент, в результате которого ротор начинает вращаться в сторону вращения поля статора.

Если предположить, что ротор вращается с такой же скоростью, с какой вращается магнитное поле, то токи в обмотках ротора исчезнут. Исчезновение токов приведет к тому, что ротор начнет вращаться медленнее, чем поле статора. При этом поле статора начнет пересекать обмотки ротора и на него вновь будет воздействовать вращающий момент.

Следовательно, ротор при своем вращении всегда должен иметь частоту вращения меньшую, чем частота вращения поля статора. Отсюда двигатель получил название асинхронного (неодновременного). Разница между частотой вращения поля статора n и частотой вращения ротора m характеризуется величиной s , называемой скольжением:

Для асинхронного двигателя скольжение изменяется от единицы до величины, близкой к нулю.

Во время пуска двигателя, когда ротор еще неподвижен ($s = 1$), частота пересечения обмоток ротора вращающимся магнитным полем наибольшая. В обмотках ротора индуцируются наибольшие ЭДС, которые вызывают большую силу тока. Токи обмоток ротора создают свое вращающееся магнитное поле, направленное навстречу вращающемуся магнитному полю статора, и уменьшают его. В результате уменьшается противоэлектродвижущая сила, а токи в обмотках статора растут. Пусковой ток превышает номинальный в 4—7 раз.

Частота вращения ротора двигателей с короткозамкнутым ротором, рассчитанная по формуле (2.5), регулируется либо переключением числа пар полюсов, либо изменением величины подводимого напряжения.

Частота вращения ротора двигателя с фазным ротором регулируется реостатом, включенным в обмотки ротора. Изменяя сопротивление реостата, изменяют силу тока в роторе, при этом изменяется поле ротора, соответственно изменяется сила взаимодействия полей ротора и статора. Таким образом, изменяется величина скольжения.

Для изменения направления вращения U асинхронных двигателей (реверсирования) необходимо изменить чередование фаз питающего напряжения (поменять местами I любые две фазы).

Синхронные машины

Синхронные электрические машины чаще всего применяют в качестве генераторов. Синхронные электродвигатели применяют значительно реже, чем асинхронные, и только в тех случаях, если при данной мощности и режиме работы они оказываются экономичнее.

Машину называют синхронной потому, что ее ротор вращается с той же скоростью, что и вращающийся магнитный поток, созданный током в обмотке статора, т. е. ротор и магнитный поток вращаются синхронно.

Устройство синхронной машины. Синхронная машина, так же как и асинхронный двигатель, состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор ничем не отличается от статора трехфазного асинхронного электродвигателя. Ротор представляет собой вращающийся электромагнит, катушки которого питаются постоянным током.

В условиях строительства синхронные генераторы с приводом от двигателей внутреннего сгорания применяются для передвижных электрических станций.

Синхронные двигатели имеют абсолютно жесткую механическую характеристику, т. е. скорость вращения постоянна. В промышленности и на строительстве эти двигатели применяются для привода компрессорных и насосных установок, а также для привода камнедробилок и экскаваторов.

Электрические машины постоянного тока

По назначению электрические машины постоянного тока делятся на генераторы и двигатели.

Генераторы постоянного тока применяют в тех областях техники, в которых для технологических целей требуется постоянный ток: электролиз, электрическая сварка, а также для питания двигателей постоянного тока.

Двигатели постоянного тока применяют для подъемных устройств, в электрической тяге, для приведения в действие прокатных станков, гребных винтов судов и в других видах регулируемого электропривода.

На строительстве постоянный ток применяют для электропривода мощных экскаваторов, получающих питание от двигателя-генератора, преобразующего энергию переменного тока в энергию постоянного тока, а также для зарядки аккумуляторов и в редких случаях для электрической сварки.

Устройство машины постоянного тока. Основными частями машины постоянного тока (рис. 2.6) являются: неподвижная часть — статор, вращающийся ротор-якорь и два подшипниковых щита. *Статор* состоит из станины, сердечников полюсов электромагнитов, выполненных из тонких листов стали, изолированных друг от друга лаковой пленкой или тонкими листами бумаги. На сердечники надеты катушки из изолированной медной проволоки, являющиеся обмоткой возбуждения машины.

