



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
**ТАШКЕНТСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-
ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ**

Кафедра «Электромеханики и автоматики»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

ПО КУРСУ

«Электротехника и основы электроники»

**для студентов обучающихся по направлению бакалавриата
«ТВИТ», «ЕУТТ», «АММ», «Сервис», «БИК», «ТВИТКУ», «ЕУТТКУ»
(часть 1)**

ТАШКЕНТ – 2010

Конспект лекций по курсу «Электротехника и основы электроники» (часть 1) для студентов обучающихся по направлению бакалавриата «ТВИТ», «ЕУТТ», «АММ», «Сервис», «БИК», «ТВИТКУ», «ЕУТТКУ» рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Электромеханики и автоматике» (Протокол № 20__ от __18__мая__2010г.)

Зав.кафедрой Эм и А

Ахмедов А.П.

Конспект лекций обсужден и рассмотрен на заседании Научно-методического совета АТФ от 9 июня 2010 г. (Протокол заседания №)

Председатель НМС АТФ

доц. Зикриллаев Х.Ф.

Составители: доц. А.Ахмедов
асс. И.Эшматов

Рецензент: доц. Р.Мирсоатов

ЛЕКЦИЯ № 1

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Основными элементами электротехнических установок являются источники и приемники (потребители) электрической энергии. С помощью источников осуществляется преобразование того или иного вида энергии в электрическую энергию. Так, генераторы преобразуют в электрическую энергию -механическую, гальванические элементы и аккумуляторы-химическую, термогенераторы- тепловую и т.д. Приемники, наоборот, преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии. Например, электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую, электронагревательные устройства- в тепловую, лампы накаливания- в лучистую и т.д.

Кроме источников и приемников, в состав электротехнических установок входят многие вспомогательные элементы: коммутационные аппараты, служащие для включения и отключения отдельных частей установки, регулировочные сопротивления, электроизмерительные приборы, защитные устройства и др.

Источники, приемники и вспомогательные элементы соединяются между собой с помощью изолированных друг от друга проводов и образуют в совокупности электрическую цепь установки. Различные элементы электрических цепей изображаются на электрических схемах в виде условных обозначений.

Сопротивления различных элементов электрических цепей, в том числе и сопротивления проводов (если последние должны быть приняты во внимание), изображаются в виде сосредоточенных в соответствующем месте схемы сопротивлений.

Электрические цепи бывают весьма разнообразными. Различают электрические цепи неразветвленные и разветвленные, с одним источником и с несколькими источниками, линейные и нелинейные.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ, ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Электрическая цепь представляет собой совокупность следующих основных элементов:

- 1.** Источник электрической энергии;
- 2.** Приёмник электрической энергии;
- 3.** Устройства, с помощью которых электрическая энергия передаётся от источника к приёмнику (рис. 1.1).

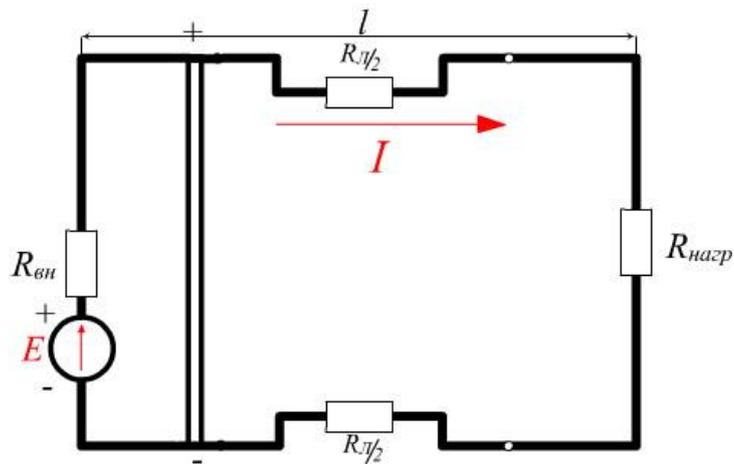


Рис. 1.1

В качестве источника постоянного тока могут быть: генератор постоянного тока, аккумуляторные батареи, гальванические элементы. Источник электрической энергии характеризуется величиной ЭДС (E) и собственным внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$. Генератор вместе с внутренним сопротивлением составляет внутреннюю цепь. Приёмник и токоведущие провода - внешняя цепь. ЭДС создаёт в замкнутой электрической цепи направленное движение электрических зарядов (электрический ток). Величина тока определяется количеством электричества, протекающего через поперечное сечение проводника за единицу времени.

$$I = q/t \quad \text{Кл/с (А)} \quad \text{в цепи постоянного тока.}$$

$$i = dq/dt \quad - \quad \text{в цепи переменного тока.}$$

«+» обозначается точка с более высоким потенциалом,

«-» точка с более низким потенциалом.

Направление тока во внешней цепи от «+» к «-», или от точки «1» к точке «2». ЭДС- величина, создающая определенную разность потенциалов на зажимах источника и вызывающая ток в замкнутой цепи.

Разность потенциалов дает напряжение цепи

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$$

$U = \varphi_1 - \varphi_2 = E$ при холостом ходе, т.е. при отсутствии нагрузки. Направление ЭДС принято от «-» к «+». Сопротивление генератора называется активным, а сопротивление нагрузки и соединительных проводов пассивным.

$$R = \rho l / s = l / \gamma s, \text{ где}$$

ρ - удельное сопротивление, l - длина проводника, s -сечение проводника.

Активным сопротивлением называется такой элемент электрической цепи, в которой происходит безвозвратная потеря энергии.

Величина сопротивления зависит от температуры.

$$r = r_0 [1 + \alpha (t_1 - t_2)]$$

$$r_0 \text{ при } t = +20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

При протекании тока в электрической цепи на отдельных участках цепи происходит падение напряжения, поэтому напряжение на зажимах нагрузки отличается от величины ЭДС источника.

$$U_{\text{нагр}} = E - IR_{\text{вн}} - IR_{\text{л}}$$

$U_{\text{нагр}}$ - напряжение на зажимах нагрузки,

E - ЭДС генератора

$IR_{\text{вн}} = U_{\text{г}}$ - падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника;

$IR_{\text{л}} = U_{\text{л}}$ - падение напряжения в линейных проводах.

1.3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

К основным законам электрической цепи относятся:

I. Закон Ома

II. Законы Кирхгофа.

III. Закон Джоуля-Ленца.

I. Закон Ома

Рассмотрим несколько вариантов написания закона Ома для различных участков электрической цепи и для замкнутой электрической цепи.

а) закон Ома для пассивного участка цепи:

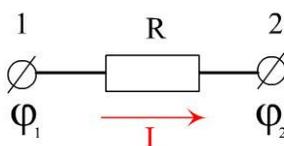


Рис. 1.2

Определим падение напряжения на данном участке цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$U_{12} = IR$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR,$$

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2) / R \quad (1.1)$$

Ток, протекающий по пассивному участку цепи прямо пропорционален разности потенциалов и обратно пропорционален сопротивлению цепи.

б) закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

Определим потенциал точки 3 (φ_3) относительно точек 1 и 2.

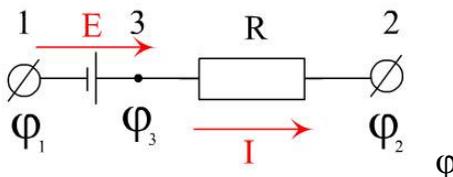


Рис.1.3

$$\varphi_3 = \varphi_1 + E$$

$$\begin{aligned}\varphi_3 &= \varphi_2 + IR \\ \varphi_1 + E &= \varphi_2 + IR \\ \varphi_1 - \varphi_2 + E &= IR\end{aligned}$$

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + E) / R \quad (1.2)$$

Ток, протекающий по участку цепи, содержащему ЭДС, прямо пропорционален разности потенциалов и ЭДС и обратно пропорционален сопротивлению данного участка цепи.

в) Закон Ома для замкнутой электрической цепи.

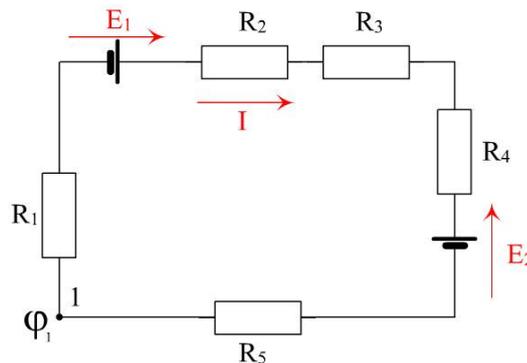


Рис. 1.4

Ищем потенциал точки 1 относительно этой же точки, предварительно задав направление тока (рис.1.4).

$$\varphi_1 - IR_1 + E_1 - IR_2 - IR_3 - E_2 - IR_4 + E_3 - IR_5 - E_4 - IR_6 = \varphi_1$$

$$E_1 - E_2 + E_3 - E_4 = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)$$

$$E_1 - E_2 + E_3 - E_4 = \sum E$$

$$R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = \sum R, \text{ отсюда}$$

$$I = \sum E / \sum R \quad (1.3)$$

II. Законы Кирхгофа.

1) 1^{ый} закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма токов входящих в узел равна алгебраической сумме токов, выходящих из узла; или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.

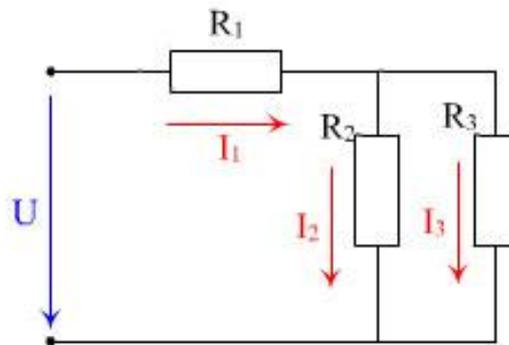


Рис. 1.5

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_2 + I_3 \\
 I_1 - I_2 - I_3 &= 0 \\
 \Sigma I &= 0 \quad (1.4)
 \end{aligned}$$

Ни в одной узловой точке электрической цепи не имеет место накопления электрических зарядов. Токи, входящие в узел - положительные токи, выходящие из узла - отрицательные.

2) 2^{ой} закон Кирхгофа.

Алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных участках этого контура.

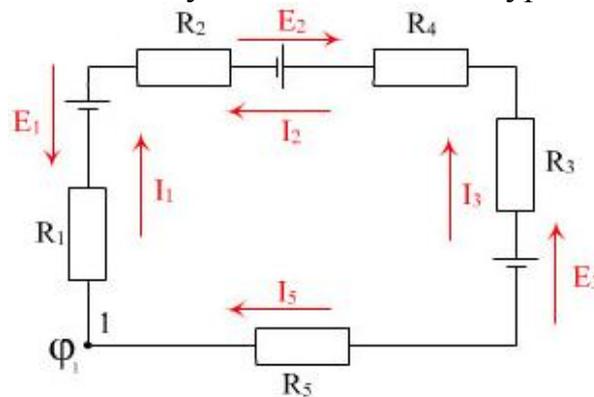


Рис. 1.6

Контур выделен из сложной электрической цепи. Зададимся направлением обхода контура по часовой стрелке (рис.1.6). Определим потенциал точки ϕ_1 относительно этой же точки.

$$\begin{aligned}
 \phi_1 - I_1 R_1 - E_1 + I_2 R_2 + E_2 + I_2 R_3 + I_3 R_4 - E_3 - I_4 R_5 &= \phi_1 \\
 - E + E - E = \Sigma E = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_3 - I_3 R_4 + I_4 R_5 &= \Sigma IR \\
 \Sigma E = \Sigma IR \quad (1.5)
 \end{aligned}$$

III. Закон Джоуля-Ленца. Баланс мощности.

При прохождении тока по участку цепи с сопротивлением R происходит превращение электрической энергии в тепловую. Количество тепла, выделяемое при этом, прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению и времени, в течении которого этот ток проходит по участку цепи.

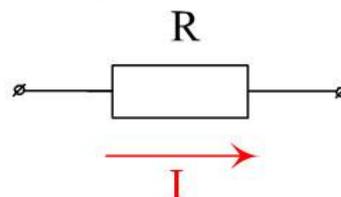


Рис. 1.7

$$\begin{aligned}
 Q &= 0,24 I^2 R t \text{ (кал)} \\
 Q &= I^2 R t \text{ (Дж)}.
 \end{aligned}$$

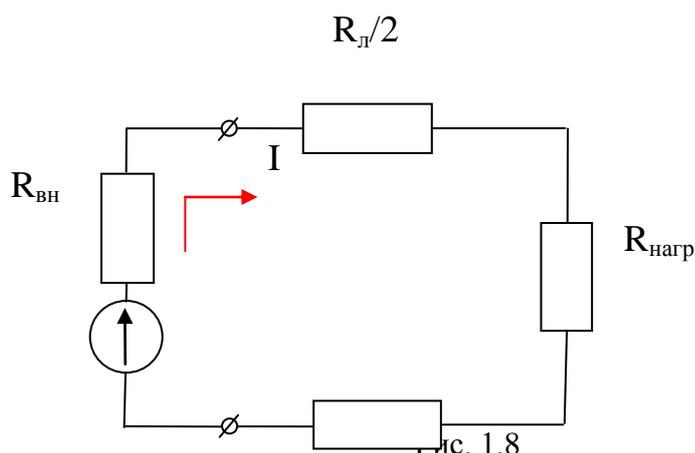
$$W = I^2 R t \quad (1.6)$$

Электрическая мощность - это количество электрической энергии, превращаемой в тепло за 1 сек.

$$P = W/t \quad P = I^2 R \quad I = U/R$$

$$P = U^2/R \quad P = UI - \text{основное выражение.}$$

Составим баланс мощности:



Запишем выражение для данного контура по 2-му закону Кирхгофа.

$$E = IR_{\text{вн}} + IR_{\text{л}} + IR_{\text{нагр.}}$$

Левую и правую части этого выражения умножим на I:

$$EI = I^2 R_{\text{вн}} + I^2 R_{\text{л}} + I^2 R_{\text{нагр.}}, \text{ где}$$

EI - полная мощность данной цепи.

$I^2 R_{\text{вн}}$ - потери мощности в генераторе.

$$I^2 R_{\text{вн}} = \Delta P_{\text{генерат.}}$$

$I^2 R_{\text{л}}$ - потери мощности в линии.

$$I^2 R_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л.}}$$

$I^2 R_{\text{нагр}} = P_{\text{наг}}$ - мощность потребляемая нагрузкой.

$$P = \Delta P_{\text{генерат}} + \Delta P_{\text{л}} + P_{\text{наг}}$$

ЛЕКЦИЯ №2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

2.1. Основные характеристики магнитного поля.

Магнитная индукция

Магнитная индукция - это физическая величина, характеризующая магнитное поле в какой - либо его точке по интенсивности и направлению.

$$F = B \cdot I \cdot l,$$

откуда магнитная индукция

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Таким образом, магнитная индукция численно равна электромагнитной силе, действующей на провод длиной 1 м, расположенный перпендикулярно направлению поля, при токе в нем 1 А.

Единицей магнитной индукции служит тесла (Т).

$$[B] = \left[\frac{F}{I \cdot l} \right] = \frac{N}{A \cdot m} = \frac{J / m}{A \cdot m} = \frac{V \cdot A \cdot s}{A \cdot m^2} = \frac{V \cdot s}{m^2} = \frac{Wb}{m^2} = T.$$

Магнитная индукция является векторной величиной, направление вектора магнитной индукции совпадает с касательной к силовой линии в данной точке поля.

2.2 Магнитный поток.

Важной для расчетов магнитных цепей величиной является магнитный поток Φ или также поток вектора магнитной индукции.

Произведение магнитной индукции B , однородного поля и величины площади S , перпендикулярной вектору этой индукции, называется магнитным потоком.

$$\Phi = B \cdot S$$

$$\Phi = B \cdot S.$$

Так как величина магнитной индукции оценивается плотностью магнитных линий, то оценка магнитного потока, пронизывающего площадь S , производится числом магнитных линий, проходящих через указанную площадь, т. е. магнитный поток – это общее число магнитных силовых линий, приходящихся на данную поверхность.

$$[\Phi] = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2 = \frac{\text{Wb} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^2} = \text{Wb}.$$

2.3 Напряженность магнитного поля и магнитная проницаемость

Величина, характеризующая магнитные свойства среды, т. е. способность среды намагничиваться, называется магнитной проницаемостью.

Абсолютная магнитная проницаемость вакууме – величина постоянная.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}.$$

Абсолютную магнитную проницаемость любой среды μ_A удобно выражать через магнитную проницаемость μ_0 и магнитную проницаемость μ , которая показывает во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость среды больше или меньше, или магнитная постоянная т.е.

$$\mu = \mu_A / \mu_0, \text{ тогда } \mu_A = \mu_0 \cdot \mu,$$

где μ - относительная магнитная проницаемость.

В зависимости от магнитной проницаемости μ все вещества делятся на:

1. диамагнитные $\mu < 1$
2. парамагнитные $\mu > 1$
3. ферромагнитные $\mu \gg 1$

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

Напряженность связана с магнитной индукцией соотношением:

$$B = \mu_A \cdot H.$$

Единицы напряженности магнитного поля – ампер на метр. $[H] = 1 \text{ A/m}$.

Напряженность магнитного поля – величина векторная. Вектор напряженности в каждой точке поля направлен так же, как и вектор индукции.

2.4 Закон полного тока

Если магнитное поле создано несколькими проводниками с током, то напряженность в каждой точке этого поля определяется геометрической суммой напряженностей, созданных в этой точке каждым током.

Если какую-либо площадь, пронизываемую несколькими токами, ограничить замкнутым контуром (рис. 2.7), то сумма произведений элементов длины этого контура dl и продольных составляющих векторов напряженности H_i в каждой точке этого контура, взятая по всему контуру, называется магнитным напряжением U_M или намагничивающей силой F т.е.

$$U_M = \oint H_i \cdot dl = F.$$

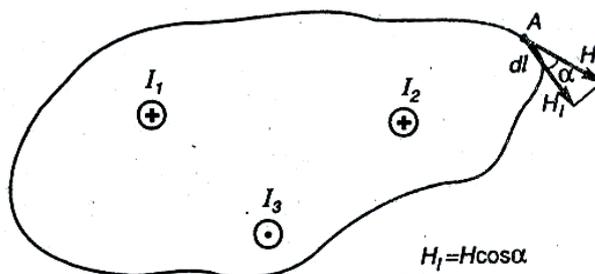


Рис. 2.7

Алгебраическая сумма токов, пронизывающих площадь, ограниченную замкнутым контуром, называется полным током сквозь эту площадь.

Намагничивающая сила вдоль замкнутого контура F равна полному току, который проходит сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

В этом и заключается закон полного тока, математическое выражение которого можно представить в виде:

$$\oint H_i \cdot dl = \sum I$$

2.5 Свойство ферромагнитных материалов

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью называются ферромагнитными. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы. Оказавшись во внешнем магнитном поле, эти материалы значительно усиливают его.

Магнитное состояние ферромагнитного поля характеризуется кривой намагничивания ферромагнитного сердечника, помещенного в катушку с током.

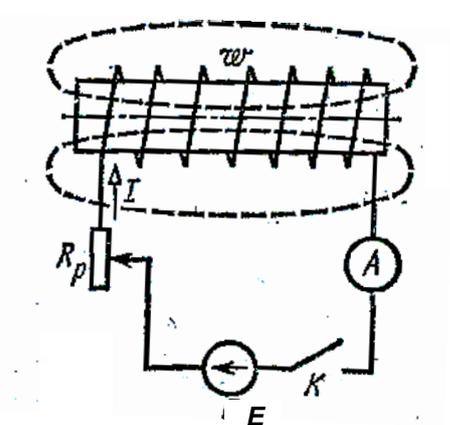


Рис. 2.7

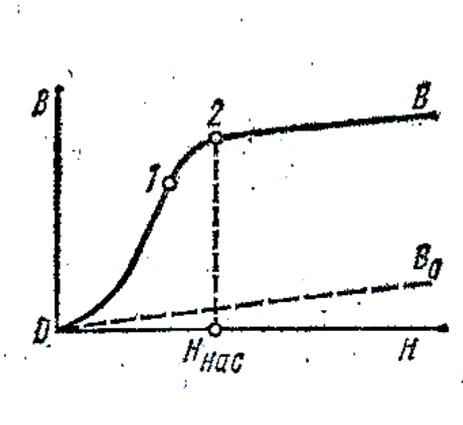


Рис. 2.8

Предположим сначала, что сердечник отсутствует. Тогда при увеличении тока в катушке магнитная индукция будет меняться по линейному закону т.к. в этом случае

$$B_0 = \mu_0 \cdot H.$$

Теперь будем полагать, что катушка имеет сердечник. По мере увеличения тока в катушке магнитная индукция в сердечнике быстро возрастет (участок 0-1 кривой намагничивания рис 2.8). Это объясняется ориентацией векторов намагниченности ферромагнитного сердечника. Затем интенсивность ориентации замедляется (участок 1-2 кривой намагничивания). Точка 2 соответствует магнитному насыщению, т.е. при некотором значении $H_{нас}$ все домены сориентированы и при дальнейшем увеличении тока в катушке индукция поля растет так же, как она росла бы при отсутствии сердечника.

2.6 Циклическое перемангничивание

Если через катушку пропускать ток, меняющий свое направление, то сердечник будет перемагничиваться. Рассмотрим этот процесс (рис. 2.9).

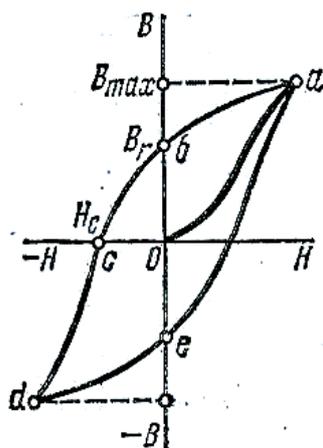


Рис. 2.9

При увеличении тока в катушке магнитная индукция увеличивается до индукции насыщения (точка *a*). При уменьшении тока магнитная индукция уменьшается, но так, что при тех же значениях *H* она оказывается больше.

Таким образом, при $H = 0$ в сердечнике сохраняется магнитное поле, характеризующееся остаточной индукцией B_r (точка *b*).

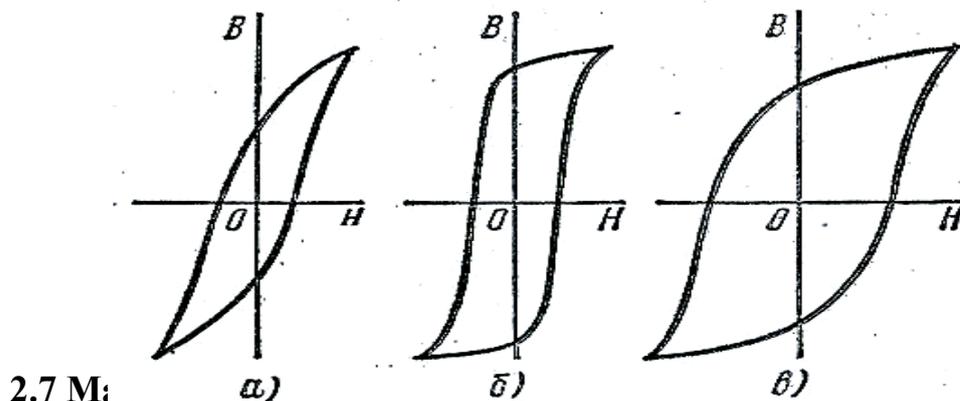
При напряженности поля H_c (точка *c*), которая называется коэрцитивной силой, результирующая магнитная индукция скажется равной нулю.