Ротор машины, называемый в машинах постоянного тока якорем, представляет собой цилиндрическое тело, собранное из тонких листов стали, так же как сердечники электромагнитов. В якоре машины устраивают пазы для размещения обмотки, концы которой прикрепляют к пластинам коллектора, изолированным друг от друга и вала якоря непроводящим материалом — миканитом.

На внешнюю поверхность коллектора накладывают щетки, которые при помощи траверсы прикреплены к неподвижной части машины.

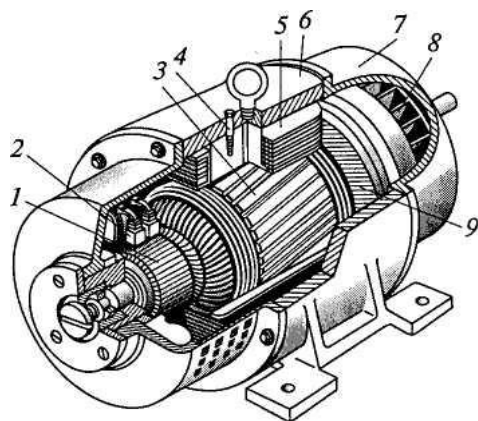


Рис. 2.6.

Устройство машины
постоянного тока:

- 1 — коллектор; 2 — щетки;
3 — сердечник якоря; 4 —

При вращении якоря вращается также и коллектор, а щетки скользят по его поверхности, оставаясь неподвижными. Вал якоря вращается в подшипниках, закрепленных в подшипниковых щитах.

Рассматривая упрощенную схему (рис. 2.7), на которой между двумя магнитами расположен один вращающийся виток обмотки якоря, можно понять назначение и принцип действия коллектора. Концы обмотки якоря соединены с двумя пластинами коллектора, по

Рис. 2.7. упрощенная схема

которому скользят две щетки. При вращении якоря в его проводниках будет наводиться синусоидальная переменная электродвижущая сила.

При наличии коллектора с верхней щеткой все время оказывается соединенным проводник, движущийся под северным полюсом, а с нижней — проводник, движущийся под южным полюсом электромагнита. В результате этого между щетками будет действовать ЭДС, изменяющаяся во времени (рис. 2.8). Все точки кривой расположены выше нулевой линии (напряжение все время будет сохранять один знак). Таким образом коллектор выпрямляет переменное напряжение.

Но ЭДС (см. рис. 2.8) еще не является напряжением постоянного тока, так как его величина два раза за один оборот якоря претерпевает изменения от нулевого значения до максимального.

Если намотать на якорь обмотку, состоящую не из одного, а из двух витков, и расположить их на якоре перпендикулярно один другому, то ЭДС, которые наводятся в них при вращении якоря, будут отличаться друг от друга по фазе. В тот момент, когда в одном витке ЭДС будет равна нулю, в другом она будет иметь максимальное значение.

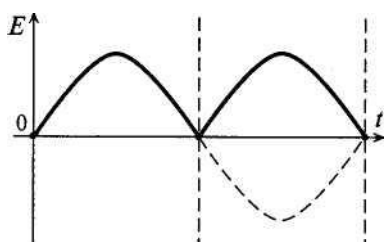


Рис. 2.8. Выпрямление коллектором переменной ЭДС при двух катушках на якоре генератора

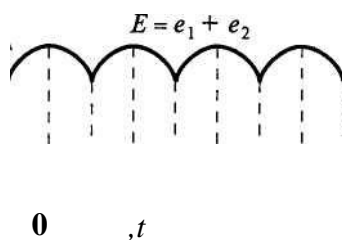


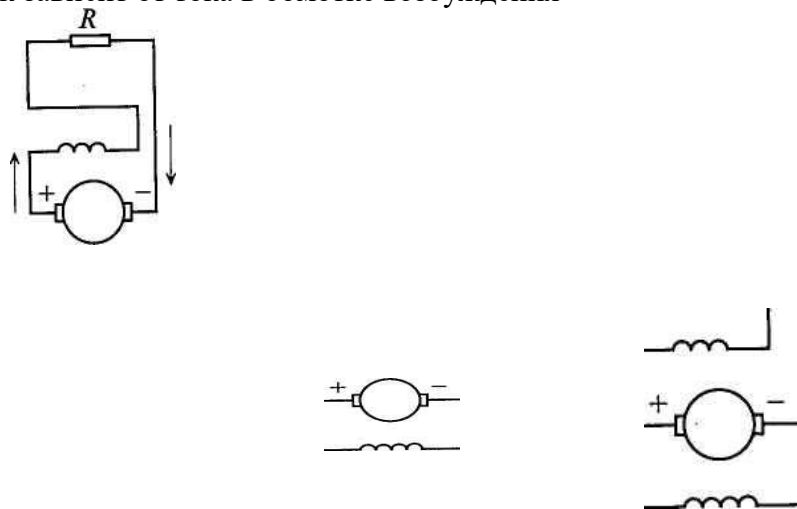
Рис. 2.9. Выпрямление коллектором переменной ЭДС при двух катушках на якоре генератора

Классификация машин постоянного тока по способу возбуждения

Рабочие свойства машин постоянного тока зависят в значительной мере от способа соединения обмотки возбуждения с якорем машины. По способу питания обмотки возбуждения машины постоянного тока подразделяются: на машины с параллельным возбуждением (шунтовые), машины с последовательным возбуждением (сериесные) и машины со смешанным возбуждением (компаундные) (рис. 2.10). Машины с параллельным и смешанным возбуждением применяют в качестве как генераторов, так и двигателей, с последовательным возбуждением — только в качестве двигателей.

В машинах с параллельным возбуждением обмотка возбуждения присоединяется параллельно обмотке якоря (рис. 2.10, а), в машинах с последовательным возбуждением — последовательно с обмоткой якоря (рис. 2.10, б). В машинах со смешанным возбуждением обмотка возбуждения имеет две части: одну, соединенную параллельно, а другую — последовательно с обмоткой якоря (рис. 2.10, в). Обмотки возбуждения, присоединяемые параллельно, выполняют из проводов небольшого сечения; обмотки же, присоединяемые последовательно, рассчитываемые на прохождение через них полного тока генератора, выполняют из проводов большого сечения.

ЭДС, которую развивает любой генератор постоянного тока, прямо пропорциональна числу его оборотов и величине магнитного потока, создаваемого полюсами. Магнитный же поток зависит от тока в обмотке возбуждения



Электродвигатели постоянного тока

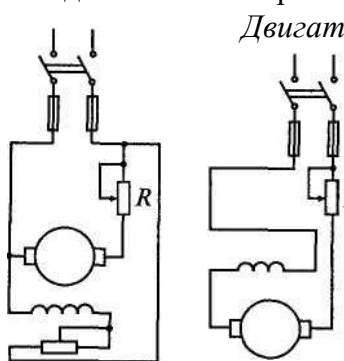
Величина вращающегося момента двигателя постоянного тока (M) выражается следующим соотношением:

$$M = k\Phi I_{я} \quad (2.8)$$

где k — постоянная двигателя, зависящая от его конструкции; Φ — магнитный поток, Вб; $I_{я}$ — сила тока якоря, А. Скорость двигателя подчиняется уравнению

$$U = \mathcal{E} + I_{я} R_{я} \quad (2.9)$$

где $R_{я}$ — сопротивление обмотки якоря, Ом.



Двигатель параллельного возбуждения, схема включения которого приведена на рис. 2.11, а, присоединяется к сети так, чтобы обмотка возбуждения всегда находилась под полным напряжением сети. Поэтому магнитный поток двигателя остается постоянным, не зависящим от нагрузки, а сила тока в обмотке якоря возрастает пропорционально нагрузке. Из формулы (2.8) видно, что вращающий момент двигателя также возрастает пропорционально нагрузке. Скорость вращения уменьшается по формуле (2.9) незначительно.

я

б

Регулирование скорости вращения, как показывает формула (2.9), достигается изменением напряжения, подводимого к двигателю; введением сопротивления в цепь якоря или изменением магнитного потока. Введение сопротивления в цепь якоря вызывает уменьшение скорости двигателя; регулирование скорости происходит при постоянном моменте. Этот способ применяется для подъемников, лебедок, поршневых компрессоров, насосов и т. д. Однако он связан со значительными потерями, обусловленными нагревом добавочного сопротивления, через которое протекает весь ток якоря. Наибольшее распространение имеет регулирование частоты вращения двигателя изменением магнитного потока. Это достигается реостатом, включенным в обмотку возбуждения. При уменьшении силы тока возбуждения уменьшается магнитный поток, а следовательно, увеличивается частота вращения двигателя. В этом случае регулирование происходит при постоянной мощности. Включение реостата в цепь

обмотки возбуждения не вызывает значительных потерь энергии благодаря небольшому значению силы тока возбуждения. В двигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения имеет большое сопротивление и, следовательно, сила тока в этой обмотке и в реостате невелика.