Дальнейшее увеличение тока в катушке вызовет перемагничивание сердечника, т.е. поворот векторов намагниченности на 180° .

При некотором значении H (точка *d*) сердечник снова будет насыщаться.

При уменьшении тока в катушке до нуля индукция будет уменьшаться до остаточной индукции (точка *c*). Увеличение тока в положительном направлении вызовет намагничивание сердечника до исходного состояния (точка *a*). Полученную кривую называют петлей гистерезиса (запаздывания).

Участок $0-a$ характеристики намагничивания называют основной кривой намагничивания. Энергия, которая затрачивается на один цикл перемагничивания, пропорциональна площади, ограниченной петлей гистерезиса (на рис. 2.10 а-в приведены петли гистерезиса для различных материалов).



2.7 М:

Часть электротехнического устройства, отдельные участки которого выполнены из ферромагнитных материалов, по которым замыкается магнитный поток, называется магнитной цепью.

Примером простой магнитной цепи может служить сердечник кольцевой катушки.

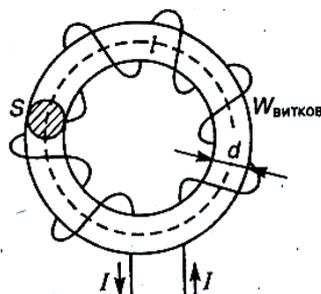


Рис. 2.11

Магнитные цепи трансформаторов, электрических и других аппаратов и приборов имеют более сложную форму.

Магнитная цепь, которая выполнена из одного материала и по всей длине имеет одинаковое сечение, называется однородной.

Неоднородная магнитная цепь состоит из нескольких однородных участков, отличающихся длиной, сечением и материалом. Наиболее часто встречаются магнитные цепи, в которых кроме ферромагнитных участков имеются воздушные зазоры.

Неоднородная цепь, изображенная на рис. 2.12-а имеет три участка, одним из которых является воздушный зазор.

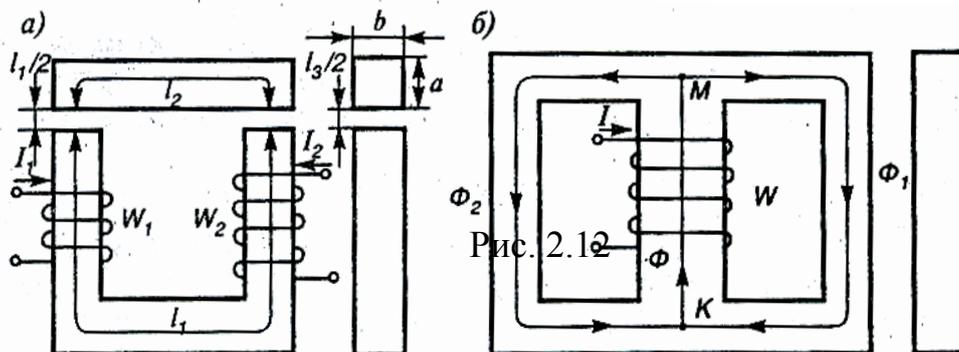


Рис. 2.12

Магнитные цепи, как и электрические, бывают неразветвленными и разветвленными. Пример разветвленной магнитной цепи показан на рис. 2.12-б.

Задача расчета магнитной цепи сводится к определению намагничивающей силы (н.с.) катушки или системы катушек, необходимой для создания заданного магнитного потока.

Часто встречается и обратная задача, когда по заданной намагничивающей силе необходимо определить магнитные потоки.

Расчет магнитной цепи производится с помощью законов магнитных цепей.

2.8 Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи

За счет тока протекающего через катушку (рис. 2.13) возникает магнитное поле и в левом стержне создается магнитный поток Φ . Этот поток в точке A сердечника разветвляется на потоки Φ_1 и Φ_2 . Так как силовые линии магнитного поля непрерывны и замкнуты, то должно выполняться соотношение:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{или} \quad \Phi - \Phi_1 - \Phi_2 = 0.$$

Следовательно алгебраическая сумма магнитных, потоков для любого узла магнитной цепи равна нулю.

Это определение выражает первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.

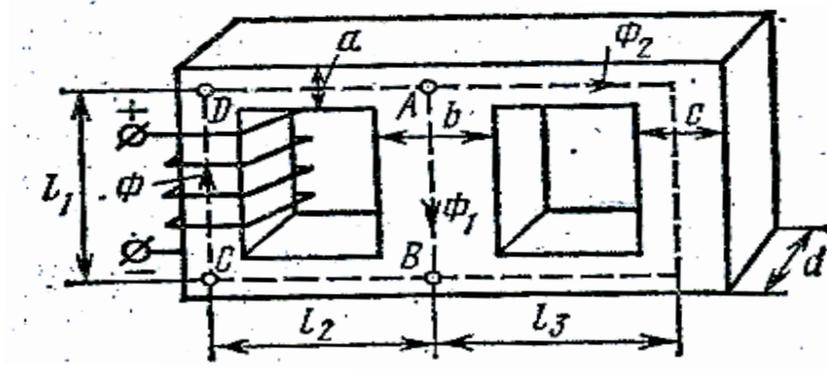


Рис. 2.13

2.9 Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи

Применим закон полного тока к контуру ABCD (рис.2.13). Полный ток, проходящий через поверхность, ограниченную этим контуром, $\sum I = I \cdot w$. Намагничивающая сила вдоль этого контура:

$$F = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1,$$

где H - напряженность магнитного поля на участке BCDA.

H_1 - напряженность магнитного поля на участке AB.

На основании закона полного тока получаем:

$$I \cdot w = H(l_1 + 2l_2) + H_1 l_1.$$

Таким образом, алгебраическая сумма н.с. для любого замкнутого контура магнитной цепи равна алгебраической сумме магнитных напряжений на отдельных его участках.

Это определение является вторым законом Кирхгофа для магнитной цепи.

2.10 Закон Ома для магнитной цепи

Магнитное напряжение на данном участке цепи $U_M = H \cdot l$.

Если учесть, что

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu}, \quad B = \frac{\Phi}{S},$$

то
$$U_M = \frac{\Phi \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu \cdot S}, \quad \Phi = \frac{U_M}{l / \mu_0 \cdot \mu \cdot S}.$$

Введем обозначение $l / \mu_0 \cdot \mu \cdot S = R_M$, где R_M - магнитное сопротивление участка цепи. Тогда получим окончательное выражение закона Ома для участка магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}.$$

Магнитный поток для участка цепи прямо пропорционален магнитному напряжению на этом участке и обратно пропорционален его магнитному сопротивлению.

2.11 Закон электромагнитной индукции

Суть закона электромагнитной индукции в следующем: всякое изменение магнитного поля, в котором помещен проводник произвольной формы, вызывает в последнем появление ЭДС электромагнитной индукции.

В проводнике, пересекающем магнитное поле, индуцируется ЭДС электромагнитной индукции, явление поведения ЭДС в проводнике, пересекающим магнитное поле, называется электромагнитной индукцией.

Величина индуцированной ЭДС зависит от скорости при его движении в магнитном поле, прямо пропорционально индукции магнитного поля, длине проводника и скорости его перемещения.

$$E = B \cdot l \cdot v,$$

где: E – индуцированная эдс;

B – магнитная индукция;

l - длина проводника;

v - скорость движения проводника.

Для определения направления индуцированной ЭДС применяется правило правой руки.

Если ладонь правой руки расположить так, чтобы в нее входили магнитные силовые линии поля, а отогнутый большой палец указывал направление движения

проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление действия индуцированной ЭДС и направление тока в проводнике.

Вторая формулировка закона электромагнитной индукции - ЭДС электромагнитной индукции, наведенная в контуре, равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Направление наведенной ЭДС всегда таково, что вызванный ею ток противодействует причине появления ЭДС.

Если контур состоит из w последовательно соединенных витков и магнитный поток Φ каждого витка один и тот же, то индуцированная ЭДС:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}.$$

ЛЕКЦИЯ №3

ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Основные понятия и определения в цепях однофазного переменного тока

Постоянный ток в настоящее время применяется реже, чем переменный. Его применение обуславливается либо ходом некоторых физических процессов, либо экономическими соображениями. Так, например, в электролизе, для зарядки аккумуляторов, а также используется для питания током трамваев, троллейбусов, электровозов. В остальных случаях современная техника использует переменный ток. Преимущества переменного тока: 1). Позволяет сравнительно легко преобразовывать напряжение (из низкого в высокое и наоборот); 2). Электрические машины переменного тока просты в устройстве, надежны в работе и имеют относительно низкую стоимость производства; 3). Переменный ток при необходимости всегда можно преобразовать в постоянный ток.

Впервые был применен в 1876 г. Яблочковым для питания изобретенной им электрической свечи. В настоящее время в различных отраслях электротехники находят себе применение переменные токи различных частот:

- в радиотехнике – от 10^5 Гц до нескольких миллиардов Гц.
- в эл. печах – 500 Гц – 50 МГц.
- в телефонии – 100 Гц – несколько тысяч Гц.
- промышленное применение – 50 Гц (в США – 60 Гц)

Для получения токов высокой частоты используются ламповые генераторы. Для получения токов промышленной частоты – машинные генераторы или генераторы переменного тока.

Переменным током называется ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению.

Числовые значения, которые принимает переменный ток в определенные моменты времени называется его мгновенным значением.

Наибольшее из мгновенных значений любой переменной электрической величины называется ее максимальным значением или амплитудой.

Одна из особенностей переменного синусоидального тока заключается в том, что он является периодически изменяющейся величиной. В настоящее время все генераторы рассчитываются на получение синусоидальной кривой Э.Д.С. Это обеспечивает получение во всех звеньях линейной электрической цепи форму кривых напряжений и токов – синусоидальной или гармонической. (простота расчетов и отсутствие гармоник).

Промежуток времени T , в течение которого переменная величина проходит через все свои мгновенные значения или изменения и в дальнейшем начинает их повторять, называется периодом изменения данной величины.

За время одного периода ток дважды меняет свое направление и дважды проходит через максимальное значение (T – секунды).

Величина, обратная периоду, называется частотой тока f , т.е. частота – это количество периодов в секунду.

$$f = \frac{1}{T}; T = \frac{1}{f}.$$

Единицей измерения частоты является Герц (Гц; КГц; МГц).

$$f = 50 \text{ Гц}, T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ сек.}$$

3.2. Получение однофазного переменного синусоидального тока

Для получения переменного синусоидального тока необходимо иметь источник с синусоидально изменяющейся Э.Д.С. Для этого служит генератор. Он состоит из статора и ротора. Во внутренней поверхности статора укреплен обмотка, в которой возникает Э.Д.С. Ротор представляет собой стержневой электромагнит, который удерживается внутри статора.

По числу полюсов ротора генераторы бывают 2^x , 4^x , $6^{\text{ти}}$ и т.д. полюсные. Для создания магнитного поля через роторную обмотку пропускают постоянный ток от постороннего источника. При вращении ротора, вместе с ним вращается его магнитное поле. Это поле пересекает витки статора, наводя в них Э.Д.С. изменяющегося по направлению. Каким же образом возникает синусоидальная Э.Д.С.

$E = Blv$, где l и v – постоянные величины. Придав особую форму ротора, можно обеспечить соответствующее распределение густоты силовых линий в воздушном зазоре. Числовые значения магнитной индукции для любой точки на внутренней поверхности статора определяется $B = B_m \sin \alpha$, где B_m – наибольшая магнитная индукция полюсов; α – угол осевой линии с подвижным радиусом.

В двухполюсном генераторе на протяжении всего воздушного зазора, охватываемого углом 360° магнитная индукция совершает один полный цикл.

Зная закон изменения магнитной индукции, можно определить и Э.Д.С в обмотке статора при разных углах поворота ротора.

$$e = B_m l v \sin \alpha ,$$

если учесть $E_m = B_m l v$, то $e = E_m \sin \alpha$.

За один оборот ротора Э.Д.С совершит полный цикл изменений

Имея генератор синусоидальной Э.Д.С и подключая к его зажимам внешнюю цепь, можно получить синусоидальный ток и синусоидальное напряжение. Если известно полное сопротивление цепи R , то можно определить мгновенное значение тока:

$$i = \frac{E_m}{R} \sin \alpha \quad \text{ИЛИ} \quad I_m = \frac{E_m}{R} \quad i = I_m \sin \alpha , \text{ аналогично}$$

$$U = I_m R \sin \alpha \quad \text{ИЛИ} \quad U = U_m \sin \alpha .$$

Выразим угол поворота ротора через угловую механическую скорость ω и время t , т.е. $\alpha = \omega t$, тогда $e = E_m \sin \omega t$; $i = I_m \sin \omega t$; $U = U_m \sin \omega t$.

В двухполюсном генераторе Э.Д.С совершает один цикл за 360° . Но могут быть многополюсные генераторы, имеющие p – пар полюсов.

Поскольку график одного цикла изменений индукции можно построить только в пределах 360° , то считают, что именно такое количество градусных единиц и должно заключаться в дуге, на протяжении которой магнитная индукция совершает один полный цикл изменений, т.е. в 4-х полюсной машине эту дуга будет 180° , в 6-ти полюсной – 120° и т.д. Получается, что электрический градус в p раз меньше геометрического. $\alpha_{эл}^0 = p \alpha_{геом}^0$.

В 2-х полюсном генераторе $\alpha_{эл} = \alpha_{геом}$.

С физической точки зрения электрический градус учитывает распределение магнитной индукции в воздушном зазоре многополюсного генератора.

Наряду с электрическими градусами в теории переменного тока применяют и электрические радианы.

Электрический радиан – в p раз меньше геометрического радиана $\omega_{эл} = p \omega_{геом}$ (рад/сек).

Угловая скорость вращения якоря называется механической угловой скоростью.

Угловая скорость вращения радиус-вектора называется электрической угловой скоростью или угловой частотой.

Одному обороту ротора соответствует p периодов, а n – оборотов – p периодов, или $f = \frac{np}{60}$ Гц. Или $n = \frac{60 f}{p}$, т.е. для получения определенной частоты переменного тока необходимо, чтобы ротор совершал строго определенное количество оборотов.

Например, для $f=50$ Гц при $p=2$ $n = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ об/мин. Между частотой тока и угловой частотой существует зависимость: $\omega = 2\pi f$ рад/сек.

3.3. Действующие значения переменных величин

В технике переменных токов часто приходится иметь дело с тепловым или механическим действием тока.

О количестве энергии переменного тока в цепи можно судить по тому тепловому эффекту, который ток вызывает при своем протекании по проводнику.

Для учета теплового эффекта в теорию переменного тока введено действующее, или эффективное значение переменного тока.

Под действующим значением переменного тока понимают такое значение эквивалентного ему постоянного тока, который, проходя по тому же, что и переменный ток, проводнику с сопротивлением R , за равное время выделяет в этом проводнике одинаковое количество тепла.

В соответствии с этим, действующее значение переменного тока: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, аналогично: $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$; $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Вольтметры и амперметры, предназначенные для работы в цепях синусоидального тока, градуируются обычно ток, чтобы они показывали непосредственно действующее значение напряжения или тока.

Среднее значение: Для определения среднего значения полупериода:

$$E_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_m \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_m \sin \omega t d\omega t = \frac{E_m}{\pi} \left| -\cos \omega t \right|_0^{\pi} = E \frac{2}{\pi}.$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad \frac{E}{E_{cc}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \frac{\pi}{E_m} \approx 1,11; \quad E = 1,11 E_{cc}.$$

Ток и напряжение в течение одного периода проходит через все свои стадии изменения. Эти отдельные стадии изменения переменной величины называется ее фазами. Каждой фазе соответствует определенное мгновенное значение тока и напряжения.

Напряжение и ток называется совпадающими по фазе, если они изменяются по одному и тому же закону и одновременно проходят через соответствующие фазы. При отсутствии последнего условия они не совпадают или сдвинуты по фазе.

Угол сдвига фаз обозначается буквой φ . $i = I_m \sin \omega t$; $U = U_m \sin (\omega t + \varphi)$.

3.4. Векторные диаграммы

При различных расчетах часто приходится определять переменный ток, как сумму двух или нескольких переменных токов. Суммируемые токи могут иметь различные амплитуды и должны быть сдвинутыми по фазе. Сложение можно выполнить графически, складывая алгебраически ординаты кривых в различных моментах и соединяя полученные точки.

Тот же результат может быть получен быстрее и легче при помощи векторной диаграммы. Если какая-либо точка движется с постоянной скоростью по окружности,

то проекция ее на любой диаметр совершает синусоидальные колебания. Радиус-вектор этой точки вращается с постоянной угловой скоростью. Если этот радиус-вектор, в известном масштабе изображающий амплитуду тока, занимает в начальный момент ($t=0$) горизонтальное положение вправо от центра вращения и вращается против направления движения часовой стрелки с угловой скоростью ω , то в произвольный момент t , когда он образует горизонтально угол ωt , проекция его на вертикаль в том же масштабе изображает соответствующее мгновенное значение: $i = I_m \sin \omega t$. Если же вектор в начальный момент расположен не горизонтально, а образует горизонтально угол φ , то проекция на вертикаль будет $i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$, т.е. изображает ток опережающий предыдущий на часть периода, равную $\frac{\varphi}{360^\circ}$.

Угол φ считается положительным, когда он получается поворотом вектора «вперед», т.е. по направлению вращения, и отрицательным – в обратном положении.

Алгебраическая сумма мгновенных значений двух синусоидальных величин соответствует геометрической сумме векторов этих величин. Нужно сложить ток $i_1 = I_{m1} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t - 90^\circ)$.

Чтобы получить вектор I_m нужно сложить векторы I_{m1} и I_{m2} по правилу параллелограмма. Ток $i = i_1 + i_2$, т.е. сумме проекций векторов I_{m1} и I_{m2} .

$I_m = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2}$, а $\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{m2}}{I_{m1}}$, откуда определяется тот угол φ , на который суммарный вектор отстает от вектора I_{m1} .

Так как целью построения векторной диаграммы является определение не мгновенных значений в какой-либо момент, а его амплитуды и сдвиг фаз, то изображения круговых путей концов векторов, вертикаль, горизонталь являются необязательным. Векторная диаграмма может состоять только из векторов, один из которых целесообразно располагать вертикально или горизонтально, причем геометрическая сумма векторов может находиться либо как диагональ построенного на них параллелограмма, либо как замыкающая сторона треугольника, получаемого при параллельном переносе одного из суммируемых векторов из центра диаграммы в конец другого вектора.

Правила построения векторных диаграмм:

1. Угол необходимо откладывать от вектора тока к вектору направленному по кратчайшему угловому расстоянию. Угол, откладываемый против часовой стрелки, считается положительным, по часовой стрелке – отрицательным.

2. При геометрическом сложении однофазных величин они должны иметь одинаковую частоту.

3. Изображать векторами можно прямо действующие значения переменных величин, как пропорциональные максимальным.

4. При одновременном изображении линейных и векторных диаграмм векторы принято располагать левее линейных диаграмм. Причем так, чтобы их проекции на ось соответствовали мгновенным значениям переменных величин по линейным диаграммам для $t=0$.

ЛЕКЦИЯ №4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩИЕ АКТИВНОЕ И РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

4.1. Электрическая цепь, содержащая активное сопротивление

Рассмотрим распространение переменного тока по прямолинейному проводнику. Разобьем мысленно этот провод по всей его длине вдоль оси на ряд концентрических цилиндров.

Если по такому проводнику протекает постоянный ток, то плотность тока во всех кольцах будет одинакова, и вокруг каждого из них возникнет постоянное магнитное поле.

Предположим теперь, что по тому же проводнику пропускается переменный ток, очевидно, в этом случае возникающие вокруг концентрических цилиндров магнитные потоки будут также переменными и на основании закона электромагнитной индукции в каждом из них возникнет Э.Д.С индукции, увеличивающаяся по мере приближения проводников к оси провода.

Таким образом, возникающие переменные магнитные потоки в самом проводе наводят э.д.с. противодействующую основному напряжению, причем, чем ближе сечение к оси провода, тем больше это противодействие. в результате ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с постепенно увеличивающейся от оси к поверхности провода.

Такое поверхностное распределение переменного тока называется поверхностным эффектом. Как видим, под влиянием поверхностного эффекта полезное сечение провода как бы уменьшается, а следовательно сопротивление его увеличивается. Ввиду этого, в отличие от сопротивления проводника постоянному току, которое называется омическим сопротивлением, сопротивление проводника переменного току называется активным сопротивлением.

Активное сопротивление увеличивается с увеличением частоты переменного тока.

Если синусоидальное напряжение $U=U_m \sin \omega t$ приложено к зажимам цепи, имеющей сопротивление R , но не образующей сколько-нибудь заметной индуктивностью и емкостью, то по закону Ома мгновенное значение тока $i = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t$, но $\frac{U_m}{R} = I_m$, значит $i = I_m \sin \omega t$.

Таким образом, ток, как и напряжение, изменяется синусоидально, достигая своего положительного максимума I_m при $\sin \omega t = 1$, т.е. одновременно с напряжением. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе.

Так как действующее значение тока и напряжения равны соответственно $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$; $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, то $\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} R}$ или $I = \frac{U}{R}$, т.е. в цепи, не обладающей реактивным сопротивлением, действующее значение тока и напряжения подчиняются закону Ома, как и для цепи постоянного тока.

4.2. Электрическая цепь, содержащая индуктивность

Если цепь, к зажимам которой приложено синусоидальное напряжение, обладает не только активным сопротивлением R , но и индуктивностью L , то происходящий в ней процесс, осложняется, появлением Э.Д.С самоиндукции $e = -L \frac{di}{dt}$, пропорциональной скорости изменения тока, последний создается теперь совместными действиями внешнего напряжения и Э.Д.С самоиндукции.

$$e = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -L \omega I_m \cos \omega t = -L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); u = L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

По закону Ома мгновенное значение тока $i = \frac{U + e}{R}$ или $U = iR - e = iR + L \frac{di}{dt}$.

Пользуясь этим соотношением, найдем закон изменения тока, а затем его действующее значение. Ток в цепи будет изменяться по синусоидальному закону.

Предположим $i = I_m \sin \omega t$, т.е. принимаем за начало отсчета времени момент, когда ток проходит через нуль, тогда

$$e = -L \frac{di}{dt} = L \frac{dI_m \sin \omega t}{dt} = -I_m L \omega \sin(\frac{\pi}{2} - \omega t) = I_m \omega L \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad \text{откуда} \quad U = iR - e = I_m R \sin \omega t -$$

$$I_m \omega L \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Первый член правой части этого уравнения представляет собой синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m R$, совпадающую по фазе с током, а второе слагаемое – синусоидально изменяющуюся величину с амплитудой $I_m \omega L$ опережающую ток на $\frac{1}{4}$ периода (90°).