Электродвигатель с последовательным возбуждением включают в сеть по схеме, изображенной на рис. 2.11, б. Своими характеристиками двигателя последовательного возбуждения значительно отличаются от двигателей параллельного возбуждения. Вследствие того, что через обмотку возбуждения двигателя, последовательно соединенную с обмоткой якоря, проходит весь его ток, одновременно с увеличением нагрузки двигателя резко возрастает величина магнитного потока его полюсов. Также резко падает число его оборотов, которое, как уже отмечалось, изменяется обратно пропорционально магнитному потоку. В связи с этим такие двигатели, во-первых, развивают большой вращающийся момент при малых оборотах (в частности, при пуске в ход) и, во-вторых, обладают большой перегрузочной способностью. Вместе с тем, с уменьшением нагрузки на валу частота вращения двигателя быстро возрастает и при малых нагрузках (меньше 1/4 нормальной) он приобретает скорость, опасную для его целостности. Вхолостую, т. е. без нагрузки, серийные электродвигатели вообще нельзя пускать — они идут, как принято говорить, на «разнос». Это является отрицательным свойством серийного электродвигателя.

По своим характеристикам эти электродвигатели больше всего подходят для привода подъемно-транспортных устройств. Их широко применяют в электрической тяге (трамваи, троллейбусы, электрические железные дороги).

Измерения в электротехнике

Измерение

Познавательный процесс, заключающийся в экспериментальном сравнении измеряемой величины с некоторым ее значением принятым за единицу.

Средство измерения (СИ)

Техническое средство используемое для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики (мера, измерительный прибор, измерительный преобразователь, электроизмерительная установка, электроизмерительная информационная система).

Мера

Средство измерения воспроизводящее физическую величину заданного значения.

Измерительный прибор

Средство измерения предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме доступной для визуального восприятия наблюдателем.

Измерительный преобразователь

Средство измерения предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для дальнейшей обработки, преобразования, хранения и передачи.

Электроизмерительная установка

Совокупность средств измерения предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме доступной для визуального восприятия наблюдателем.

Электроизмерительная информационная система

Совокупность средств измерения предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для дальнейшей обработки, преобразования, хранения и передачи.

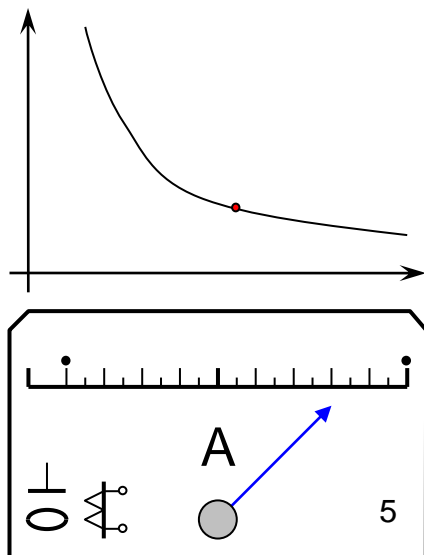
Погрешности средств измерений

Погрешность средства измерения

Разница между фиксируемым средством измерения значением физической величины и её истинной величиной.

Классификация погрешностей

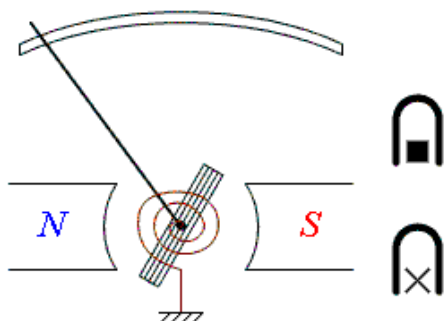
Δ — Абсолютные	γ — Приведенные	δ — Относительные
Систематические	\leftrightarrow	Случайные
Аддитивные	\leftrightarrow	Мультипликативные
Статические	\leftrightarrow	Динамические
Основные	\leftrightarrow	Дополнительные



Погрешность любого измерения может быть представлена в абсолютной, приведенной и относительной формах:

$$\Delta = \pm (\Delta \cdot 100\%) / A_{\text{норм}}, \quad \gamma = \pm (\Delta \cdot 100\%) / A_{\text{изм}}, \quad \delta = \pm (\Delta \cdot 100\%) / A_{\text{изм}}, \quad [\%, \text{ ряд: } 0,5\%; 1\%; 1,5\%; \dots]$$

где: A — истинное значение величины; $A_{\text{норм}}$ — значение физической величины соответствующе полной шкале СИ; $A_{\text{изм}}$ — оценка истинного значения величины, полученная с помощью СИ.



Электроизмерительные приборы Магнитоэлектрический измерительный механизм

Приборы с магнитоэлектрическим измерительным механизмом обладают наибольшей

$$\alpha = k \cdot I_{\text{ср}} = k \frac{1}{T} \int i(t) dt$$

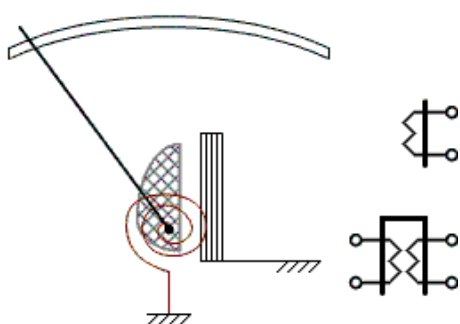
чувствительностью и реагируют на **среднее значение** измеряемой величины:

Логометр — это прибор, в котором противодействующий момент создается не механическим способом (спиральной пружинкой), а с помощью второй рамки закрепленной под углом к первой, в которой протекает постоянный ток. Показания магнитоэлектрических логометров пропорциональны отношению средних значений токов:

$$\alpha_{\text{л}} = k \cdot \frac{I_{\text{ср1}}}{I_{\text{ср2}}}$$

Электромагнитный измерительный механизм

Приборы с электромагнитным измерительным механизмом наиболее распространены, измеряют постоянные и переменные по знаку величины и реагируют на **квадрат действующего значения** измеряемой величины (оно же — среднеквадратическое):



Квадратичная шкала не удобна. Подбором формы

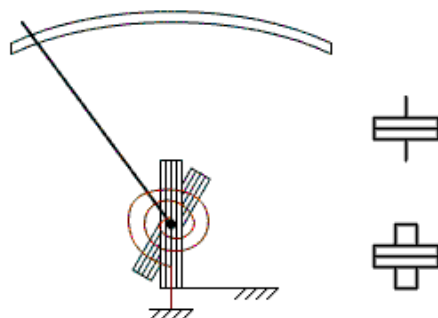
$$\alpha = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int i^2(t) dt \approx k_2 \cdot I$$

ферромагнитной пластины, удастся линейризовать шкалу на большей ее части (кроме начальной — слишком мал вращающий момент).

Показания электромагнитных логометров (с учетом линейризации шкалы) пропорциональны отношению действующих значений токов:

$$\alpha_{\text{л}} = k \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{I_1^2}{I_2^2} \approx k_2 \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

Электродинамический измерительный механизм



Приборы с электродинамическим измерительным механизмом применяются для измерения активной мощности в цепях переменного тока и реагируют на произведение **действующих значений** двух измеряемых величин и косинус угла сдвига фаз между ними:

$$\alpha = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$$

Показания электродинамических логометров пропорциональны отношению фиксируемой в цепи активной мощности к квадрату действующего значения опорного тока:

$$\alpha_{\text{л}} = k \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi}{I_{\text{оп}}^2} = k_2 \cdot \frac{P}{I_{\text{оп}}^2} = k_3 \cdot P$$

Электродинамические измерительные механизмы обладают максимальной разрешающей способностью в классе электромеханических преобразователей, поскольку не содержат ферромагнитных деталей, технология изготовления которых не может гарантировать отсутствие неоднородностей и характеризуется плохой повторяемостью в серии.

Шкала стрелочного измерительного прибора

Главные атрибуты любого шкального СИ показаны на рис. выше по тексту. К ним относятся:

- А — обозначение типа прибора (Амперметр).
- 5 — обозначение класса точности ($\gamma = 5 \%$).
- Знак катушки с сердечником — обозначение типа измерительного механизма (электромагнитный).
- Знак волны — обозначение рода измеряемого тока (прибор предназначен для измерения переменного тока).
- Знак перпендикуляра — обозначение одного из условий эксплуатации (механический баланс подвижных деталей прибора рассчитан на вертикальное положение).
- Точка вблизи начала шкалы — обозначение запретной, для измерений, области в начале шкалы.