Первая из этих величин называется активным напряжением (активной составляющей), а вторая индуктивной реактивной составляющей или индуктивным реактивным напряжением.

Сдвиг между второй составляющей и током на 90° можно объяснить так: Пусть ток имеет максимальное значение. В начале убывания тока возникает Э.Д.С самоиндукции противодействующая убыванию тока, т.е. Э.Д.С действует по направлению тока от нуля, достигая своего максимального значения при $i=0$. С возрастанием тока от 0 до амплитудного значения Э.Д.С самоиндукции должна препятствовать нарастанию тока, т.е. действовать навстречу ему, убывая до 0. Наибольшая скорость изменения тока, практически выражается тангенсом угла наклона касательной к кривой i , соответствует точкам пересечения кривой тока с осью t . В эти моменты Э.Д.С самоиндукции достигает максимального значения.

Падение напряжения U_L на индуктивном сопротивлении противоположно Э.Д.С самоиндукции.

Отсюда видно, что напряжение на катушке индуктивности опережает ток на 90° .

Действующие значения активного и реактивного напряжений найдем разделив амплитуды составляющей на $\sqrt{2}$.

$$\frac{I_m R}{\sqrt{2}} = U_a \quad \frac{I_m \omega L}{\sqrt{2}} = U_L \quad \text{или} \quad IR = U_a; \quad I \omega L = U_L.$$

Действующее значение полного напряжения равно геометрической сумме действующих значений слагающих, т.е. $U = U_a + U_L$.

Построим векторную диаграмму.

Из прямоугольного треугольника АОВ легко устанавливается соотношение между величинами U и I .

$$I^2 R^2 + I^2 (\omega L)^2 = U^2$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{Закон Ома}$$

$$\text{Угол } \varphi \text{ получается } \operatorname{tg} \varphi = \frac{I \omega L}{IR} = \frac{\omega L}{R}.$$

Выражение $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ имеющее размерность сопротивления называется полным сопротивлением.

Закон Ома показывает, что действующее значение переменного тока в цепи, обладающей индуктивностью получается меньше, чем постоянный ток в той же цепи, при таком же по величине постоянном напряжении.

Полное сопротивление обозначается буквой Z , а $\omega L = X_L$ - индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте тока. R - активное сопротивление.

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \text{и тогда} \quad I = \frac{U}{Z}.$$

Построим векторную диаграмму для сопротивлений. Если все стороны треугольника АОВ разделить на I , то получим треугольник сопротивлений. Пользуясь этим треугольником можно находить полное сопротивление цепи или сдвиг фаз между напряжением и током графическим путем.

Кроме того, этот же треугольник позволяет установить еще следующие соотношения:

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

Если активное сопротивление цепи мало, то им можно пренебречь в выражении общего сопротивления. Тогда $Z = X_L = \omega L$; $I = \frac{U}{\omega L}$.

В этом случае, т.к. при чистом индуктивном сопротивлении ток отстает от напряжения на 90° , т.к. $\operatorname{tg} \varphi = \infty$, отсюда $\varphi = 90^\circ$.

Выводы:

1. В цепи только с одним индуктивным сопротивлением ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$. Этот ток называется реактивным или безваттным током, т.к. он не расходует в цепи своей мощности.

2. В цепи с R и L ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$.

3. Действующие значения переменных величин не подчиняются законам постоянного тока в обычной их форме.

4. Индуктивное сопротивление X_L учитывает влияние Э.Д.С. самоиндукции на величину действующего значения тока в цепи и находится в прямо пропорциональной зависимости от частоты тока.

Рассмотрим цепь, состоящую из последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений.

В этом случае приложенное к цепи переменное напряжение является геометрической суммой всех активных напряжений, каждое из которых совпадает по фазе с током, и всех реактивных напряжений, каждое из которых опережает ток на 90° . Поэтому, суммарное активное напряжение будет равно арифметической сумме всех активных напряжений.

$U_a = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots = I \sum R$, а суммарное реактивное напряжение – арифметической сумме всех реактивных напряжений.

$$U_p = IX_{L1} + IX_{L2} + IX_{L3} + \dots = I \sum X_L.$$

Таким образом: $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

$$X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \dots, \text{ а } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(\sum R)^2 + (\sum X_L)^2}.$$

В общей форме закон Ома для последовательного соединения нескольких активных и индуктивных сопротивлений будет выглядеть так:

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

4.3. Электрическая цепь, содержащая емкость

Если к зажимам генератора, создающего синусоидальное напряжение, присоединить конденсатор емкостью C , последний будет периодически заряжаться и разряжаться, и следовательно, в соединительных проводах будет иметь место переменный ток. Пусть напряжение генератора $U = U_m \sin \omega t$. Если за бесконечно малый промежуток времени dt напряжение на зажимах конденсатора изменилось на величину dU , если при этом на обкладки конденсатора перешло электричество dq , то $dq = C dU_c$, где dU_c – напряжение на обкладках конденсатора.

Поделив обе части равенства на, получим $\frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}$.

Левая часть представляет собой ток в цепи $i = C \frac{dU_c}{dt}$.

Подставим выражение для U_c : $i = C \frac{dU_m \sin \omega t}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t$ или $i = \omega C U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

Мы видим, что: ток так же изменяется по синусоидальному закону и опережает напряжение на угол 90° .

Амплитуда тока $I_m = U_m \omega C$.

Поделив на обе части равенства, получим действующее значение тока $I = U \omega C$.

Произведение ωC имеет размерность проводимости и называется емкостной проводимостью. Обратная величина $\frac{1}{\omega C}$ называется емкостным сопротивлением α_c .

Мы видим, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока цепи.

Рассмотрим линейные и векторные диаграммы.

Получающийся сдвиг фаз на 90^0 можно объяснить следующим образом:

В течении первой четверти периода от точки 0 до точки 1, напряжение сети, приложенное к конденсатору возрастает от нуля до максимальной величины. В течении этого времени заряды протекают на обкладке конденсатора. Ток, равный скорости изменения заряда на обкладках, в точке 0 получает наибольшее значение, т.к. в этот момент имеет место наибольшее изменение напряжения на обкладках в точке 1 ток становится равным 0, т.к. в этот момент приложенное напряжение, достигнув максимума, перестает возрастать, а следовательно, перестает возрастать заряд на обкладках конденсатора.

В течение четверти периода от точки 1 до точки 2 напряжение сети постепенно падает. Это вызывает отсекание заряда обратно в сеть, т.е. отрицательный ток.

В точке 2 изменение приложенного напряжения наибольшее и скорость отсекаания зарядов (ток) также достигает наибольшего значения. После точки 2 процесс зарядки начнет повторяться в обратном направлении. На участке 2-3 конденсаторы заряжаются, на участке 3-4 разряжаются. При заряде конденсатора Э.Д.С. емкости направлена навстречу тока, а при разряде – совпадает по закону с током.

Если кроме емкости C в цепи имеется активное сопротивление R соединенное с емкостью последовательно, то приложенное к цепи напряжение является суммой двух слагающих, активного напряжения $U_a=IR$ и реактивного напряжения $U_p=I \frac{1}{\omega C}$; первое совпадает с током по фазе, а второе отстает от тока на 90^0 .

В итоге общее напряжение отстает от тока на угол φ .

Из треугольника напряжений можно определить $U_2=U_a^2 + U_p^2 = I^2 R^2 + I^2 \left(\frac{1}{C}\right)^2$,

откуда $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$.

Закон Ома

Величина $\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ называется общим сопротивлением цепи Z , следовательно

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Построим векторный треугольник сопротивлений для чего разделим стороны треугольника АОВ на I .

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_c}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X_c}{Z}.$$

Так как в цепи с емкостью ток опережает напряжение, а в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения, то, следовательно, емкостное сопротивление в цепи переменного тока по своей роли противоположно индуктивному. Если цепь состоит из ряда последовательных емкостных и активных

сопротивлений, то расчеты производятся аналогично расчетам индуктивных и активных сопротивлений.

4.4. Последовательное соединение R, L и C

Наиболее общий случай неразветвленной цепи переменного тока представляет собой цепь, состоящую из последовательного соединения R, L и C.

Приложенное к цепи напряжение составляет из трех слагаемых: активного напряжения $U_a=IR$, совпадающего по фазе с током; индуктивного $-U_L=I\omega L$, опережающего ток на 90° , емкостного $U_C=I\frac{1}{\omega c}$, отстающего от тока на 90° .

Благодаря тому, что U_L и U_C имеет противоположные фазы, их геометрическая сумма равносильна вычитанию соответствующих абсолютных величин, т.е. $U_p=U_L-U_C=I(\omega L-\frac{1}{\omega c})$, т.е. $x=\omega L-\frac{1}{\omega c}$.

Обобщенное реактивное сопротивление позволяет определить характер сопротивления цепи x . Если x получим положительным, то сопротивление носит индуктивный характер, если отрицательным – емкостной, т.е. или ток отстает от напряжения или опережает.

Приложенное к цепи напряжение представляется на векторной диаграмме гипотенузой прямоугольного треугольника: $U=\sqrt{U_a^2+U_p^2}=I\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega c})^2}$, отсюда:

$$I=\frac{U}{\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega c})^2}}, \text{ где } Z=\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega c})^2}.$$

Разделив стороны треугольника напряжений на силу тока, мы получим треугольник сопротивлений. Отсюда: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$; $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$; $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$.

При положительно реактивном сопротивлении угол φ получается положительным, т.е. преобладает индуктивность и приложенное напряжение опережает ток; при отрицательном реактивном сопротивлении угол φ отрицательный, т.е. преобладает емкость и приложенное напряжение отстает от тока. $I=I_m \sin \omega t$; $U=U_m \sin(\omega t+\varphi)$.

4.5. Параллельное соединение R, L и C

Рассмотрим цепь, состоящую из трех параллельных ветвей: активного сопротивления, индукции и емкости.

Напряжения, приложенные к каждой ветви, равны напряжению $U=U_m \sin \omega t$.

Определим ток в каждой ветви:

$$I_2=\frac{U}{R}=gU, \text{ где } g=\frac{1}{R} - \text{ активная проводимость;}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = b_L U, \text{ где } b_L = \frac{1}{\omega L} - \text{индуктивная проводимость};$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = b_C U, \text{ где } b_C = \omega C - \text{емкостная проводимость}.$$

По первому закону Кирхгофа общий ток цепи равен алгебраической сумме токов в ветвях $i = i_a + i_L + i_C$.

Для векторных значений токов нужно взять геометрическую сумму $I = I_R + I_L + I_C$;

$$i = \frac{U}{R} \sin \omega t + \frac{U}{X_L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \frac{U}{X_C} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Произведем сложение векторов (для случая $b_L > b_C$, т.е. $I_L > I_C$) из векторной диаграммы: $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$.

Закон Ома для всей цепи: $I = \frac{U}{Z} = yU$, где $y = \frac{1}{z}$ - кажущаяся проводимость всей цепи.

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_L - b_C}{g} = \frac{b}{g}, \text{ где } b = b_L - b_C - \text{реактивная проводимость цепи}.$$

Из треугольника токов можно определить, что при $b_L > b_C$ угол $\varphi > 90^\circ$, т.е. ток потребляемый из сети отстает от приложенного напряжения; при $b_C > b_L$ угол $\varphi < 0$ и ток опережает приложенное напряжение.

Построим треугольник проводимости. Из этого треугольника можно определить: $\cos \varphi = \frac{g}{y}$ или $g = \frac{\cos \varphi}{z} = y \cos \varphi$;

$$\sin \varphi = \frac{b}{y} \text{ или } b = \frac{\sin \varphi}{z} = y \sin \varphi.$$

Эти выражения универсальны и справедливы для цепей любой сложности.

ЛЕКЦИЯ № 5

РЕЗОНАНСЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ.

МОЩНОСТЬ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Резонанс напряжений

Резонансом вообще называется совпадение частоты вынужденных колебаний, сообщаемых из вне системе или телу, с частотой свободных колебаний – собственных колебаний этой системы или тела.

Цепь, содержащая индуктивность и емкость представляет собой колебательный контур.

Рассмотрим процесс возникновения свободных колебаний в контуре при отсутствии потерь.

Поставим ключ в положение 1. При этом емкость C заряжается от источника, запасая энергию CU^2 . Затем переключим ключ в положение 2. Емкость начинает разряжаться на индуктивность, и в цепи возникает постепенно увеличивающийся ток i . При этом возрастанию тока препятствует Э.Д.С. самоиндукции e , а по мере нарастания тока в магнитном поле индуктивности накапливается энергия $\frac{Li^2}{2}$. Когда

емкость полностью разряжается – энергия ее электрического поля исчерпана, тогда ток в цепи не прекращается, т.к. Э.Д.С. самоиндукции противодействует уменьшению тока. Теперь за счет энергии магнитного поля ток поддерживается в том же направлении, заряжая емкость в обратном направлении. Эта перезарядка продолжается до тех пор, пока напряжение на обкладках конденсатора не достигнет величины U_m , но полярность заряда изменилась. Вся энергия магнитного поля перешла в энергию электрического поля. После этого начинается разряд конденсатора и процесс снова повторится. Так как в рассматриваемом контуре нет потерь, этот процесс будет колебательным незатухающим.

Определим частоту этого процесса: Из закона сохранения энергии можно написать: $\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$. Напряжение на конденсаторе $U_m = I_m \frac{1}{\omega C}$ (процесс синусоидальный).

Следовательно: $\frac{CI_m^2}{2\omega^2 C^2} = \frac{I_m^2}{2}$; $1 = \omega^2 LC$, откуда $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ или $f_{гy} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$;

$$T_{осек} = 2\pi\sqrt{LC}$$

Мы рассмотрели процесс возникновения колебаний в идеальном контуре. Но в реальном контуре, обладающем активными потерями, процесс свободных колебаний будет затухающим. Для поддержания колебательного процесса необходимо к контуру подключить источник переменного тока. При соединении колебательного контура с источником переменного тока явление резонанса возникает, когда ω - угловая частота источника - равна ω_0 - угловой частоте контура. Если источник соединен последовательно с элементами колебательного контура, то возникает резонанс напряжений, а если источник присоединен параллельно этим элементом, то возможен резонанс токов. Допустим, что имеется возможность изменять емкость в цепи. Тогда при этом будет изменяться емкостное сопротивление, а следовательно и реактивное сопротивление $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$.

При определенном значении C , получим равенство реактивных сопротивлений, т.е. $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ или $x = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$.

В этом случае $z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} = R$ и ток в цепи $I = \frac{U}{R}$, т.е. ток достигает своего наибольшего значения, ограничиваемого лишь активным сопротивлением цепи. В этом случае ток совпадает по фазе с напряжением $\varphi = 0$.

Этот случай носит название резонанса напряжений. Вследствие равенства индуктивного и емкостного сопротивлений равны и соответствующие им U_L и U_C , а т.к. фазы их противоположны, то они в любой момент компенсируют друг друга.

Равенство индуктивного и емкостного сопротивлений является характерным условием резонанса напряжений. Докажем, что в этом случае имеет место резонанс:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}; \quad \omega^2 LC = 1; \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

но ведь было установлено, что собственная угловая частота контура $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, следовательно $\omega = \omega_0$, т.е. действительно имеет место резонанс. Наличие в цепи активного сопротивления не изменит незатухающий характер колебаний, т.к. потери энергии непрерывно пополняются генератором.

Добиться резонанса можно изменяя ω или L и C .

Резонанс напряжений даст большой выигрыш в напряжениях на отдельных участках контура. Действительно, если индуктивное сопротивление ωL равно емкостному сопротивлению $\frac{1}{\omega C}$ значительно больше активного сопротивления цепи

$$R, \text{ то } U_L = U_C = \frac{U}{R} * \omega L = \frac{U}{R} \frac{1}{\omega C}.$$

Напряжение на емкости и индуктивности получается намного больше приложенного к концам цепи напряжения генератора. Резонанс напряжений может оказаться опасным для установки, в которой он имеет место, т.к. резкое увеличение напряжения может привести к пробое изоляции конденсатора и катушки. Такой случай может иметь место, например, если в отходящую от генератора кабельную линию включить последовательно катушку (какого-нибудь аппарата), индуктивность которой находится в резонансном соотношении с емкостью кабеля. Однако, во многих областях электротехники резонанс находит полезное применение. Так, вся радиотехника основана на явлении резонанса. Кривые зависимости I и U_L и U_C от угловой частоты называются резонансными кривыми.

5.2. Резонанс токов

Ток генератора, проходящий по неразветвленной цепи представляет собой геометрическую сумму векторов I_a , I_c и I_L . Из векторной диаграммы видно, что $I_{\text{общ}}$ меньше, чем векторы токов в ветвях и сдвинут относительно вектора тока Э.Д.С. на какой-то угол.

Проследим зависимость амплитуды – фазы общего тока от параметров контур. Предположим, что изменяется емкость контура. Если при этом Э.Д.С. генератора изменяется, ток в индуктивной ветви не меняется, то ток I_c будет изменяться.

При каком-то определенном значении емкости получим, что геометрическая сумма токов, т.е. $I_{\text{общ}}$ совпадает по фазе с Э.Д.С. генератора, а по величине станет минимальной.

Такое соотношение токов и напряжений в цепи, при котором ток в общей цепи имеет наименьшее значение, а сдвиг фаз между ним и Э.Д.С. источника отсутствует, называется резонансом токов.

Очевидно, что в момент резонанса токов контур представляет собой для генератора, наибольшее и чисто активное сопротивление. При резонансе токи в ветвях могут значительно превосходить силу общего тока.

Докажем, что это явление действительно соответствует резонансу, т.е.

равенству: $\omega_0 = \omega$; $I_C = I_L \sin \varphi$; $\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$; $I_C = E \omega C$; $I_L = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$;

$E \omega C = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} * \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$; $\omega C = \frac{\omega L}{(\sqrt{R^2 + (\omega L)^2})^2}$, если учесть, что $R \ll \omega L$, то R можно

записать: $\omega C = \frac{1}{\omega L}$; $\omega^2 LC = 1$.

Условие резонанса $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$.

Следовательно резонанс токов, как и резонанс напряжений наступает при условии равенства частоты генератора с частотой собственных колебаний контура.

Генератор посылает энергию толчками в такт с собственными колебаниями контура и этим восполняет энергию, расходуемого на активные потери в контуре.

Определим величину резонансного сопротивления.

$$Z_{\text{рез}} = \frac{E}{I_{\text{общ}}} = \frac{E}{I_L \cos \varphi} = \frac{E}{\cos \varphi} : \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$Z_{\text{рез}} = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} * \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}{R} = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{R}$$

Учитывая, что $R^2 \ll (\omega L)^2$ можно пренебречь R в числителе, тогда $Z = \frac{\omega^2 L^2}{R}$, или

так, как $\omega^2 = \frac{1}{LC}$, то $Z = \frac{L}{CR} = \frac{1}{\omega^2 C^2 R}$; $\omega^2 = \frac{1}{LC}$; $\omega^2 LC = 1$; $L = \frac{1}{\omega^2 C}$.

Общее сопротивление контура становится при резонансе чисто активным, а по величине получает максимальное значение (учитывая небольшое значение R).

Таким образом, при резонансе токов реактивные составляющие токов равны между собой и противоположны, и по существу составляют один реактивный ток, замыкающийся в контуре. Если в цепи, где осуществлено условие резонанса токов, одновременно увеличить в m -раз обе реактивные проводимости, то в m -раз возрастут оба реактивных тока I_L и I_C , оставаясь равными по величине. Так как условие резонанса не нарушено, то $I_{\text{общ}}$ по-прежнему будет иметь малую величину.

Следовательно, в принципе, включая соответствующие приемники, можно неограниченно увеличивать токи, в соответствующих ветвях не изменяя этим ток источника.

5.3. Мощность цепи однофазного переменного тока

Мощность переменного тока является величиной переменной. В любой момент времени ее значение, или как ее называют мгновенная мощность $p=ui$

В большинстве случаев электрические цепи содержат как активное, так и реактивное сопротивления. К таким рода цепям относятся, в частности, двигатели переменного тока, трансформаторы и другие устройства. В этих цепях между напряжением U и током I существует сдвиг фаз φ . Если к цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_M \cdot \sin \omega t$, то ток в цепи

$$i = I_M \sin(\omega t - \varphi).$$

Мгновенная мощность цепи

$$p = u \cdot i = U_M \sin \omega t \cdot I_M \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U_M \cdot I_M [\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)] = UI [2 \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)].$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках, можно на основании тригонометрической формулы представить как разность косинусов $[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$.

Таким образом

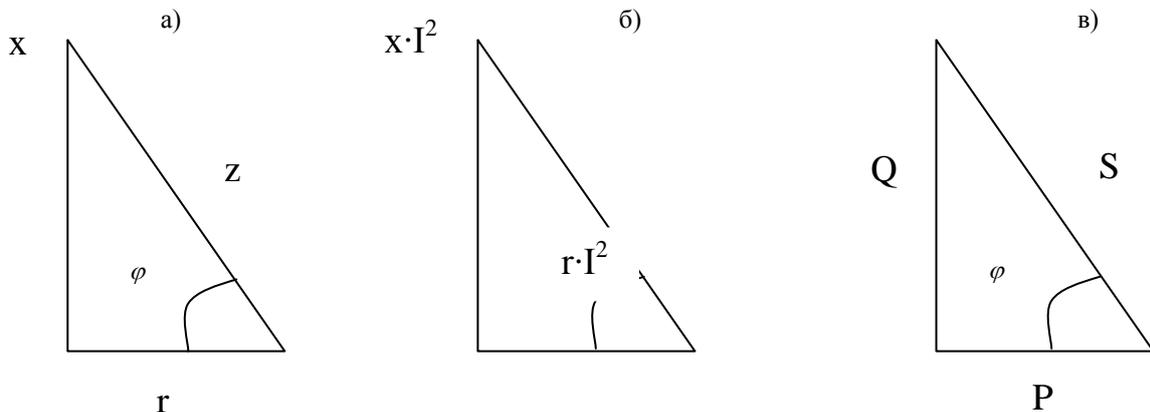
$$p = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cdot \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi).$$

Среднее значение мгновенной мощности за период равно $UI \cdot \cos \varphi$, так как среднее значение $\cos(2\omega t - \varphi)$ за период равно нулю. Следовательно, активная мощность цепей переменного тока определяется в общем случае формулой

$$P = UI \cdot \cos \varphi.$$

Множитель $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности.

Учитывая, что $U = I \cdot z$, а $\cos \varphi = \frac{r}{z}$, получаем $P = I \cdot z \cdot I \cdot \frac{r}{z} = I^2 r$.



Получение треугольника мощностей

Произведение $P \cdot t$ называется активной энергией и измеряется в Вт·сек или кВт·ч=3600 Вт·сек (Дж).

Активная энергия, потребляемая электрической цепью, полностью преобразуется в тепло в активном сопротивлении этой цепи и обратно к источнику не возвращается.

Если величины сторон треугольника сопротивлений умножить на величину I^2 , то получим треугольник мощностей. Все стороны этого треугольника представляют собой мощности.



Треугольник мощностей

Катет, прилегающий к углу φ , представляет собой известную нам активную мощность P :

$$P = I^2 r = UI \cdot \cos \varphi .$$

Активная мощность в цепях переменного тока преобразуется в тепло. В двигателях переменного тока большая часть активной мощности превращается в механическую мощность, остальная часть также преобразуется в тепло.

Катет, лежащий против угла φ , есть реактивная мощность Q :

$$Q = I^2 x = UI \cdot \sin \varphi .$$

Реактивная мощность обусловлена наличием магнитных и электрических полей в электрических цепях.

Как уже указывалось, реактивная мощность характеризует интенсивность обмена энергией между источником, с одной стороны, и магнитными и электрическими полями – с другой.

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар) или киловольт-амперах реактивных (квар).

Гипотенуза треугольника мощностей представляет собой полную мощность S :

$$S = I^2 z = UI , \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2} .$$

Она измеряется в вольт-амперах (ВА) или киловольт-амперах (кВА). Величина полной мощности, равная произведению $U \cdot I$, определяет основные габариты (наибольшие размеры) генераторов и трансформаторов. В самом деле, величина тока I определяет необходимое по условиям нагрева сечение проводов генераторов и трансформаторов, а число витков обмоток, их изоляция, а также размеры магнитопроводов пропорциональны величине напряжения U .

Коэффициентом мощности ($\cos \varphi$) цепи называется отношение активной мощности к полной мощности.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} .$$

В общем случае активная мощность меньше полной мощности, т.е. у этой дроби числитель меньше знаменателя, и поэтому коэффициент мощности меньше единицы.

Только в случае чисто активной нагрузки, когда вся мощность является активной, числитель и знаменатель этой дроби равны между собой, и поэтому коэффициент мощности равен единице.

Чем большую часть полной мощности составляет активная мощность, тем меньше числитель отличается от знаменателя дроби и тем ближе коэффициент мощности к единице.

Величину $\cos \varphi$ можно косвенно определить по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра: $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Коэффициентом мощности можно также измерить особым прибором – фазометром.

ЛЕКЦИЯ №:6 ТРАНСФОРМАТОРЫ

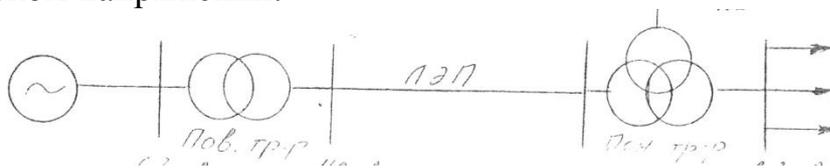
6.1. Назначение, устройство и принцип действия трансформатора

С целью экономической передачи электроэнергии на дальние расстояния и распределения ее между разнообразными потребителями появляется необходимость в ее трансформации. Последнее осуществляется с помощью повышающих и понижающих трансформаторов. При передаче электроэнергии на расстояния говорят об активной мощности

- определяется характером нагрузки. В данном случае считается, что $\cos \varphi = 1$, т.е. потерь нет. Передать мощность, например в $P=1000$ кВт можно двояко:

1. $V=10$ кВ $I=100$ А
2. $V=100$ кВ $I=10$ А

В первом случае потерь будет в 100 раз больше. Поэтому экономичнее вести передачу на высоком напряжении.



На выходе понижающих трансформаторов получаем 220 В. У приёмников электроэнергия напряжение надо понизить, Применяют трех обмоточные трансформаторы.

Трансформатор - статический электромагнитный аппарат, который служит для преобразования электромагнитным путем электроэнергии одного напряжения в электроэнергию другого напряжения.

По току трансформаторы бывают однофазные и трехфазные.

По напряжению - повышающие и понижающие.

Трансформатор (рис. 6.1) состоит из ферромагнитного магнитопровода (сердечника), собранного из отдельных листов электротехнической стали, на котором

расположены две обмотки w_1 и w_2 , выполненные из медного или алюминиевого провода.

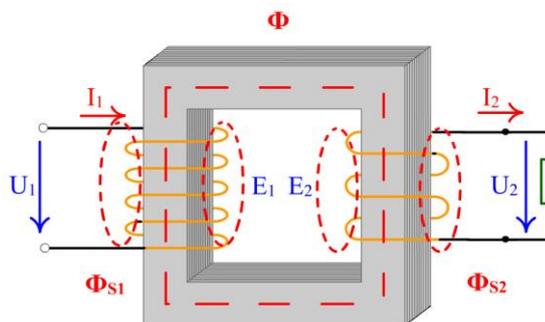


Рис. 6.1

Обмотку, подключенную к источнику питания, принято называть первичной, а обмотку, к которой подключаются приемники - вторичной.

Все величины, относящиеся к первичной и вторичной обмоткам, принято соответственно обозначать индексами 1 и 2.

Если первичную обмотку трансформатора с числом витков w_1 включить в сеть переменного тока, то напряжение сети V_1 вызовет в ней ток I_1 и М.Д.С.

$I_1 w_1$ создаст переменный магнитный поток Φ . Переменный магнитный поток, замыкаясь по сердечнику, пересекает витки первичной и вторичной обмотки и индуцирует в них Э.Д.С. e_1 и e_2 соответственно.

Действительно, переменный ток I_1 создаст переменный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t$$

А переменный магнитный поток индуцирует Э.Д.С.

$$e_{16} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_1 = w_1 \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = w_2 \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Где

$$w_1 \omega \Phi_m = E_{m1}$$

$$w_2 \omega \Phi_m = E_{m2}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot w_1 \Phi_m = 4,44 w_1 f \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} w_2 \Phi_m = 4,44 w_2 f \Phi_m$$

Значение Э.Д.С. для первичной и вторичной обмотки

$$E_1 = 4.44w_1f\Phi_m \quad (1)$$

$$E_2 = 4.44w_2f\Phi_m \quad (2)$$

E_1 - является противо Э.Д.С. она уравнивает приложенное напряжение.
 E_2 - Э.Д.С. вторичной обмотки (источника).

Когда есть нагрузка, электрическая цепь вторичной обмотки оказывается замкнутой и Э.Д.С. E_2 вызывает в ней ток I_2 . Таким образом, электроэнергия первичной цепи с параметрами V_1, I_1 и частотой f будет преобразована в энергию переменного тока вторичной цепи с параметрами V_2, I_2 .

6.2. Коэффициент трансформации трансформатора.

Коэффициент трансформации показывает, во сколько раз Э.Д.С. E_1 первичной обмотки или напряжение больше Э.Д.С. E_2 напряжения вторичной обмотки.
 Разделим (1) на (2) получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44w_1f\Phi_m}{4.44w_2f\Phi_m} = \frac{w_1}{w_2}; \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

Электроэнергия из первичной цепи во вторичную в трансформаторе подаётся посредством переменного магнитного потока, поскольку гальваническая связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора отсутствует. Отношение значений Э.Д.С. E_1 к E_2 равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток.

Для выяснения соотношения между первичным и вторичным напряжением необходимо разобраться в следующем:

Во-первых, кроме основного магнитного потока Φ или просто магнитного потока трансформатора, как даже мы будем называть, который полностью располагается в ферромагнитном сердечнике и пронизывает все витки первичной и вторичной обмоток, ток первичной обмотки I_1 создает магнитный поток рассеяния Φ_{p1} . Поток рассеяния Φ_p в отличие от основного охватывает витки только первичной обмотки и, как это видно из рис. располагается главным образом в немагнитной среде (воздушном пространстве или трансформаторном масле, окружающей обмотку). Этот поток создает в первичной обмотке Э.Д.С. E_{p1} .

Значит

$\Phi_{ps} \rightarrow E_{p1}$ Э.Д.С. рассеяния

$\Phi_{ps2} \rightarrow E_{p2}$ Э.Д.С.

Во-вторых, первичная обмотка обладает определённым активным сопротивлением. Поэтому, как вытекает из уравнения электрического состояния первичной цепи.

$$U_1 = -E_1 - E_{p2} - I_1R_1$$

Поэтому $V_1 \neq E_1$ назначения падения напряжения, обусловленное Э.Д.С. E_{p1} и активным сопротивлением обмотки.

Однако эта разность не велика, и если ею пренебречь, то можно допустить, что $U_1 \approx E_1$

При работе с нагрузкой во вторичной обмотке появляется I_2 . Ток I_2 участвует в создании основного магнитного потока, а также создаёт поток рассеяния Φ_{p2} и создаёт E_{p2} .

$$U_2 = E_2 + E_{p2} - I_2 K_2$$

E_{p2} и $I_2 R_2$ очень маленькие величины, ими можно пренебречь, тогда $V_2 \equiv E_2$. Тогда коэффициент трансформации трансформатора

$$k = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Откуда следует, что $U_2 = \frac{U_1 \omega_2}{\omega_1} = U_1 / k$

Если пренебречь потерями активной мощности в обмотках и реактивной мощностью, обусловленной главным магнитным потоком и потоком рассеяния трансформатора, то

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

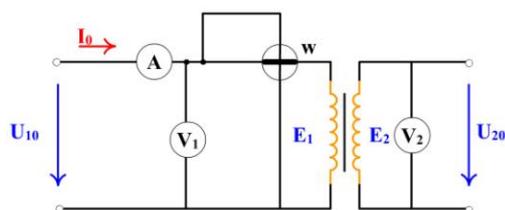
Откуда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k$$

$$I_2 = I_1 k$$

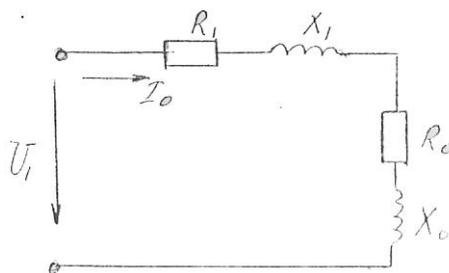
6.3. Опыт холостого хода трансформатора

Холостым ходом называется такой режим работы трансформатора, при котором вторичная обмотка разомкнута, а в первичную подаётся номинальное напряжение.



При холостом ходе ток, потребляемый трансформатором, называется током холостого хода трансформатора I_0 .

V_{10} - напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора, уравнивается $E_{10}, I_0 \cdot R_1, jI_0 X_1$.



$$U_1 = -E_1 + I_0 R_1 + jI_0 X_1$$

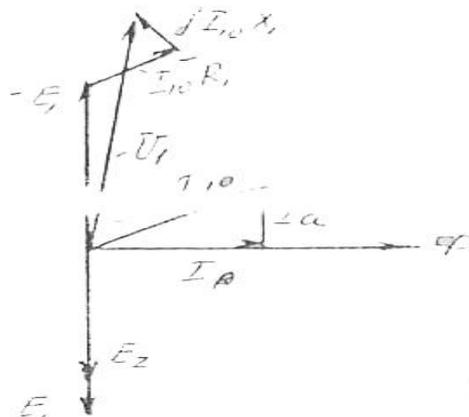
Во вторичной обмотке тока нет. Приложенное напряжение в опыте холостого хода уравнивается следующими составляющими:

1. Против Э.Д.С. E_1 , создаваемая основным потоком.
2. Падение напряжения от тока I_0 .
3. Э.Д.С. рассеяния первичной обмотки, создаваемой потоком рассеяния этой обмотки.

Построим векторную диаграмму для опыта холостого хода. Построение векторной диаграммы начинаем относительно вектора магнитного потока.

$$I_0 = (5 \div 8)\% I_{\text{ном}}$$

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$



I_a - активный ток, идущий на покрытие потерь в сердечнике.

I_p или I_M - намагничивающий ток, идущий на создание магнитного потока,

ω - угол потерь, он зависит от величины потерь мощности в сердечнике.

E - отстает от потока, ее создавшего на 90° .

Отложим вверх $(-E_1)$. $I_0 R_1 \parallel I_0$

γ - показывает сдвиг по фазе на 90°

φ - угол сдвига между током и напряжением.

Положение V_1 определяется углом $\varphi \rightarrow 90^\circ$, $\cos \varphi_0 \rightarrow 0$

$\cos \varphi_0$ - коэффициент мощности при холостом ходе $\cos \varphi_0 \rightarrow 0.2 - 0.3$. Поэтому при холостом ходе трансформатор работать не должен, т.к. $\cos \varphi$ должен быть не менее 0,8.

U_{10} - напряжение при холостом ходе.

$U_{10} \equiv E_1$, т.к. при холостом ходе

$$I_0 R_1 + jI_0 X_1 \cong 0$$

Приближенно считают, что напряжение в холостом ходе уравнивается против Э.Д.С. $U_1 \equiv E_1$, а $U_{20} \equiv E_2$, т.е. тока в этой цепи нет и потерь тоже нет.

$$k = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2}$$

Где k - коэффициент трансформации трансформатора.

Мощность, потребляемая трансформатором в опыте холостого хода, идёт на покрытие потерь мощности в стали.

В общем случае:

$$\Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_{м}$$

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{гист} + \Delta P_{в.т.}$$

$$\Delta P_{м} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Для холостого хода

$$\Delta P_{м} = I_0^2 R_1 \cong 0$$

Очень мало, можно пренебречь.

Потери при холостом ходе равны потерям в стали.

6.4. Токи в обмотках нагруженного трансформатора. Работа трансформатора под нагрузкой.

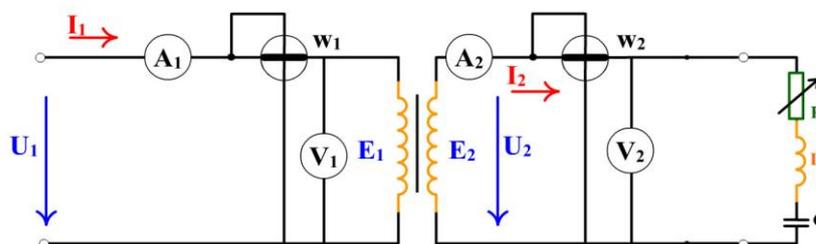


Рис.

Цепь разомкнута.

Изменением напряжения U_{20} .

$I_0 \rightarrow F_0 \rightarrow I_0 \omega_1 \rightarrow \Phi_0$ - в момент включения.

При замыкании рубильника нагрузки трансформатора

$I_1 \rightarrow F_1 = I_1 \omega_1 \rightarrow \Phi_1$

$I_2 \rightarrow F_2 = I_2 \omega_2 \rightarrow \Phi_2$

$U_1 = const, U_1 = E_1 = 4.44 f \omega_1 \Phi_m$

Отсюда

$$\Phi = \frac{U_1}{4.44 f \omega_1} = const$$

Т.к все величины const

Это означает, что Φ_0 , который имеет место при токе холостого хода достаточен для нормальной работы трансформатора.

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 = const$$

Φ_1 - необходим для создания Э.Д.С.

Φ_1 и Φ_2 - потоки, получающиеся при нагрузке трансформатора.

$$F_0 = F_1 + F_2$$

$$I_0 \omega_1 = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2$$

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2 - I_0 \omega_1$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = k; \quad \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k}$$

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}; \quad I_1 = I_0 - \frac{I_2}{k}$$

Характерным для трансформатора является принцип саморегулирования. Изменяем нагрузку во вторичной цепи.

1. Произошло изменение нагрузки, т.е. I_2 увеличивается. Увеличение I_2 соответственно вызовет увеличение намагничивающей силы $F_2 = I_2 \omega_2$. Т.е. увеличение магнитного потока Φ_2 . Увеличение потока Φ_2 согласно равенству $\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 = const$

Вызовет уменьшение потока Φ_1 , т.е. уменьшение Э.Д.С. E_1 создаваемая этим потоком. Уменьшение против Э.Д.С E_1 вызовет увеличение тока I , т.е. увеличение тока во вторичной цепи увеличит ток в первичной цепи.

2. Уменьшение тока I_2 вызовет уменьшение тока I_1 (точно так же, как и в первом случае)

Величина потерн напряжения, согласно ГОСТу, определяется как отношение разности номинального вторичного напряжения и вторичного напряжения, получаемого при номинальном первичном напряжении, номинальном К.П.Д. и номинальном вторичном токе к номинальному вторичному напряжению.

$$\Delta U = \frac{U_{2ном} - U_2}{U_{2ном}} \cdot 100\%$$

Это официальное падение напряжения. В действительности это ΔU определяется так

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%$$

Где U_{20} определяется при холостом ходе.

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения на зажимах нагрузки от тока нагрузки.

$U_2 = f(I_2)$ – вольтамперная характеристика.

Внешняя характеристика снимается при $\cos \varphi = const$

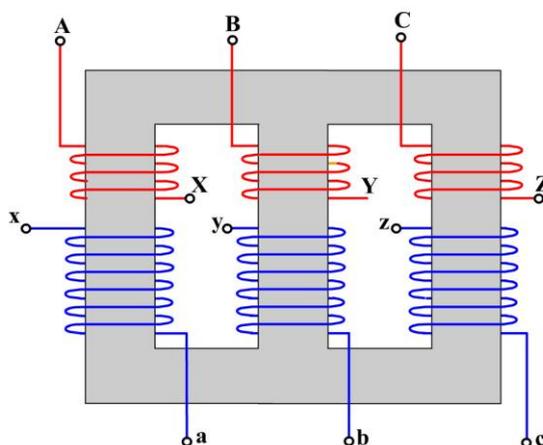
На протяжении снятой характеристики при $\cos \varphi < 1$ потери будут больше.

При уменьшении $\cos \varphi$ потери возрастают

ЛЕКЦИЯ №7

7.1. Трёхфазные трансформаторы.

Трансформация трехфазного тока может осуществляться тремя однофазными трансформаторами или специальными трехфазными трансформаторами. В большинстве случаев применяют трехфазные трансформаторы, т.к. они дешевле и имеют меньшие габариты, чем группа однофазных. Только при передаче энергии большой мощности используют однофазные трансформаторы. Это объясняется главным образом условиями технологического процесса Изготовления мощных трансформаторов на заводе и возможностью их перевозки.



Трёхфазный трансформатор был изобретен в 1880-х годах русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским.

На каждом из трех стержней, набранных из листовой стали и объединенных сверху снизу ярмом, расположены первичная и вторичная обмотки одной фазы. Начальные выводы обмотки высшего напряжения обозначаются А, В, С, конечные выводы - Х, Y, Z. Для выводов обмоток низшего напряжения применяются обозначения малыми буквами, например а, в, с, х, у, z.

Магнитные потоки трех фаз Φ_1, Φ_2, Φ_3 сдвинуты относительно друг друга во времени на $1/3$ периода или по фазе на 120° мгновенные значения их суммы равны нулю.

Поэтому поток в любом из стержней в каждый момент времени равен алгебраической сумме потоков двух других стержней. Магнитные сопротивления путей для двух крайних потоков Φ_1 и Φ_3 больше, чем для среднего потока Φ_2 что вызывает некоторую не симметрию намагничивающих потоков различных фаз. Однако эта не симметрия не имеет практического значения.

Трёхфазный трансформатор меньше по массе и габаритам группы из трехфазных трансформаторов. Однако один однофазный из трехфазной группы меньше по массе и габаритам легче транспортируется, чем трехфазный трансформатор на полную мощность.

7.2. Автотрансформаторы

Автотрансформатор отличается тем, что связь между первичной и вторичной обмоткой электроэнергия преобразуется в другие виды не при помощи электромагнита, а при помощи электричества.

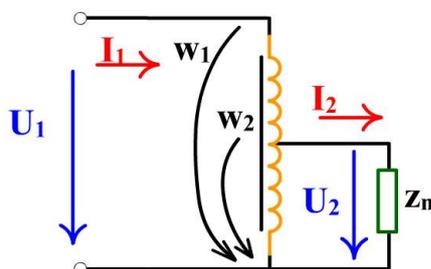


Рис.

Автотрансформатор представляет собой одну обмотку, которая намотана на сердечник из ферромагнитного материала и сделано ответвление. К первичной обмотке, имеющей w_1 витков, подводится напряжение V_1 .

Напряжение V_2 берется от части витков w_2 первичной обмотки.

Обмотка автотрансформатора, так же, как и у обычного трансформатора, расположена на стальном замкнутом магнитопроводе. При нагрузке можно приближенно считать.

Так как I_1 и I_2 сдвинуты по фазе почти на 180, то по общей части обмотки будет

$$I' = I_2 - I_1 = (k - 1)I_1 = \frac{k - 1}{k} I_2$$

Это позволяет выполнить общую часть обмотки меньшего сечения по сравнению с вторичной обмоткой трансформатора. Выгода получается тем больше, чем ближе $k \rightarrow 1$. Верхняя часть обмотки, по которой протекает первичный ток, содержит число витков

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{k - 1}{k} \omega_1$$

По сравнению с первичной обмоткой обычного трансформатора и здесь расход обмоточной меди получается меньше в $(k-1)/k$ раз.

Уменьшение объёма обмоток выражается также и уменьшением массы стали.

Поэтому и преимущества:

1. Экономия ферромагнитного материала.
2. Экономия цветного металла.

Недостаток: $k < 1$

При $k > 1$ он не применяется.

7.3. Специальные трансформаторы.

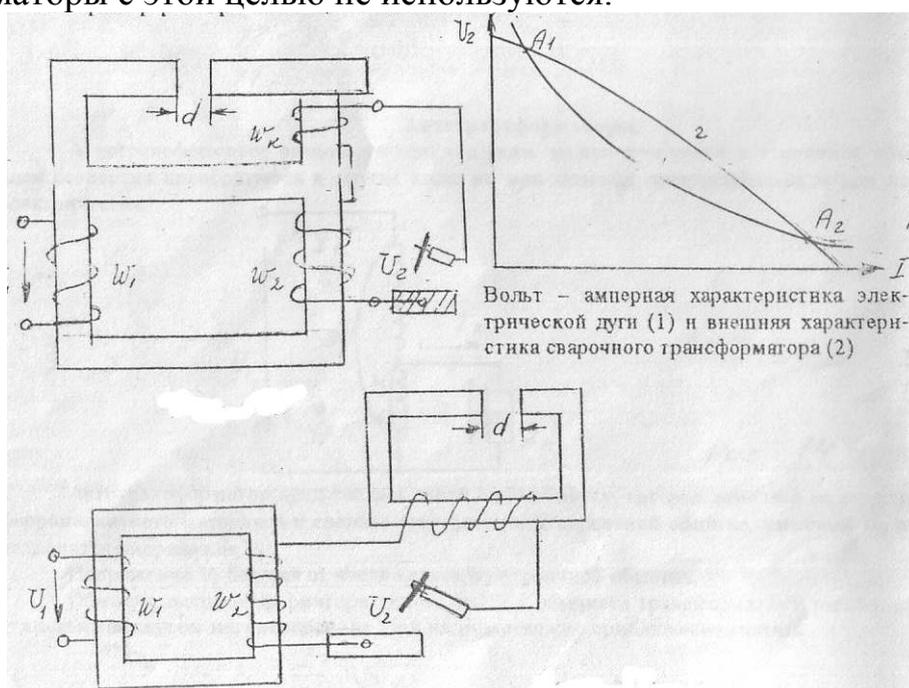
Сварочные трансформаторы.

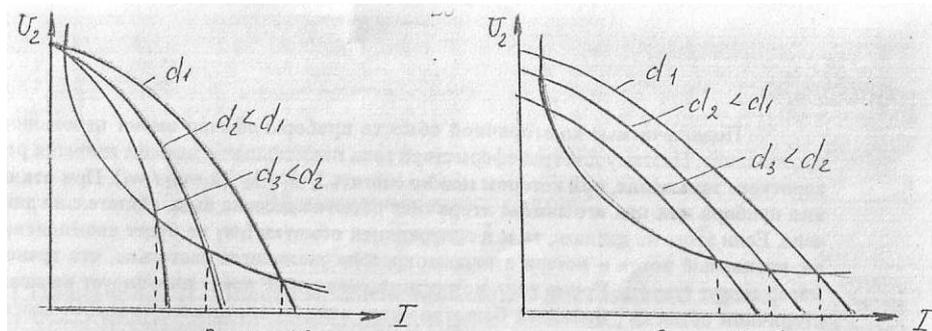
В конструктивном отношении имеется большое разнообразие сварочных трансформаторов. В значительной степени это определяется видом сварки (дуговая, стыковая, шовная, точечная).

При дуговой сварке вольт - амперная характеристика дуги имеет вид, показанный кривой 1. Вольт - амперная характеристика или внешняя характеристика трансформатора, т.е. источника питания дуги, должна иметь точку пересечения с вольт - амперной характеристикой дуги, чтобы ее горение было устойчивым. Следовательно, сварочный трансформатор должен иметь круто падающую внешнюю характеристику (кривая 2). Зажигание дуги происходит в точке A_1 при напряжении 60-70 В, устойчивое горение дуги - в точке A_2 при напряжении 12-30 В и при большом токе.

Для получения круто падающей внешней характеристики можно использовать включенную последовательно с вторичной обмоткой индуктивную катушку с большим индуктивным сопротивлением (реактор) или обеспечить большие магнитные потоки рассеяния (большое x_k) в самом трансформаторе. В качестве примеров на рисунке показаны принципиальные схемы сварочных трансформаторов, в которых использованы указанные способы получения необходимых внешних характеристик. При изменении воздушного зазора d меняется индуктивное сопротивление реактора или самого трансформатора, и, соответственно, наклон внешней характеристики. Плавное регулирование путем изменения зазора d и регулирование ступенями путем изменения числа витков применяются и в варианте «а», и в варианте «б».

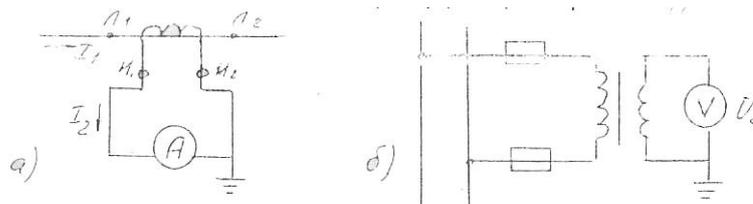
Для плавного уменьшения электрической дуги в принципе можно использовать автотрансформаторы. Но, т. к. в них первичная и вторичная обмотки электрически связаны, то электросварщики могут попасть под полное напряжение сети 200 или 300 В, что недопустимо с точки зрения техники безопасности. Поэтому обычно автотрансформаторы с этой целью не используются.





7.4. Измерительные трансформаторы.

В электроустановках переменного тока большой мощности и напряжением выше 1000 В непосредственное включение электроизмерительных приборов невозможно, т. к. номинальные значения напряжения и токи приборов не соответствуют номинальным значениям напряжения и тока электроустановок. Для расширения пределов измерения приборов и для изоляции их от высокого напряжения применяют измерительные трансформаторы, трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.



Кроме измерительных приборов к вторичным обмоткам измерительных трансформаторов подключают обмотки других аппаратов. Мощность измерительных трансформаторов от пяти до нескольких сотен вольт - ампер.

Трансформатор тока используют для расширения пределов измерения амперметров и последовательных обмоток ваттметров, счетчиков энергии и фазометров. Его первичную обмотку включают последовательно в ту цепь, ток в которой надо измерить. Она обычно состоит из одного или нескольких витков. Выводы первичной обмотки обозначают L_1 и L_2 . К зажимам вторичной обмотки подключают амперметр или последовательные обмотки ваттметра, счетчика и фазометра. Чтобы ток во вторичной обмотке был меньше измеряемого первичного тока, число витков вторичной обмотки делают большим. Вывод вторичной обмотки обозначают U_1 и U_2 (измерительные приборы). Вторичную обмотку и металлические части кожуха заземляют. Это вызвано требованиями техники безопасности для защиты обслуживающего персонала от возможного поражения током высокого напряжения при пробое изоляции между первичной и вторичной обмотками. Подключаемые к вторичной обмотке приборы обычно имеют небольшое сопротивление. Поэтому для трансформатора тока нормальным режимом является режим короткого замыкания, при котором можно считать $I_2 = I_1/k_2$ ($k_1 = w_2/w_1$). При отключении прибора или при

его замене вторичная обмотка должна быть обязательно закорочена. Если этого не сделать, то м.д.с. первичной обмотки $I_1 w_1$ не будет скомпенсирована, магнитный поток и потери в магнитопроводе увеличатся настолько, что трансформатор может сгореть. Кроме того, возросший магнитный поток индуцирует на зажимах вторичной обмотки, имеющей большое число витков, значительную Э.Д.С. (сотни, и даже тысячи вольт). Стандартные номинальные первичные токи трансформаторов тока от 5 до 15000А, номинальный вторичный ток 5А (у некоторых трансформаторов тока - 1 А). Поэтому к вторичной обмотке следует присоединять приборы, номинальный ток которых равен 5А. При соблюдении этого условия цена деления приборов определяется по номинальному первичному току трансформатора тока. Трансформаторы напряжения применяют в сетях напряжения для измерения напряжения и частоты. К вторичной обмотке подключают вольтметры, частотомеры и параллельные обмотки ваттметров, счетчиков и фазометров, т. е. обмотки, имеющие большое сопротивление.

ЛЕКЦИЯ № 8 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

8.1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на преимущественное распространение электроэнергии переменного тока, электрические машины постоянного тока в настоящее время широко применяются в качестве двигателей и несколько меньше — в качестве генераторов. Это объясняется важными преимуществами двигателей постоянного тока перед другими электродвигателями: они допускают плавное регулирование частоты вращения простыми способами и обладают лучшими пусковыми качествами— развивают большой пусковой момент при относительно небольшом токе. Поэтому их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте.

Электродвигатели постоянного тока часто являются исполнительными звеньями систем автоматического регулирования, а специальные генераторы используются как усилители электрических сигналов управления и как тахогенераторы — датчики частоты вращения.

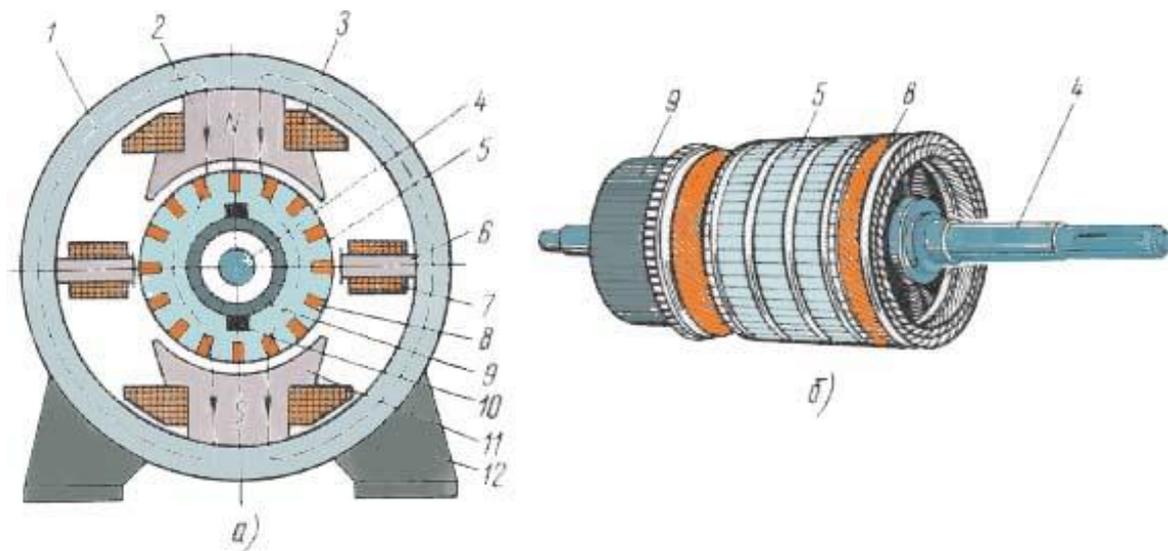
Генераторы низкого напряжения (6—12 В) применяют для питания электролитических ванн (токи до 10 000 А), зарядки аккумуляторных батарей, высококачественной сварки (напряжения 20—70 В).

Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования, дорожностроительных машин. Диапазон мощностей машин постоянного тока достаточно широк — от единиц ватт (микромашин) до 9000 кВт (крупные двигатели для прокатных станков, гребных винтов кораблей).

Наиболее распространены машины общепромышленного применения серии П, выпускаемые как двигатели или как генераторы на мощности 0,15—200 кВт, частоты вращения 2870—550 об/мин (более мощные машины — тихоходные), напряжения 110—460 В.

При целом ряде преимуществ машины постоянного тока имеют существенный недостаток, связанный с работой так называемого щеточно-коллекторного узла. При определенных неблагоприятных условиях щетки могут искрить, что снижает надежность работы и требует надзора и ухода за машиной. Такую машину нельзя использовать во взрывоопасных средах. Коллектор усложняет и удорожает ее конструкцию и эксплуатацию по сравнению с бесколлекторной машиной переменного тока.

8.2. Устройство машин постоянного тока



Генераторы и двигатели постоянного тока устроены одинаково. Неподвижная часть машины, называемая статором а), состоит из массивного стального корпуса 1, к которому прикреплены главные полюсы 2 и дополнительные полюсы б. Исходя из технологических и других соображений главные полюсы изготовляют чаще из отдельных стальных листов; иногда их изготовляют сплошными. Из отдельных листов либо сплошными изготовляют и дополнительные полюсы. Перечисленные детали статора являются также и деталями его магнитопровода. На главных полюсах размещают катушки одной или нескольких обмоток возбуждения 3, на дополнительных полюсах — катушки 7 обмотки дополнительных полюсов.

В подшипниковых щитах, прикрепленных с торцевых сторон к корпусу, расположены подшипники, несущие вал 4 вращающейся части машины, называемой якорем. На валу закреплен цилиндрический сердечник якоря 5, который для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов набирают из стальных листов. В пазах, расположенных по поверхности якоря, уложена обмотка якоря 8. Так же, как обмотку возбуждения и обмотку дополнительных полюсов, ее изготовляют из медного изолированного провода. Выводы от обмотки якоря присоединяют к расположенному на валу коллектору 9. Последний представляет собой цилиндр, состоящий из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К коллектору с помощью пружин прижимаются графитные, угольно-графитные или металлографитные щетки 10. Щетки расположены в специальных щеткодержателях.

Обмотка возбуждения машины питается постоянным током и служит для создания основного магнитного поля, а условно с помощью двух линий магнитной индукции, изображенных пунктиром.

Главные полюсы имеют полюсные наконечники 11, служащие для получения по большей части окружности якоря одного и того же воздушного зазора между сердечником якоря и главными полюсами. Это необходимо для получения на большей части окружности якоря одной и той же магнитной индукции, а в проводниках обмотки якоря — постоянной по значению ЭДС. Дополнительные полюсы предназначены для уменьшения искрения под щетками.

В зависимости от мощности и напряжения машины могут иметь и большее число полюсов. При этом соответственно увеличиваются число комплектов щеток и дополнительных полюсов. Крепление машины к фундаменту, специальным салазкам или металлоконструкции осуществляется с помощью лап 12. Корпус некоторых машин снабжается для крепления специальными фланцами.

8.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Благодаря полюсным наконечникам магнитная индукция в воздушном зазоре распределяется примерно по трапецеидальному закону. У поверхности якоря при $\alpha = 0$ магнитная индукция $B = 0$; с увеличением α магнитная индукция сначала возрастает, под большей частью северного полюса имеет постоянное значение, а при $\alpha = 180^\circ$ уменьшается до нуля. В пределах от $\alpha = 180^\circ$ до 360° магнитная индукция изменяется по такому же закону, но условно считается отрицательной.

Направление ЭДС проводника, находящегося в пазу магнитопровода якоря, определяется по правилу правой руки, а ее значение B — по формуле:

$$e_{np} = Blv, \text{ где}$$

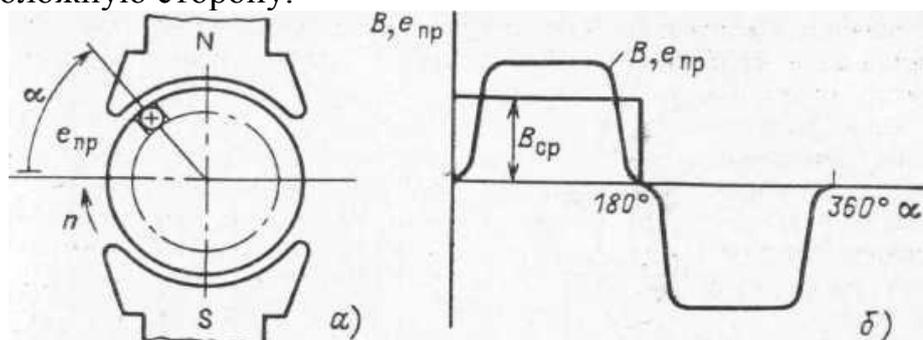
B — магнитная индукция, Тл;

l — длина проводника, м;

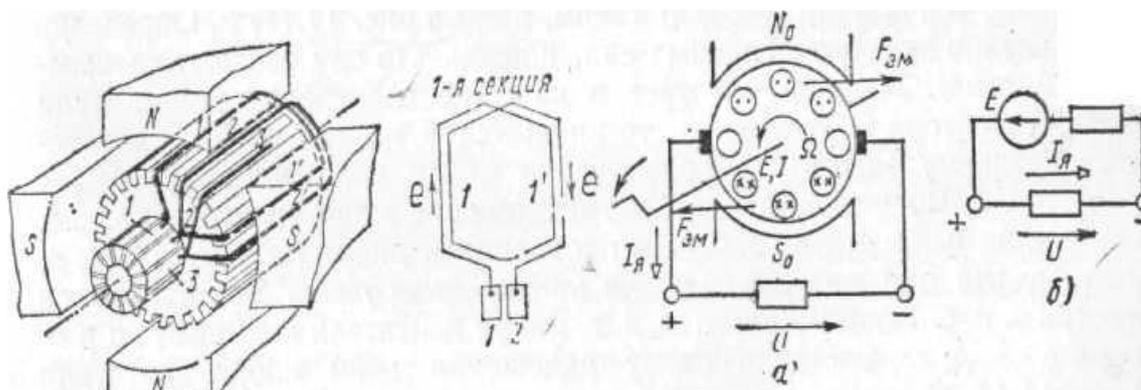
v — скорость перемещения проводника, м/с.

Очевидно, при $v = \text{const}$ $e_{np} \sim B$ и график $B(\alpha)$ в другом масштабе представляет собой график $e_{np}(\alpha)$. Изменение знака ЭДС e_{np} означает изменение ее направления по сравнению с положительным направлением.

Если в пазах, находящихся под северным полюсом, имеется несколько проводников, то ЭДС всех проводников будут иметь, очевидно, одно и то же направление; во всех проводниках якоря у южного полюса ЭДС будут направлены в противоположную сторону.



8.4. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА.



Принцип действия генератора. Допустим, что якорь машины вращается с помощью какого-то двигателя в направлении, указанном стрелкой. Если щетки генератора соединить с каким-либо приемником Γ , то под действием ЭДС генератора в обмотке якоря и приемника появится ток, приемник начнет потреблять электрическую энергию, а машина будет ее отдавать, т. е. будет работать в качестве генератора. Естественно, что электрическая энергия, вырабатываемая генератором, преобразуется из механической энергии двигателя, вращающего якорь генератора.

Направление тока в проводниках обмотки якоря генератора совпадает, конечно, с направлением ЭДС проводников и при вращении якоря изменяется. Однако с помощью коллектора изменяющийся по направлению ток проводников преобразуется в неизменные по направлению токи параллельных ветвей $i_{\text{пар}}$ и ток внешней цепи $i_{\text{я}}$, называемый током якоря. Согласно первому закону Кирхгофа для рассматриваемого генератора $i_{\text{я}} = 2i_{\text{пар}}$. Машины постоянного тока могут иметь число параллельных ветвей больше двух. Обозначив в общем случае число параллельных ветвей $2a$, получим:

$$I_{\text{я}} = 2ai_{\text{пар}}$$

Если воспользоваться правилом левой руки, нетрудно установить, что генератор развивает электромагнитный момент, направленный против направления вращения, т. е. является тормозящим.

Изменение полярности щеток и, следовательно, направлений ЭДС, напряжения и тока во внешней цепи генератора возможно произвести одним из двух способов:

1) изменением направления магнитного поля главных полюсов, что осуществляется изменением направления тока обмотки возбуждения, располагаемой на главных полюсах;

2) изменением направления вращения якоря генератора с помощью приводного двигателя. Обычно используется первый способ.

8.5. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Предположим, что якорь той же машины неподвижен. Если от источника постоянного тока подвести к якорю двигателя напряжение, то во внешней цепи и в обмотке якоря возникнут токи, направление которых будет противоположным

указанным на рисунке. С помощью правила левой руки можно установить, что на якорь будет действовать вращающий электромагнитный момент и якорь начнет вращаться против часовой стрелки. При вращении в обмотке якоря возникнет ЭДС, которая согласно правилу правой руки будет направлена, против тока двигателя. Противоположные направления тока и ЭДС говорят о том, что в машине происходит преобразование электрической энергии в механическую. Двигатель разгонится до такой частоты вращения, при которой его момент станет равным моменту, обусловленному нагрузкой.

Говоря о принципе действия двигателя, нельзя не остановиться на назначении коллектора в этом случае. Коллектор необходим для того, чтобы неизменный по направлению ток внешней цепи преобразовывать в изменяющийся по направлению ток в проводниках обмотки якоря при его вращении. Только благодаря коллектору ток всех проводников, находящихся под одним полюсом, имеет одно и то же направление. Вследствие этого остается неизменным и направление вращающего момента, развиваемого двигателем.

Для изменения направления вращения двигателя необходимо изменить направление развиваемого им вращающего момента. Это можно сделать одним из двух способов:

1) изменением полярности напряжения, подводимого к якорю двигателя и, следовательно, направления тока якоря;

2) изменением направления магнитного потока главных полюсов. Обычно используется первый способ.

Рассмотрев принципы действия генератора и двигателя, можно сделать вывод о том, что машины постоянного тока обратимы. Это значит, что при определенных условиях генераторы могут работать в качестве двигателей и наоборот. Возможность двигателей работать в качестве генераторов и, следовательно, развивать тормозящий момент широко используется на практике.

8.7. ЯВЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При работе генераторов и двигателей без нагрузки (вхолостую) ток в обмотке якоря отсутствует (или весьма мал) и магнитное поле машины возбуждается только МДС обмотки возбуждения. Поле оказывается симметричным относительно оси главных полюсов. В секциях обмотки якоря, находящихся на геометрической нейтрали ГН и замыкаемых щетками накоротко, ЭДС не индуктируется.

Следует обратить внимание на то, что в данном параграфе проводники обмотки якоря расположены условно не в пазах магнитопровода якоря как это делают на самом деле, а на поверхности якоря; кроме того, условно не показан коллектор, и щетки касаются непосредственно проводников обмотки якоря.

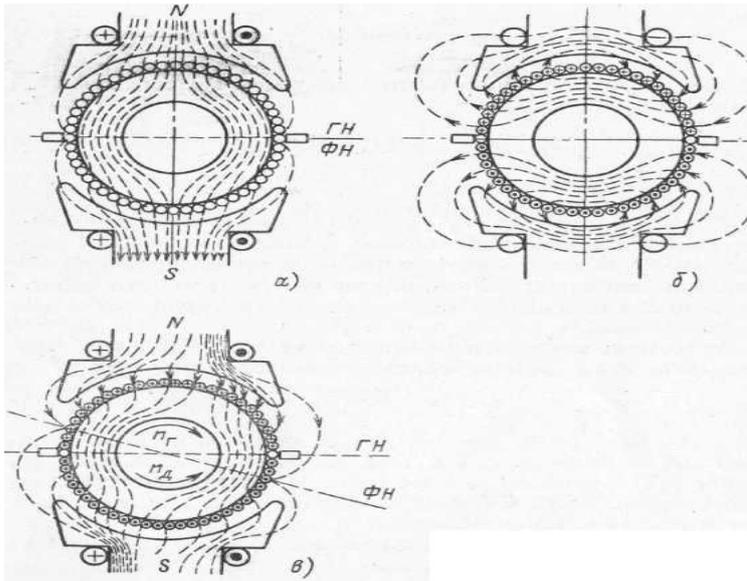
При работе машины с нагрузкой в обмотке якоря возникает ток и магнитное поле машины возбуждается как МДС обмотки возбуждения, так и МДС обмотки якоря.

Воздействие МДС обмотки якоря на магнитное поле машины называется реакцией якоря.

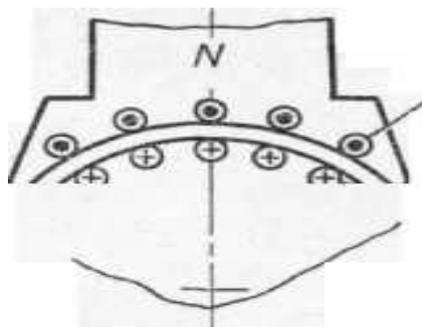
Рассмотрим реакцию якоря в наиболее часто встречающемся случае расположения щеток на геометрической нейтрали.

На рисунке б показано магнитное поле, образованное под действием МДС обмотки якоря, а на рис. в — результирующее магнитное поле машины. Указанные на рис. в направления токов обмотки якоря соответствуют указанным там же направлениям вращения генератора и двигателя. В случае расположения щеток на геометрической нейтрали возникает поперечная реакция якоря, характеризующаяся тем, что ось симметрии поля реакции якоря перпендикулярна оси главных полюсов. В результате действия поперечной реакции якоря магнитное поле машины оказывается несимметричным относительно оси главных полюсов. Под одним краем каждого полюса магнитная индукция увеличивается, под другим уменьшается. Физическая нейтраль ФН, под которой понимают линию, проходящую через ось машины и точки поверхности якоря, где магнитная индукция результирующего поля равна нулю, смещается у генератора по направлению вращения, у двигателей — против направления вращения. При отсутствии тока якоря физическая нейтраль совпадает с геометрической. В результате действия реакции якоря в секциях обмотки якоря, расположенных на геометрической нейтрали, возникает ЭДС. Между коллекторными пластинами, присоединенными к секциям, находящимся в усиленном магнитном поле главных полюсов, появляется повышенное напряжение, что может привести к возникновению дуги между коллекторными пластинами. Для устранения искажения магнитного поля под полюсами крупные машины, работающие с частыми и значительными перегрузками, снабжаются компенсационной обмоткой. Последнюю закладывают в пазы полюсных наконечников и соединяют последовательно с обмоткой якоря, в результате чего создается магнитное поле в зоне расположения полюсов, противоположное по направлению полю реакции якоря.

Влияние поперечной реакции якоря на результирующее магнитное поле зависит от степени насыщения ферромагнитного материала магнитной цепи и значения тока якоря. В общем случае из-за насыщения ферромагнитного материала магнитная индукция под одним краем полюса возрастает меньше, чем уменьшается под другим; в результате магнитный поток машины несколько уменьшается. Однако при нагрузках, на которые рассчитываются машины при нормальных условиях их работы, магнитный поток изменяется на относительно небольшое значение, поэтому влияние поперечной реакции якоря на магнитное поле при расчетах часто не учитывают.



К пояснению явления реакции якоря



Компенсационная абмотка

8.9. ЯВЛЕНИЕ КОММУТАЦИИ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

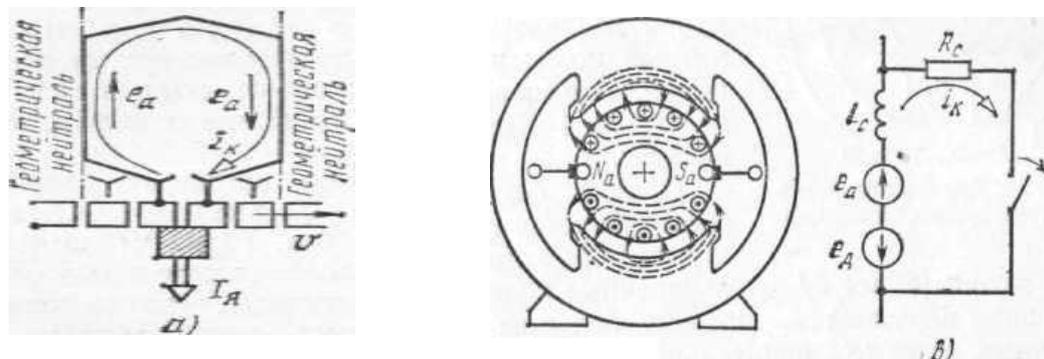
Под коммутацией в машинах постоянного тока понимают процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую, сопровождающийся изменением направления тока в секциях. Направления и значения тока коммутируемой (переключаемой) секции в различных ее положениях относительно неподвижной щетки показаны.

В результате изменения тока в коммутирующей секции возникает ЭДС самоиндукции e_L .

Для увеличения механической прочности щеток их ширину выбирают обычно больше ширины коллекторной пластины. Вследствие этого щеткой замыкаются накоротко и одновременно коммутируются несколько секций. Последнее вызывает в каждой секции ЭДС взаимной индукции e_m . Кроме того, в секции возникает ЭДС e_v , вызываемая вращением секции в магнитном поле поперечной реакции якоря.

Сумма перечисленных ЭДС невелика. Однако, поскольку секция замкнута щеткой накоротко, это приводит к заметному дополнительному току в замкнутом контуре секции, в результате чего плотность тока под щеткой становится

неодинаковой. Под сбегаящим краем щетки плотность тока возрастает, что приводит к искрению под щеткой, особенно интенсивному в момент размыкания секции. Если не принять специальных мер для улучшения условий коммутации (уменьшения искрения под щетками), то наиболее ответственная часть машины - коллектор через непродолжительное время выйдет из строя.



Коммутируемая секция обмотки якоря (а), магнитное поле якоря (б), упрощенная схема замещения контура коммутируемой секции (в)

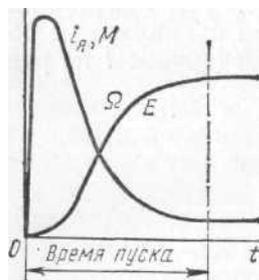
Для улучшения коммутации машины мощностью 1 кВт и более снабжаются дополнительными полюсами. В машинах с дополнительными полюсами щетки устанавливают на геометрической нейтрали. С помощью дополнительных полюсов в зоне коммутации создается магнитное поле, в результате чего в коммутируемых секциях индуцируется ЭДС, компенсирующая ЭДС e_L , e_M и e_v . Так как ЭДС e_L , e_M и e_v зависят от тока якоря, то для их компенсации при различных нагрузках обмотку дополнительных полюсов включают последовательно с якорем. Вследствие насыщения дополнительных полюсов при перегрузках машины условия коммутации ухудшаются и под щетками появляется недопустимое искрение. Наибольший допустимый ток машин постоянного тока определяется условиями коммутации и лежит для различных машин в пределах $(2 \div 3) I_{ном}$, где $I_{ном}$ - номинальный ток машины.

ЛЕКЦИЯ №9 ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвигатели преобразуют электрическую энергию в механическую энергию вращения. Механическая мощность $P = M\Omega$ (Вт) определяется развиваемым двигателем моментом M (Н·м) и угловой скоростью вращения Ω с⁻¹. Поэтому основной характеристикой двигателя является его механическая характеристика, зависимость скорости Ω или частоты вращения n от момента на валу Ω (M) или n (M).

Вращающий момент двигателя $M = c\Phi I_A$ определяется током якоря и магнитным потоком полюсов возбуждения и, следовательно, зависит от способа возбуждения. Различают двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Их обмотки возбуждения выполнены так же, как и у соответствующих

генераторов. Двигатели рассчитаны на длительную работу при токах, не превышающих номинальные. Многие эксплуатационные особенности двигателей зависят от того, постоянен или изменяется поток возбуждения при работе. Но электродвигателям присущи также общие свойства и процессы: свойство саморегулирования, процессы пуска и реверса, регулирования частоты вращения.



Изменение $i_{я}$ и $M(t)$, Ω и $E(t)$ при пуске двигателя

9.1 Пусковые характеристики двигателей.

Пуском называют процесс разгона якоря двигателя от неподвижного состояния до установившегося значения скорости. Пуск длится от долей секунды до нескольких десятков секунд. Пусковые качества двигателя характеризуют кратностью (к номинальному) пускового тока и пускового момента. Если не принять специальных мер, то пуск двигателя постоянного тока может сопровождаться недопустимо большим броском тока якоря и резким толчком момента на валу. Это объясняется тем, что если во вращающемся якоре ток $I_{я} = (U - E) / R_{я}$, то в момент включения на номинальное напряжение цепи неподвижного якоря в нем не наводится противо-э.д.с. ($E = 0$ при $\Omega = 0$). Ток включения — начальный пусковой ток — ограничивается только малым внутренним сопротивлением якоря:

$$I_{п} = U_{ном} / R_{я} \approx (10 \div 30) I_{ном}.$$

Такой большой ток вызывает опасное искрение на коллекторе и чрезмерно большой пусковой момент $M_{п} = c \Phi I_{п}$, создающий рывок или удар на валу, отрицательно воздействующий на передачу и механизм. Для предотвращения этого пуск электродвигателей производят пусковым реостатом с сопротивлением $R_{п}$, ограничивающим бросок тока до кратковременно допустимого значения:

$$I_{п, доп} = U_{ном} / (R_{я} + R_{п}) \leq (2 \div 2,5) I_{ном}.$$

Бросок пускового тока длится очень недолго, так как с разгоном якоря возникает противо-э.д.с, уменьшающая ток. При этом пусковой реостат полностью выводят (вручную или автоматически), иначе он будет нагреваться от потерь энергии. Пусковой ток ограничивают также снижением напряжения источника питания.

Двигатели малой мощности (до 1 кВт), пускают без реостатов, так как они имеют сравнительно большое сопротивление якоря.

Среди всех электродвигателей двигатели постоянного тока имеют лучшие пусковые качества. При относительно небольшом пусковом токе ($2 \div 2,5 I_{ном}$) они могут создавать достаточно большой пусковой момент ($2,5 \div 4 M_{ном}$). Это обеспечивает быстрый разгон приводимых ими механизмов.

Свойство саморегулирования. Все электродвигатели обладают свойством автоматически создавать вращающий момент $M_{вр}$, равный моменту статического сопротивления на валу M_c , когда частота вращения устанавливается неизменной.

Электромеханический процесс саморегулирования протекает следующим образом. Пусть двигатель вращался на холостом ходу:

$$M_{вр1} = M_{c1}, \Omega = \Omega_1.$$

Затем произошло увеличение момента сопротивления:

$$M_{c2} > M_{вр1} = M_{c1}.$$

Тогда в соответствии с известным уравнением механики вращения

$$M_{врц} = M_c = Jd\Omega/dt, \text{ где}$$

J - момент инерции вращающихся масс, появляется отрицательное ускорение $d\Omega/dt < 0$ и скорость якоря начинает падать. Но вместе со скоростью падает противо-э.д.с. $E = c\Omega\Phi$, а ток якоря $I_{я} = (U - E)/R_{я}$ и вращающий момент $M = c\Phi I_{я}$ возрастают. Когда вращающий момент станет равным возросшему моменту сопротивления $M_{врц2} = M_{c2}$, $d\Omega/dt$ станет равным нулю и установится значение $\Omega_2 < \Omega_1$. При установившейся скорости $M_{вр2} = M_{c2} = M = c\Phi I_{я}$. Следовательно, в работающем двигателе ток якоря

$$I_{я} = M/(c\Phi)$$

определяется моментом на валу и магнитным потоком возбуждения.

Изменение направления вращения (реверс). Направление вращения якоря двигателя можно изменить на обратное, изменив направление вращающего момента. Из формулы момента следует, что его знак изменится, если изменить направление тока в якоре или направление магнитных потоков полюсов. Реверс двигателей постоянного тока осуществляют переключением концов обмотки якоря.

9.2.. Двигатели параллельного и независимого возбуждения

Схема двигателя параллельного возбуждения приведена на рис. В цепи якоря включен пусковой реостат ПР, в цепи возбуждения — реостат для регулирования тока возбуждения (РВ). Обмотка возбуждения этого двигателя может быть включена на напряжение другого источника. Независимое возбуждение расширяет возможности регулирования частоты вращения двигателя.

Ток якоря при установившемся вращении определяется противодействующим моментом на валу и потоком полюса. Потоки полюсов в двигателе при $I_{в} = \text{const}$ можно считать постоянными: $\Phi = \text{const}$. Следовательно, в двигателях параллельного и независимого возбуждения ток якоря пропорционален моменту на валу.

Выведем выражение для механической характеристики двигателя $n(M)$ и выясним возможности регулирования частоты его вращения.

$$n = n_0(1 - M/M_{по}),$$

$$M_{по} = c_m \Phi I_{по} = c_m \Phi U / R_{я} - \text{начальный пусковой момент при пусковом токе } I_{п} = U / R_{я}.$$

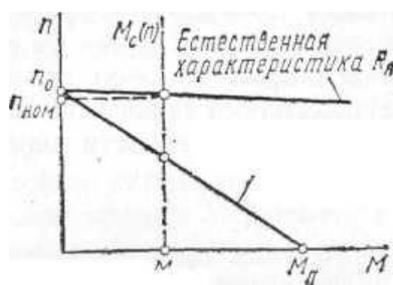
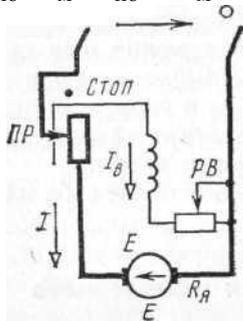


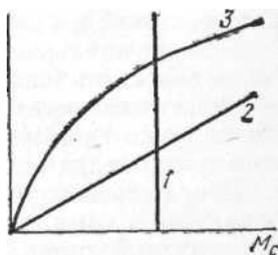
Схема двигателя параллельного возбуждения

Таким образом, механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет наклонную прямую, проходящую через точку холостого хода n_0 на оси ординат и точку пускового момента на оси абсцисс $M_{п0}$, $n = 0$. Механическая характеристика двигателя при номинальных $U = U_{ном}$, $\Phi = \Phi_{ном}$ называется естественной. Поскольку при пуске без реостата ($R_{п} = 0$) $M_{п0} \gg M_{п}$, точка $M_{п0}$ выходит за пределы графика. Естественная характеристика проходит через точки номинального режима $n_{ном}$, $M_{ном}$. При $M = M_{ном}$ снижение частоты вращения пропорционально отношению $R_{я}I_{яном}/U_{ном}$ и составляет всего 3-7% от n_0 . Естественная механическая характеристика двигателей параллельного и независимого возбуждения является «жесткой».

Значение частоты вращения при холостом ходе n_0 определяют по номинальной частоте $n_{ном}$ и соответствующим значениям противо-Э.Д.С. E_0 и $E_{ном}$. Из соотношения $E_0/E_{ном} = n_0\Phi/n_{ном}\Phi_{ном}$

$$n_0 = n_{ном} \frac{U_{ном}}{(U_{нов} - R_{я}I_{нов})k_{\phi}},$$

где $k_{\phi} = \Phi/\Phi_{ном}$, $E_0 = U_{ном}$



На рис. приведены три типичные механические характеристики механизмов в осях $n(M_c)$.

Прямая 1 — момент сопротивления подъемников, лебедок, транспортеров с постоянной переносимой массой, а также момент трения щеток о коллектор двигателя практически не зависят от частоты вращения. Прямая 2 — момент сопротивления генератора независимого возбуждения, якорь которого замкнут на резистор, а ток возбуждения неизменный, пропорционален частоте вращения. Кривая 3 — вентиляторы, центробежные насосы и компрессоры, гребные винты, центрифуги и другие создают момент сопротивления, пропорциональный примерно квадрату частоты вращения.

Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока возможно, тремя способами:

- 1) реостатным — изменением с помощью реостата
- 2) полюсным — изменением магнитных потоков полюсов

3) якорным — изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя.

9.3. ДВИГАТЕЛИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

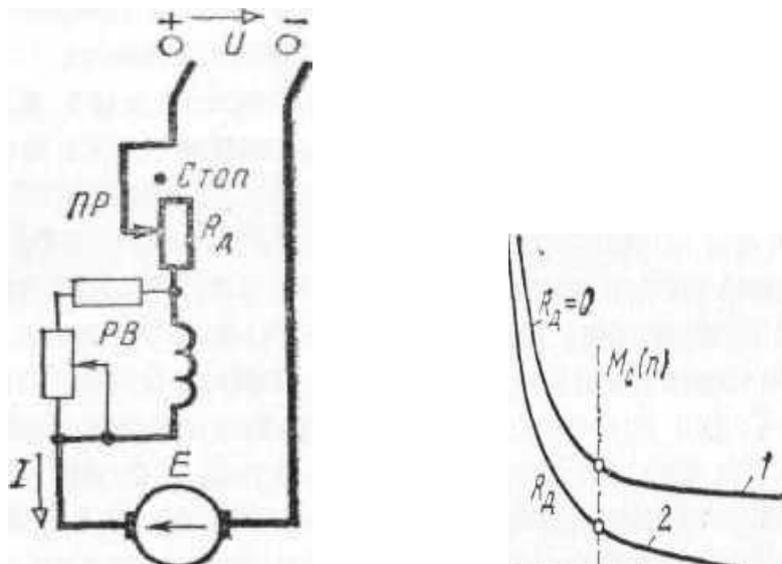


Схема двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. В этом двигателе ток якоря и ток возбуждения один и тот же. Ток якоря электродвигателя зависит от нагрузки на валу. Поэтому с изменением нагрузки в двигателе, изменяются магнитные потоки полюсов.

Механическая характеристика двигателя мягкая. При нагрузках близких к номинальному, магнитная система двигателя насыщается, $\Phi \approx \text{const}$ и гипербола проходит в наклонную прямую.

Регулирование частоты вращения двигателей последовательного возбуждения производят также тремя способами.

Реостатное регулирование (R_d) в цепи рабочего тока дает снижение скорости; оно так же неэкономично, как и во всех электродвигателях.

Безреостатное ступенчатое изменение напряжения на тяговых двигателях электротранспорта достигается групповым параллельным или последовательным подключением их к сети (в каждом моторном вагоне несколько двигателей).

Полюсное регулирование в двигателе последовательного возбуждения осуществляется шунтированием обмотки возбуждения реостатом $PВ$. Уменьшение тока возбуждения приводит к увеличению скорости при небольших нагрузках.

9.4. ДВИГАТЕЛИ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ.

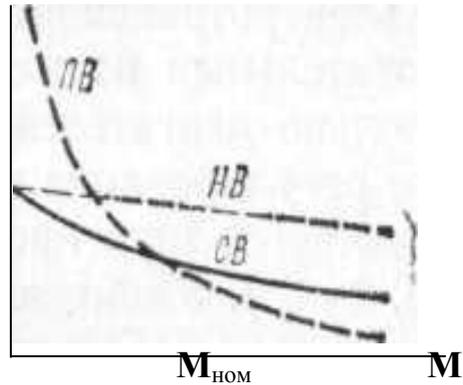
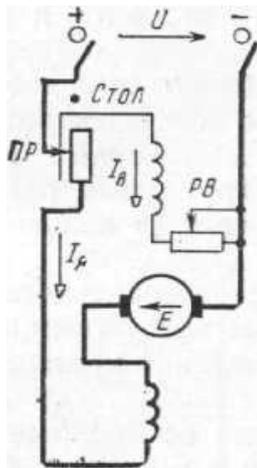


Схема двигателя смешанного возбуждения приведена на рис. На каждом полюсе такого двигателя имеются по две катушки: одна принадлежит параллельной, другая — последовательной обмотке. Основной обмоткой считается та, которая создает не менее 70% всей м.д.с. В этих двигателях последовательную обмотку включают в цепь тока якоря согласно с параллельной, т. е. так, что создаваемые ими магнитные потоки $\Phi_1(I)$ и $\Phi_2 = \text{const}$ оказываются направленными одинаково и складываются: $\Phi = \Phi_2 + \Phi_1(I)$. С увеличением нагрузки на валу возрастает ток якоря и поток последовательной обмотки. Результирующий поток и момент увеличиваются, скорость несколько снижается. Механические характеристики двигателей смешанного возбуждения (СВ), независимого возбуждения (НВ) и последовательного возбуждения (ПВ) приведены на рис.

Смешанное возбуждение дает двигателю преимущества разных способов возбуждения и «устраняет» недостатки. Так, из рис. следует, что такому двигателю со вспомогательной параллельной обмоткой не угрожает «разнос». Эта обмотка обеспечивает перевод двигателя электропоезда в режим торможения с отдачей энергии в сеть при движении по инерции, под уклон.

9.5. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Преобразование электрической энергии в механическую с помощью двигателей и механической в электрическую с помощью генераторов сопровождается потерями энергии, чему соответствуют определенные потери мощности. От значений потерь мощности зависит важнейший энергетический показатель машин постоянного тока — их КПД. Потери мощности в машинах приводят к их нагреванию.

В машинах постоянного тока различают следующие основные виды потерь мощности:

1. Потери мощности в сопротивлениях цепи якоря: $\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$. Как видно, потери мощности $\Delta P_{\text{я}}$ зависят от нагрузки машины. Поэтому их называют переменными потерями мощности.

2. Потери мощности в стали ΔP_C , вызванные главным образом вихревыми токами и перемагничиванием магнитопровода якоря при его вращении. Частично эти потери возникают из-за вихревых токов в поверхностном слое полюсных наконечников, вызванных пульсацией магнитного потока при вращении якоря.

3. Механические потери мощности $\Delta P_{\text{мех}}$, причиной которых является трение в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей о воздух.

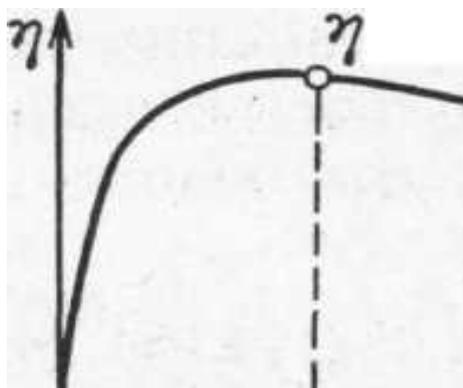
4. Потери мощности в цепи параллельной или независимой обмотки возбуждения: $\Delta P_B = U_B I_B = I_B^2 R_B$.

Потери ΔP_C , $\Delta P_{\text{мех}}$, ΔP_B при изменении нагрузки машин меняются незначительно, вследствие чего их называют постоянными потерями мощности.

КПД машин постоянного тока

$$\eta = P_2/P_1$$

где P_2 — полезная мощность машины (у генератора — это электрическая мощность, отдаваемая приемнику, у двигателя — механическая мощность на валу); P_1 — подводимая к машине мощность (у генератора — это механическая мощность, сообщаемая ему первичным двигателем, у двигателя — мощность, потребляемая им от источника постоянного тока; если генератор имеет независимое возбуждение, то P_1 включает в себя также мощность, необходимую для питания цепи обмотки возбуждения).



Зависимость КПД машин постоянного тока от полезной мощности

При увеличении полезной мощности КПД сначала возрастает при некотором значении P_2 , достигает наибольшего значения, а затем уменьшается. Последнее объясняется значительным увеличением переменных потерь, пропорциональных квадрату тока. Машины рассчитывают обычно таким образом, чтобы наибольшее значение КПД находилось в области, близкой к номинальной мощности $P_{2\text{ном}}$. Номинальное значение КПД машин мощностью от 1 до 100 кВт лежит примерно в пределах от 0,74 до 0,92 соответственно.

9.6. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Для привода электроинструмента, швейных машин, небольших вентиляторов, пылесосов, в устройствах автоматики и т. д. находят применение коллекторные двигатели малой мощности, рассчитанные на питание от сети как постоянного, так и однофазного переменного тока частотой 50 Гц. Универсальные коллекторные двигатели устроены принципиально так же, как двухполюсные двигатели постоянного тока.

Для получения большего вращающего момента угол сдвига фаз между магнитным потоком возбуждения и током якоря должен быть минимальным. С этой целью универсальные двигатели изготавливаются с последовательной обмоткой возбуждения.

Так как при питании переменным током возникает пульсирующий магнитный поток, то магнитопровод статора изготавливается в отличие от двигателей постоянного тока из отдельных стальных листов.

ЛЕКЦИЯ №10 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

10.1 Общие сведения об асинхронных машинах.

Основным потребителем электрической энергии в электрической сети являются электрические двигатели. Электрическим двигателем называется такая электрическая машина, которая преобразует электрическую энергию в механическую. Они служат для приведения в движения станков, насосов, вентиляторов, конвейеров. В строительстве они приводят в действие подъемные краны, перемещают бетон. Немыслимо ни одно производство, в котором отсутствовали бы электрические двигатели. Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели изобретенные в 1891г. великим русским электротехником м.о. доливо-добровольским . Эти двигатели составляют не менее 95% всех электрических двигателей, применяемых в различных отраслях промышленности.

Большое распространения асинхронного двигателя получили потому что имеют преимущества перед другими типами двигателей;

1. Самая простая конструкция;
2. Высокая надежность в работе;
3. Низкая стоимость.

С развитием тиристорных преобразователей асинхронные двигатели все чаще применяются и для регулируемого электропривода. Наряду с весьма ценными качествами асинхронные двигатели имеют и недостатки, к числу которых прежде всего надо отнести:

1. Плохие пусковые характеристики;
2. Влияние (отрицательное) на $\cos \varphi$;
3. Трудность регулирования частоты вращения.

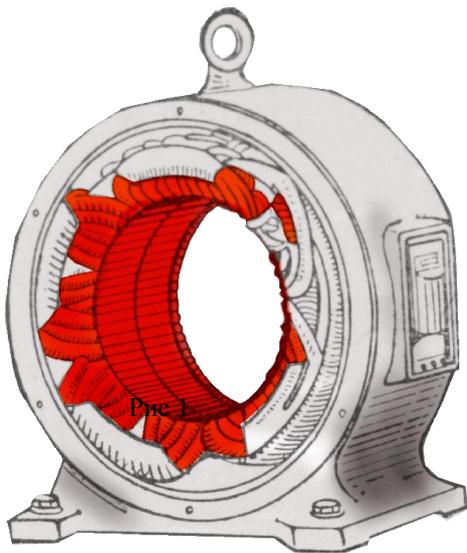
Асинхронные машины могут работать и как генераторы, но на практике это в настоящее время не применяется.

Мощности трехфазных асинхронных двигателей колеблются в широких пределах от долей ватта до нескольких тысяч кВт.

Двигатели мощностью до 0,5 кВт выполняют как трехфазными.

10.2 Устройство асинхронных двигателей.

Основные части асинхронного двигателя: статор и ротор. статоры устроены одинаково: отличаются только конструкцией ротора. статор состоит из станины, которая отливается из стали, чугуна или алюминия. внутри вмонтирован сердечник, представляющий собой полый цилиндр и набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,5мм, изолированных друг от друга лаком или другим изоляторами которые уменьшают потери на вихревые токи. листы имеют



форму колец со штампованными пазами. в пазы, находящиеся на внутренней поверхности цилиндра укладывается обмотка, выполненная медным изолированным проводом круглого или прямоугольного сечения, реже из алюминиевого привода. обмотка статора состоит из трех отдельных частей называемых фазами. фазы обмоток могут быть соединены между собой звездой или треугольником.

обмотка статора служит для получения вращающегося магнитного поля машины.

рис.10.1

ротор состоит из сердечника цилиндрической формы, набранного из тонких отдельных дисков с пазами, и

обмотки, расположенной в этих пазах.

в зависимости от конструкции обмотки ротора различают:

1. асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором:
2. асинхронные двигатели с фазным ротором или контактными кольцами.

1. обмотка ротора короткозамкнутого двигателя выполняется медными неизолированными стержнями, уложенными в пазы. по обоим концам эти стержни замыкаются накоротко с помощью двух медных колец. двигатели с таким

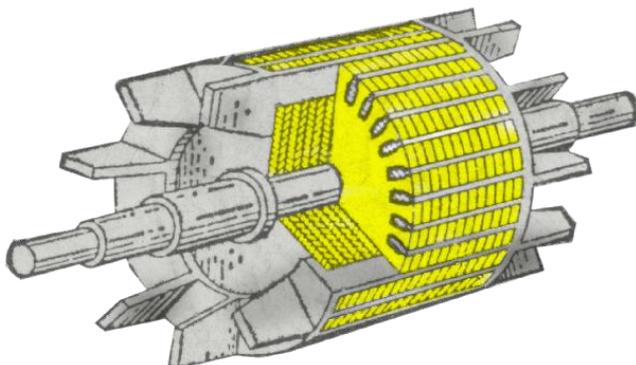


Рис 10.2

исполнением выпускаются мощностью более 100 квт. в менее мощных машинах пазы заливают алюминием. по обоим торцам ротора заодно отливаются алюминиевые кольца, замыкающие накоротко алюминиевые стержни. отливаются из алюминия такие и лопасти охлаждающего вентилятора. если такую обмотку представить отдельно от сердечника ротора, то она имеет вид беличьего

колеса или беличьей клетки, отсюда и название- двигатель с беличьей клеткой.

При полюсном управлении двигателя к напряжению управления U_y подключается обмотка главных полюсов, к сети постоянного тока — обмотка якоря. Регулирование частоты вращения якоря производится также изменением напряжения управления, но в этом случае уже за счет изменения магнитного потока двигателя.

10.3 Получение вращающегося магнитного поля статора.

Вращающееся магнитное поле в простейшем случае может быть получено, если три обмотки, расположенные в пространстве под углом 120° друг от друга, питать симметричной трехфазной системой токов. В трехфазном асинхронном двигателе первое требование удовлетворяется соответствующим расположением катушек на сердечнике статора, а второе — подачей на катушки статора симметричной трехфазной системы напряжений. Построим график трехфазной системы токов и упрощенные картины магнитного поля для следующих моментов времени:

$$T=0; \quad t_2=T/2; \quad t_3=3/4T; \quad t_5=T$$

Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ . Из картинок рис8.6 видно , что за время соответствующее целому периоду поле делает один оборот. Если частота тока f_1 , то за одну секунду магнитное поле повернется на n оборотов, а т.к. частота вращения измеряется числом оборотов в минуту, то $n=60 f_1$. где f_1 - частота вращения магнитного поля. Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ .

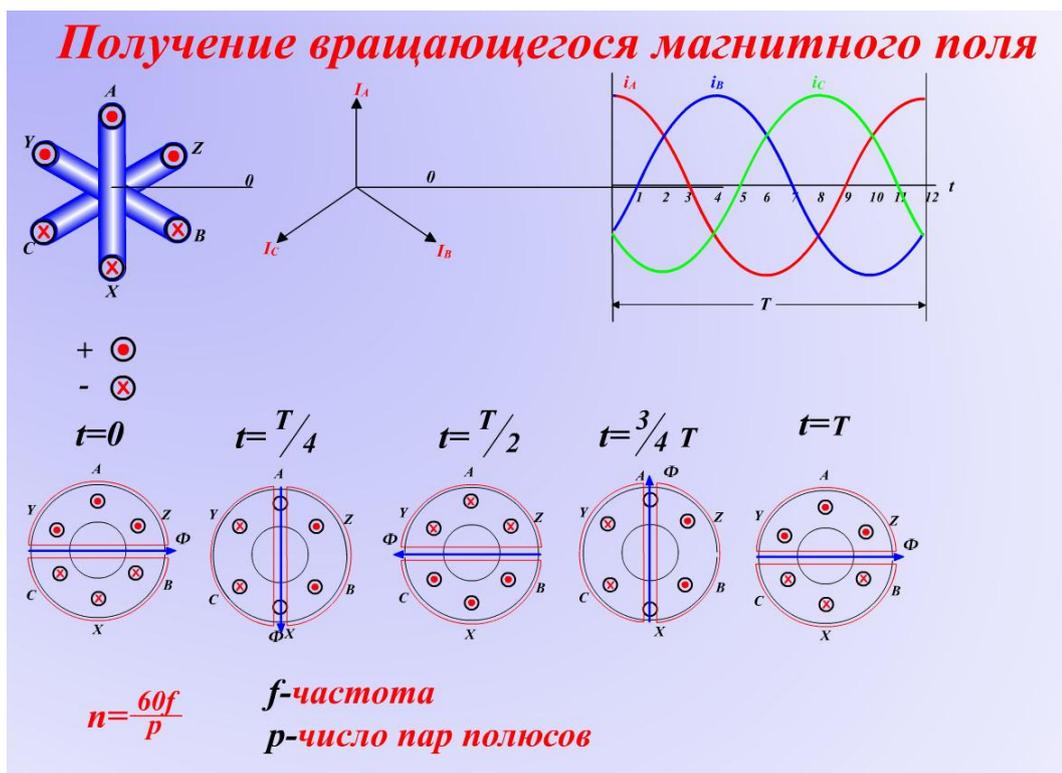


Рис.10.3

Будем считать, что если ток на графике имеет положительный знак, то в катушке он направлен от начала фазы к её концу. В этом случае в проводах катушки, присоединенных к началу фазы ток в одном направлении, а на конце фазы в другом, т.е. “+” ,а “-“ . Из картинок рис8.6 видно , что за время соответствующее целому периоду поле делает один оборот. Если частота тока f_1 , то за одну секунду магнитное поле повернется на n оборотов, а т.к. частота вращения измеряется числом оборотов в минуту, то $n=60 f_1$. где f_1 - частота вращения магнитного поля.

Если на статоре имеется многополюсная обмотка, создающая $2p$ полюсов, то за один период T магнитное поле повернется на 360 электрических градусов или $1/p$ оборотов.

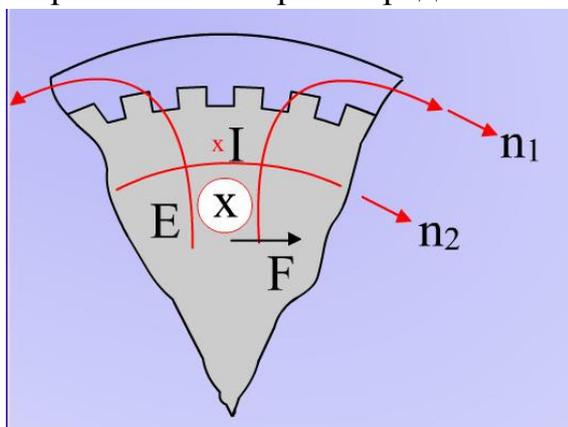
При частоте f поле повернется за одну секунду на $1/p f$ об/с следовательно, частота вращения магнитного поля будет

$$n = 60f/p$$

Частота вращения магнитного поля называется также синхронной частотой вращения. Число полюсов зависит от числа катушек фазы.

10.4 Принцип действия асинхронных двигателей.

При подключении обмоток статора к трехфазной сети возникает вращающееся магнитное поле, которое будет пересекать обмотки ротора и наводить в них ЭДС E_2 , направление которой определяем по правилу правой руки. Так как обмотки ротора замкнуты накоротко, в них появляется ток i , направление которого совпадает с направлением ЭДС. Ток ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем создает электро-магнитную силу F . Направление силы определяем по правилу левой руки. Сила направлена в сторону вращения магнитного поля. Произведение среднего значения всех сил в роторе на плечо $D_p/2$ определяет величину вращающегося момента асинхронного двигателя.



Если этот момент достаточен для преодоления момента сопротивления, то ротор начнет ускоренное движение в направлении вращения магнитного поля машины. По мере увеличения частоты вращения n_2 скорость пересечения проводников ротора магнитным полем n_0-n_2 будет уменьшаться, будет уменьшаться ЭДС и ток ротора, а следовательно и вращающий момент. Если бы ротор, увеличивая свою скорость, начал бы вращаться со скоростью поля, то скорость пересечения магнитным полем проводников ротора была бы равна нулю и не было бы ЭДС и тока в роторе, а следовательно и вращающего момента. Таким образом машина работает двигателем при $n_2 < n_0$. Частота вращения ротора не совпадает с частотой вращения магнитного поля, или ротор вращается не одновременно с магнитным полем, откуда происходит название двигателя – асинхронный (неодновременный).

10.5 Основные соотношения между некоторыми величинами асинхронного двигателя при его работе.

1) скольжение.

Частота пересечения магнитным полем статора проводников ротора называется частотой скольжения- n_s

$$N_s = N_0 - N_2$$

отношение частоты скольжения к частоте вращения магнитного поля называется скольжением и обозначается s

$$s = n_s / n_0 = n_0 - n_2 / n_0$$

Часто скольжение выражается в %

$$s \% = n_s / n_0 = n_0 - n_2 / n_0 \cdot 100$$

При холостом ходе частота вращения ротора приближается к частоте вращения

магнитного поля, тогда

$$s = n_s / n_0 = n_0 - n_2 / n_0 \quad 0 \text{ т.к. } \rightarrow n_2 \rightarrow n_0$$

Таким образом, скольжение асинхронных двигателей может приниматься от 1 до 0, т.е. $0 < s < 1$. При нормальной нагрузке скольжение асинхронных двигателей может быть от 1 до 6% в зависимости от мощности двигателя.

(1-2)% - для двигателей десяти кВт и выше;

(3-4)% - для двигателей 1-10 кВт.

(5-6)% - для двигателей меньше 1кВт

2) Частота вращения ротора.

Из формулы скольжения имеем:

$$n_2 = n_0(1 - s) = 60f/p(1 - s) = 3000/p(1 - s)$$

Выпускаемые нашей промышленностью двигатели общего применения серии А и АО имеют число пар полюсов от 1 до 4, а серии А2 и АО2 от 1 до 5.

Рассмотрим какой может быть частота вращения для двигателей средней мощности серии А2 и АО2 для которых $S=4\%$.

$$p=1; n_0=3000 \text{ об/мин}; n_2=3000(1-0.04)=2880 \text{ об/мин}$$

$$p=2; n_0=1500 \text{ об/мин}; n_2=1500(1-0.04)=1440 \text{ об/мин}$$

$$p=3; n_0=1000 \text{ об/мин}; n_2=1000(1-0.04)=960 \text{ об/мин}$$

$$p=4; n_0=750 \text{ об/мин}; n_2=750(1-0.04)=720 \text{ об/мин}$$

$$p=5; n_0=600 \text{ об/мин}; n_2=600(1-0.04)=576 \text{ об/мин}$$

Если двигатель большой мощности, то частота несколько выше и наоборот, двигатель небольшой мощности и частота ниже.

3) Частота тока в роторе

Вращающееся магнитное поле, пересекая проводники ротора с частотой скольжения n_s , наводит в ней ЭДС с частотой

$$f_2 = pn_s / 60 = p(n_0 - n_2) / 60 * n_0 / n_0 = pn_0 / 60 * n_0 - n_2 / n_0 = f_1 * s$$

При подвижном роторе частота тока в нем равна частоте тока статора $f_2 = f_1$

При идеальном холостом ходе $f_2 = 0$.

При нормальной работе скольжения асинхронного двигателя составляет (1-6)%, тогда частота тока в роторе будет составлять (0,5-3)Гц. При такой небольшой частоте тока в роторе потери в стали ротора очень малы и ими обычно пренебрегают.

4) ЭДС создаются во вращающейся и в неподвижной обмотках. Они индуктируются вследствие изменения потокосцепления основного вращающегося магнитного поля с неподвижными и подвижными контурами обмоток.

Вращающееся магнитное поле индуктирует в каждом витке обмотки статора ЭДС, действующее значение которой равно

$$E_1 = 4.44 \Phi f_1$$

А для всей обмотки

$$E_1 = 4.44 \Phi f_1 w_1 k_{y1}$$

Где w_1 - число витков обмотки ротора;

k_{y1} – обмоточный коэффициент, учитывающий не одновременность пересечения проводников обмотки статора магнитным полем.

ЭДС индуктируемая в подвижном роторе:

$$E_{2s} = 4.44 \Phi f_2 w_2 k_{y2} = 4.44 \Phi f_1 s w_2 k_{y2}$$

Где w_2 - число витков обмотки ротора;

k_{y2} – обмоточный коэффициент,

5) ток ротора и сдвиг фаз между ЭДС и током в роторе.

По закону Ома $I_2 = E_{2s} / Z_{2s}$, где Z_{2s} полное сопротивление. Оно меняется и зависит от скольжения

$$Z_{2s} = \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}$$

Вращающий момент зависит от тока и магнитного потока. Для увеличения

магнитного потока нужно увеличить габариты машины. Увеличение тока тоже не

всегда целесообразно.

Эта формула вращающего момента неудобна для анализа.

10.6 Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения.

$$M_{вр} = C_m \Phi_m I_2 \cos \psi_2$$

Нам нужно заменить величины Φ_m , I_2 , $\cos \psi_2$, т.к. нам их трудно измерит при вращении

$$E_1 = 4.44 \Phi_m f_1 w_1 k_{y1}, \text{отсюда}$$

$$\Phi_m = E_1 / 4.44 f_1 w_1 k_{y1}$$

$$I_2 = \frac{E_2 S}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$\text{т.к. } E_2 = \frac{E_1}{k}$$

$$I_2 = \frac{E_1 S}{k \sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$M_{\text{врш}} = C_2 \frac{E_1}{4,44 f \omega K_{y1} K} * \frac{E_1 S}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}} * \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}}$$

$$= \frac{C_2}{4,44 f \omega K_{y1} K} E_1^2 R_2 \frac{S}{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}$$

где C_2 - постоянная машина.

$$\frac{C_2}{4,44 f \omega K_{y1} K} = C$$

Пренебрегая падением напряжения в статоре и считая $E_1 \approx U_1$, получим
Наибольший интерес представляют значения момента при скольжениях.

$$M_{\text{вр}} = C U_1^2 R_2 \frac{S}{R_2^2 + X_{2s}^2 S^2}$$

$$S=1 \Rightarrow M_{\text{пуск}}$$

$$S_k = \frac{R_2}{X_2} \Rightarrow M_{\text{max}} \quad \text{критическое скольжение}$$

$$S=0 \Rightarrow M=0$$

1) $n_2 = 0; S = 1$

$$M_{\text{пуск}} = C U_1^2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_{2s}^2} \approx C U_1^2 \frac{1}{5 X_2}$$

2) $S_k = \frac{R_2}{X_2} = \frac{1}{5} = 0,2;$

$$M_{\text{max}} = C U_1^2 \frac{1}{2 X_2}$$

3) $n_2 = n_1; S = 0$

$$M_{\text{вр}} = 0$$

$$M_{\text{пуск}} = 40 \% M_{\text{max}}$$

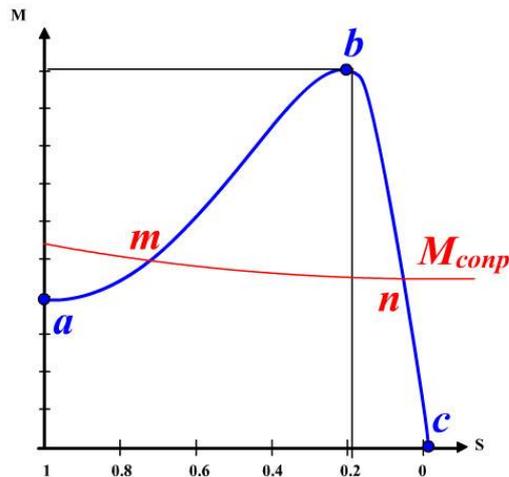


Рис 8

ав- зона неустойчивой работы,
 вс- зона устойчивой работы.

При $M_{сопр} = M_{вр}$: $n = const.$

ЛЕКЦИЯ №11 ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

11.1 Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Механическая характеристика- это зависимость скорости вращения от нагрузки на валу двигателя.

$$n_2 = f(M_2)$$

$$M_{вр} = M_0 + M_2, \text{ где}$$

M_0 момент сопротивления, создаваемый самим двигателем,

M_2 полезный момент.

Если $M_2 = 0$, то $M_{вр} = M_0$

При нормальной нагрузке $M_{вр} \approx M_2$

Построение характеристики $M_{вр} = f(s)$

Зная, что $s = (n_0 - n_2) / n_0$ можно сделать вывод, что $M_{вр} = f(s)$ нужна характеристика

$n_2 = f(M_{вр})$, т.к. тоже самое, но они меняются местами.

□ $n_2 = f(M_2)$ - вывернутая кривая $M = f(s)$

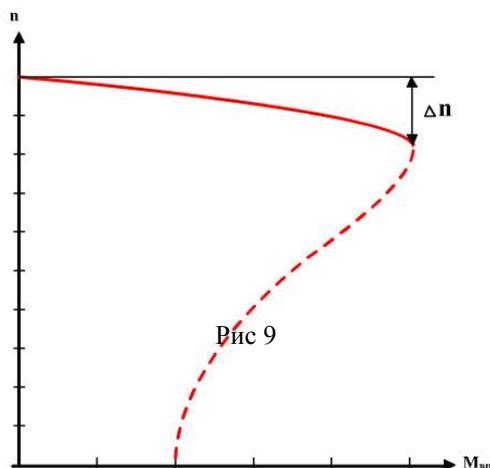
Для механической характеристики интерес представляет рабочая часть, она дана сплошной линией.

** - изменение скорости при нагрузке.

Рассмотрим рабочую часть.

Если $s = 0.04$, то $s^2 = 0.0016$

Этой величиной можно пренебречь, т.е. $x_2^2 s_2^2 \approx 0$ (это только в рабочей части характеристики).



$$M = cU_1^2 \frac{S}{R_2}$$

$$U_1 = const$$

$$R_2 = const$$

Все постоянные величины обозначены одним коэффициентом C , т.е.

$$M = c s$$

Это уравнение прямой линии; т.е. рабочая часть представляет прямую линию, т.е. это только при небольших скольжениях. Если изменение скорости мало при изменении нагрузки, то характеристика называется жесткой. Так асинхронные двигатели нормального использования.

11.2. Влияние активного сопротивления ротора на характеристики двигателя.

Рассмотрим влияние активного сопротивления ротора на величину вращающего момента.

1) Из формулы $M_{max} = cU_1^2 \frac{1}{2X_2}$ видно, что величина активного сопротивления на величину максимального.

2) Максимальный момент наступает при критическом скольжении $s_k = \frac{R_2}{X_2}$, а отсюда следует, что изменение активного сопротивления вызывает изменение критического скольжения, т.е. смещение точки максимального момента, но не изменяет его величины.

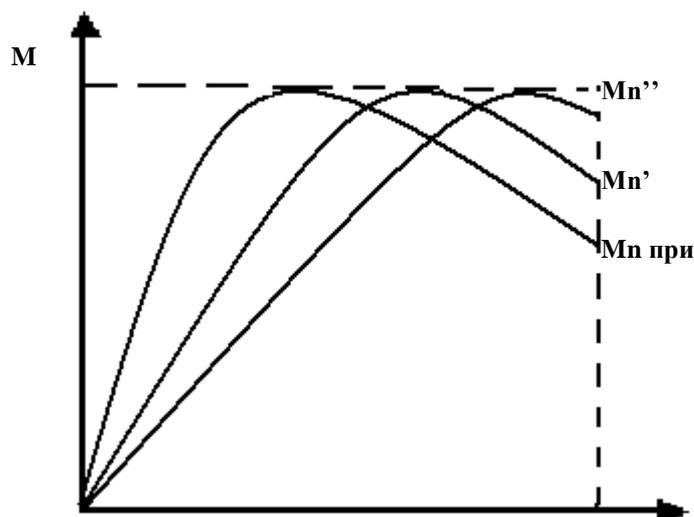
Рассмотрим четыре характеристики, полученные при различных сопротивлениях ротора $R_2 < R_2' < R_2'' < R_2'''$, R_2 - активное сопротивление ротора;

$$R_2' = R_2 + R_g'; \quad R_2'' = R_2 + R_g''; \quad R_2''' = R_2 + R_g''';$$

Соответственно $s_k < s_k' < s_k'' < s_k'''$

$$s_k = \frac{R_2}{X_2}; \quad s_k' = \frac{R_2'}{X_2}; \quad s_k'' = \frac{R_2''}{X_2}; \quad s_k''' = \frac{R_2'''}{X_2};$$

Построим эти характеристики и по ним сделаем заключение:



Анализируя эти характеристики сделаем следующие выводы:

1. Изменение активного сопротивления изменяет наклон рабочей части характеристики;
2. Увеличение сопротивления вызывает увеличение пускового момента.

11.3 Характеристики асинхронного двигателей

Свойство всех электрических двигателей определяются по совокупности трех видов характеристик: пусковых, рабочих, регулировочных.

I. Пусковые характеристики представляют собою пусковую операцию от момента включения двигателя в ход до момента переход к установившемуся режиму работы. К ним относятся:

1. Кратность пускового тока

$$k_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$$

2. Кратность пускового момента

$$k_i = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$$

3. Время пуска ($t_{\text{пуск}}$)

4. Сложность пусковой операции

5. Экономичность пуска

а) стоимость пусковой аппаратуры

б) наличие дополнительных потерь мощности при пуске.

II. Рабочие характеристики определяют собой свойства двигателя при установившемся режиме работы. К рабочим характеристикам относятся зависимости различных параметров двигателя от изменения нагрузки на валу.

К ним относятся: n ; M ; $\cos\varphi$; η ; s ; I ; $P=f(P_2)$

III. Регулировочные характеристики определяют собою свойства двигателя при регулировании скорости вращения.

К ним относятся: n ; M ; $\cos\varphi$; η ; s ; I ; $P=f(P_2)$

1) пределы регулирования, определяемые отклонением;

2) характер регулирования- плавный или ступенчатый;

3) сложность операции регулирования;

4) экономичность регулирования;

а) стоимость регулировочной аппаратуры;

б) наличие дополнительных потерь мощности при регулировании.

11.4. Рабочие характеристики АД.

Рабочими характеристиками называется зависимость параметров двигателя от изменения нагрузки на валу.

К ним относятся: n , M , s , $\cos\varphi$, η , P_1 , $I_1=f(P_2)$

*1) $n = f(P_2)$

Исходим из характеристики $n = f(M_2)$, поэтому $n = f(P_2)$ должна иметь тот же вид, что и $n = f(M_2)$

2) $M = f(P_2) \rightarrow 1$, где M_2 - полезный вращающий момент на валу двигателя $M > M_2$ на величину M_0 $M = M_2 + M_0$

, где M - вращающий момент, развиваемый двигателем; M_0 - момент на преодоление сил трения и сопротивления силы трения не зависят от скорости, т.е. $M_0 = \text{const}$, т.е. M зависит от величины M_2

$$M_2 = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}}, \text{ т.к. } n \text{ - немного меняется кривая } M_2=f(P_2) \text{ загибается немного}$$

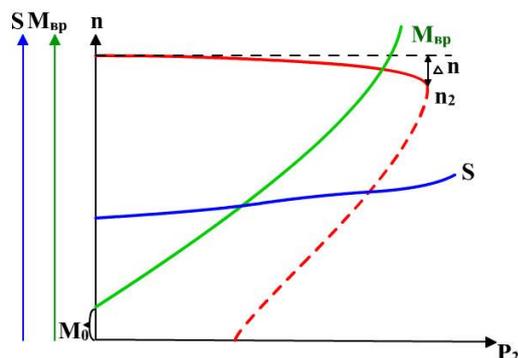
вверх, а не прямая линия.

Зависимость $M = f(P_2)$ получается если прибавит M_0 .

1) $S=f(P_2)$

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

С увеличением нагрузки скорость n_2 уменьшается а скольжение увеличивается.



4) $\cos \varphi = f(P_2) \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$

Реактивная мощность Q в электрических цепях идет на создание магнитного потока машины $Q \rightarrow \Phi$

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = \frac{P_2 + P}{\sqrt{(P_2 + P)^2 + Q_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{Q_1^2}{(P_2 + P)^2}}}$$

$$E_1 = 4044 \Phi_m f_1 \omega_1 k_{y1} = U_1 = \text{Const}$$

k_{y1} - обмоточный коэффициент. Отсюда делаем вывод, что $\Phi = \text{const}$, т.е. $Q = \text{const}$ допуская некоторые неточности можно считать.

Полученное выражения легчи анализировать.

При $P_2=0, \cos\varphi$ - минимален, но не нуль. При увеличении $P_2 \rightarrow \cos\varphi$ увеличивается, но никогда не может быть равен 1 асинхронных двигателей.

Уменьшение $\cos\varphi$ связано с тем что при больших токах возникают большие рассеяния и Q начнет возрастать

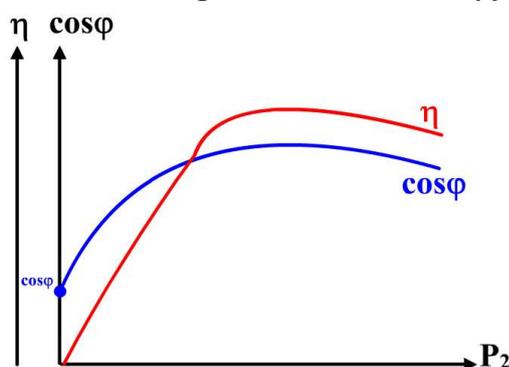
5) $\eta=f(P_2)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P}{P_2}}$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

Если нагрузка на валу двигателя равна нулю,

Даже при малой нагрузке $P_2=\Delta P$; $\eta=50\%$, поэтому вначале идет быстрое увеличение кпд, потом он растет медленнее и даже уменьшается. При больших токах знаменатель дроби увеличивается быстрее числитель и η уменьшается.



Асинхронные двигатели не должны работать при малых нагрузках.

1) $P_1=f(P_2)$

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

$$\Delta P = P_m + P_{cm} = P_{mex}$$

при $P_2=0, P_1=\Delta P$, поэтому характеристика сдвинута на величину ΔP .

Если бы ΔP не менялись, то зависимость $P_1=f(P_2)$, была бы прямая линия, но так как R_m пропорциональны квадрату тока –это не прямая.

2) $I_1=f(P_2)$

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{P_2}{\sqrt{3}U \cos \varphi \eta}$$

При $P_2=0$ ток не будет равен нулю, т.к. $\eta=0$

$$I_{10} = \frac{\Delta P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_0}$$

Где $\cos\varphi_0$ - коэффициент мощности при холостом ходе.

При увеличении нагрузки P_2 возрастает, но также возрастают $\cos\varphi$ и η , т.е. ток I практически не меняются. В дальнейшем $\cos\varphi$ и η почти не возрастают или даже уменьшаются, поэтому ток I будет резко возрастать.

ЛЕКЦИЯ № 12

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

12.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН.

Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник М.О. Доливо-Добровольский. Этот генератор имел мощность 230 кВА, приводился во вращение от гидротурбины и обеспечивал электроснабжение международной электротехнической выставки в г. Франкфурте в 1891г. по четырехпроводной электрической линии трехфазного тока. Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовалось их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин. Особенно большие выгоды в этом отношении дало применение в крупных машинах водородного и водяного охлаждения.

Как все электрические машины, синхронные машины обратимы: они могут работать в режимах и генератора и двигателя. Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока; их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах).

Трехфазные синхронные генераторы – самые мощные электрические машины. Технический прогресс в энергетике характеризуется концентрацией мощностей электростанций и энергоагрегатов, их блочной компоновкой. Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы. Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы – гидротурбинами, дизель-генераторы – двигателями внутреннего сгорания.



Рис.1.

Трехфазные синхронные двигатели также являются самыми мощными среди всех электродвигателей. Так, единичная мощность синхронных двигателей для крупных насосов, компрессоров, воздуходувок достигает нескольких десятков мегаватт. Синхронные машины используют в качестве электродвигателей при мощности 100 кВт и выше для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения.

Особенностью синхронной машины, работающей в энергосистеме, является возможность регулирования ее коэффициента мощности по значению и характеру. Поэтому для улучшения cosφ крупных электроустановок, а также для регулирования напряжения в сетях на электрических подстанциях устанавливают специальные синхронные двигатели, работающие в режиме холостого хода и потребляющие опережающий по фазе ток. Их называют компенсаторами реактивной мощности. Мощность крупных синхронных компенсаторов составляет 50, 100, 160 Мвар.

Разумеется, выпускаются синхронные генераторы и двигатели и значительно меньших номинальных мощностей. Синхронные генераторы мощностью до десятков или сотен киловатт используют как автономные источники питания с приводом от двигателей внутреннего сгорания.

12. 2. Устройство синхронных машин.

Синхронные машины состоят из двух основных частей: статора и ротора. Статор – неподвижная часть машины, а ротор – вращающаяся. Статор состоит из станины пальцеобразной формы и внутри станины – кольцеобразного сердечника. Станина отливается из стали. Сердечник статора набирается из штампованных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком – для уменьшения потерь на вихревые токи. На внутренней образующей листов вырублены пазы, которые создают каналы для укладки проводников обмотки. Пакет листов статора запрессован в корпус, который имеет соединительные элементы (лапы, торцевой фланец и т.д.) для крепления к неподвижному жесткому основанию. В пазах статора располагается трехфазная обмотка, выполненная медным изолированным проводом. Обычно обмотку статора соединяют звездой.

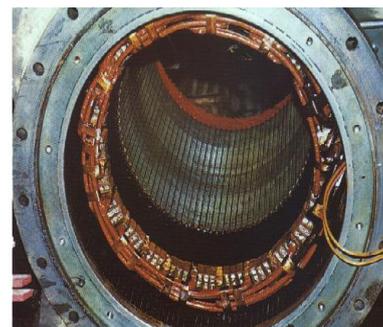


Рис.2. Статор.

Внутри статора помещается ротор. В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора: *неявнополюсную* – с неявно выраженными полюсами и *явнополюсную* – с явно выраженными полюсами.

Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя и более полюсами (гидрогенератор). Явнополюсный ротор – это сердечник цилиндрической формы, на поверхности которого укреплены полюса. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и закрепляют с помощью полюсных наконечников. Соответственно, полюс состоит из полюса и полюсного наконечника, который служит для равномерного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором.

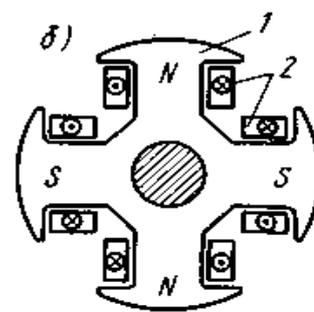


Рис.3.
Явнополюсный ротор
1-СЕРДЕЧНИК

На сердечнике полюса располагается обмотка, выполненная медным изолированным проводом. Общее число полюсов равно $2p$.

двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин изготавливают, как неявнополюсным ротором.

неявнополюсный ротор представляет собой сердечник цилиндрической формы, набранный из отдельных пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. В сердечнике ротора имеются отверстия – пазы, в которые укладывается обмотка, выполненная медным изолированным проводом. обмотка ротора соединена таким образом, что образуется всего два полюса или одна пара, эти полюса неявно выражены.

ротор крепится внутри статора с помощью подшипников и подшипниковых щитов.

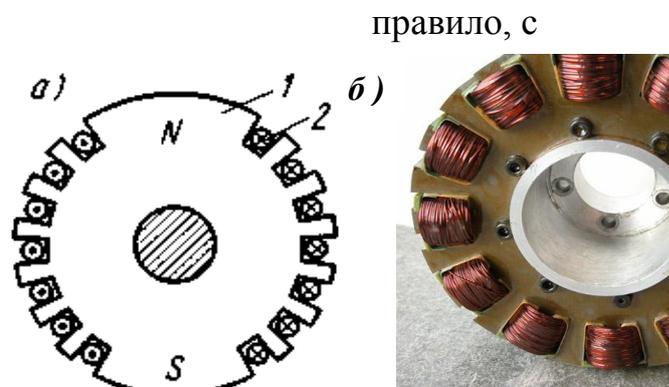


Рис.4. Неявнополюсный ротор.

рис. 5. внешний вид генератора.

3. принцип действия и характеристики синхронных генераторов.

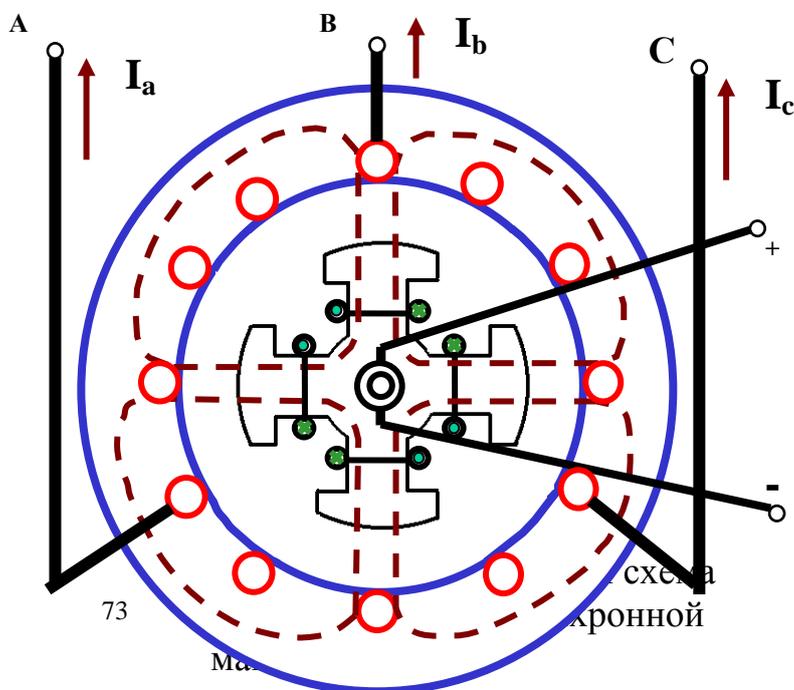
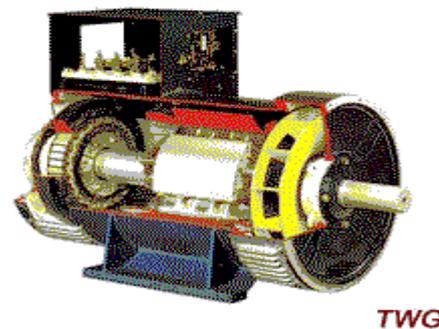
в обмотку ротора подается постоянный ток с помощью двух колец, находящихся на оси ротора и щеток, которые прижимаются к кольцам. а сам ротор приводится во вращение первичным двигателем, например, с помощью турбины. за счет тока в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое при вращении пересекает проводники статора и индуцирует в них переменную эдс e , изменяющуюся с частотой:

$$f_1 = pn_2/60 \quad (1).$$

где n_2 – скорость вращения ротора.

направление индуцированной эдс определяется по правилу правой руки.

если обмотку статора



подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток i_a создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого:

$$n_1 = 60f_1/p \quad (2).$$

сравнивая выражения (1) и (2) получаем, что $n_1 = n_2$, т.е. скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля. отсюда и название «синхронный», т.е. одновременный.

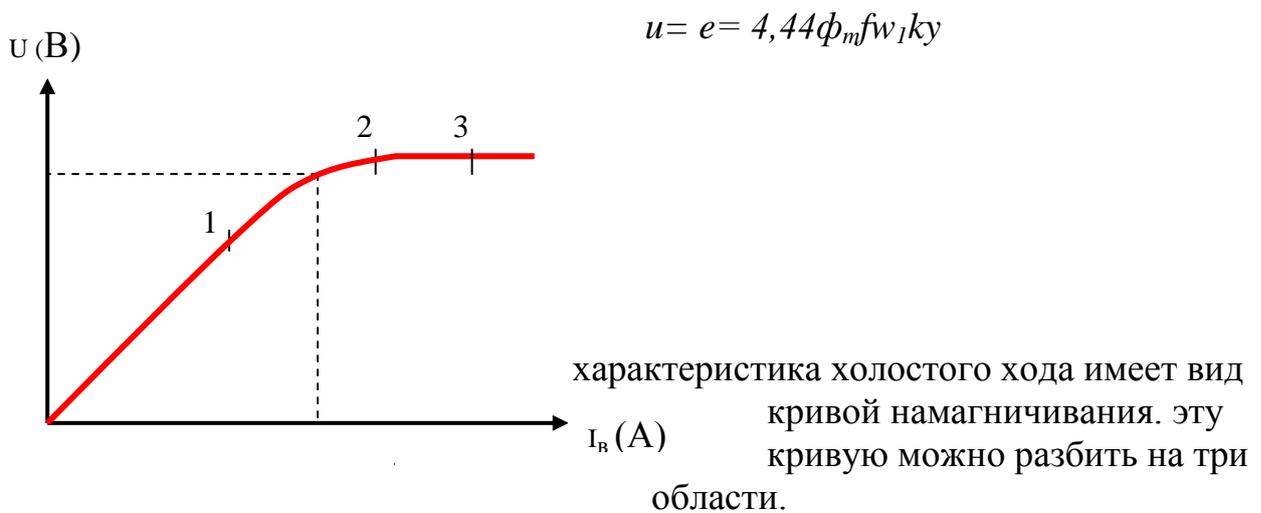
основные характеристики синхронных генераторов.

различают следующие характеристики синхронных генераторов:

- характеристика холостого хода;
- внешняя характеристика;
- регулировочная характеристика.

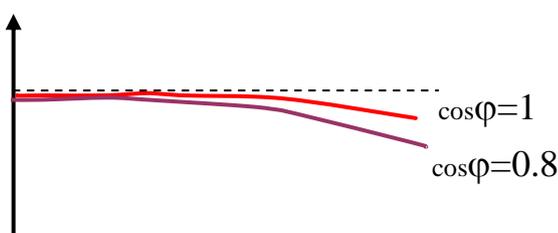
рассмотрим эти характеристики.

1. характеристикой холостого хода называется зависимость напряжения на зажимах генератора от тока возбуждения при условии, что нагрузка равна нулю. $u = f(i_e)$ при $i_n = 0; n = const.$



- 0-1 – область ненасыщенного состояния машины;
- 1-2 – область полунасыщенного состояния машины;
- 2-3 – область насыщения.

2. внешней характеристикой называется зависимость напряжения от тока нагрузки при постоянном токе возбуждения и $\cos\varphi$. $u = f(i)$ при $i_e = const$ и $\cos\varphi = const.$
 в синхронном генераторе большое реактивное сопротивление: $x = 10r.$
 Δu – потери напряжения.



$$u = u_0 - \Delta u$$

$$u_0 \approx e$$

$$u = u_0 - i(rcos\varphi + xsin\varphi).$$

если $cos\varphi=1$, то $sin\varphi=0$, т.е. $i*r$ - маленькое. если $cos\varphi=0,8$, то потери возрастают и характеристика идет ниже.

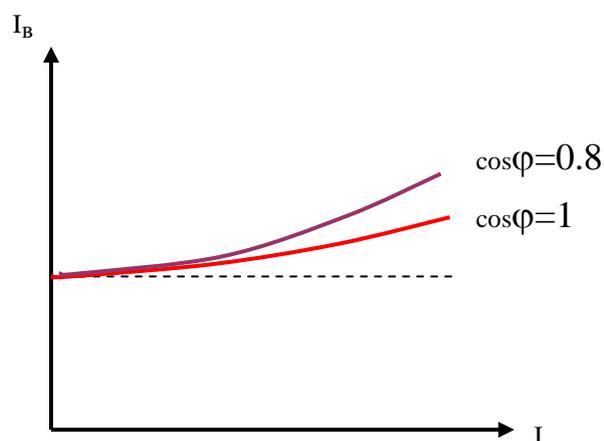
чем меньше $cos\varphi$, тем меньше напряжение, которое дает генератор.

3. регулировочной характеристикой называется зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном напряжении и $cos\varphi$.

$i_g = f(i)$ при $u=const$ и $cos\varphi=const$.

сопоставляя характеристику холостого хода и внешнюю характеристику можно

сказать, что для поддержания напряжения постоянным при увеличении тока нагрузки нужно увеличивать ток возбуждения.



ЛЕКЦИЯ № 13 СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

13.1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

ОСНОВНЫМИ ЧАСТЯМИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЯВЛЯЮТСЯ СТАТОР И РОТОР.

Статор – неподвижная часть машины, а ротор - вращающаяся. Статор состоит из станины пальцеобразной формы и внутри станины – кольцеобразного сердечника. Станина отливается из стали. Сердечник статора набирается из штампованных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком – для уменьшения потерь на вихревые токи. На внутренней образующей листов вырублены пазы, которые создают каналы для укладки проводников обмотки. Пакет листов статора запрессован в корпус, который имеет соединительные элементы (лапы, торцевой фланец и т.д.) для крепления к неподвижному жесткому основанию. В пазах статора располагается трехфазная обмотка, выполненная медным изолированным проводом. Конструктивное выполнение может быть разным.

Ротор синхронного двигателя почти всегда явнополюсный. Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя и более полюсами (гидрогенератор). Явнополюсный ротор – это сердечник цилиндрической формы, на поверхности которого укреплены полюса. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и закрепляют с помощью полюсных наконечников. Соответственно, полюс состоит из полюса и полюсного наконечника, который служит для равномерного распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором. На сердечнике полюса располагается обмотка, выполненная медным изолированным проводом. Общее число полюсов равно $2p$.

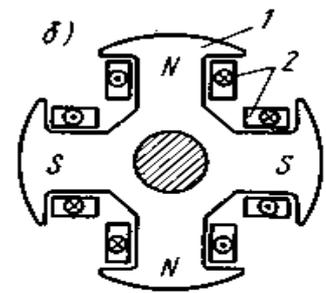


Рис.7.
Явнополюсный ротор
1-СЕРДЕЧНИК

ротор крепится внутри статора с помощью подшипников и подшипниковых щитов.

к обмотке статора подводится трехфазный переменный ток, а к обмотке ротора – постоянный ток, который образует магнитное поле ротора.

ток статора, взаимодействуя с магнитным полем ротора, создает силу, под действием которой ротор приходит во вращение, можно наоборот.



Рис. 8. Схема четырехполюсной синхронной машины.

13.2. пуск синхронных двигателей.

различают следующие способы пуска синхронных двигателей.

1. асинхронный пуск сд
2. синхронный пуск сд.

1. асинхронный пуск синхронного двигателя возможен только в том случае, если на полюсах ротора кроме рабочей обмотки имеется дополнительная пусковая обмотка. она выполняется в виде медных неизолированных стержней, уложенных в пазы на полюсах ротора и замкнутых по концам медными пластинами.

операция пуска:

- 1). переключатель п замкнуть на пусковое сопротивление $r_{п.}$

2). включить рубильник р цепи статора. при этом двигатель начинает разгоняться так же, как обычный асинхронный двигатель.

3). когда скорость достигнет 95% от скорости вращения поля, переключатель п перебросить в верхнее положение и в рабочую обмотку подается постоянный ток. вращающееся магнитное поле статора захватывает магнитное поле ротора, и они начинают вращаться одновременно, т.е. синхронно.

2. синхронный пуск.

если нет пусковой обмотки, то разгон ротора производится с помощью вспомогательного двигателя.

в обмотку ротора подается постоянный ток, и двигатель работает в режиме генератора. включение рубильника в цепи статора производится только при соблюдении четырех условий синхронизации:

1). эдс, образующаяся в статоре должна быть равна напряжению сети.

$$e_{ст} = u_{сети}$$

это достигается регулированием сопротивления в цепи ротора.

2). частота эдс, возникающей в статоре должна быть равна частоте тока в сети.

$$f_{ст} = f_{сети}$$

3). порядок чередования фаз, включаемой машины, должен быть таким же, как и порядок чередования фаз сети.

$$a_{ст} \quad b_{ст} \quad c_{ст} \rightarrow a_{сети} \quad b_{сети}$$

$c_{сети}$.

4). эдс, возникшая в статоре и напряжение сети должны быть в противофазе.

соб $u_{сети}$ \rightarrow $e_{ст}$ \rightarrow $u_{сети}$ \rightarrow $e_{ст}$
 является сложной и требует специальной аппаратуры.

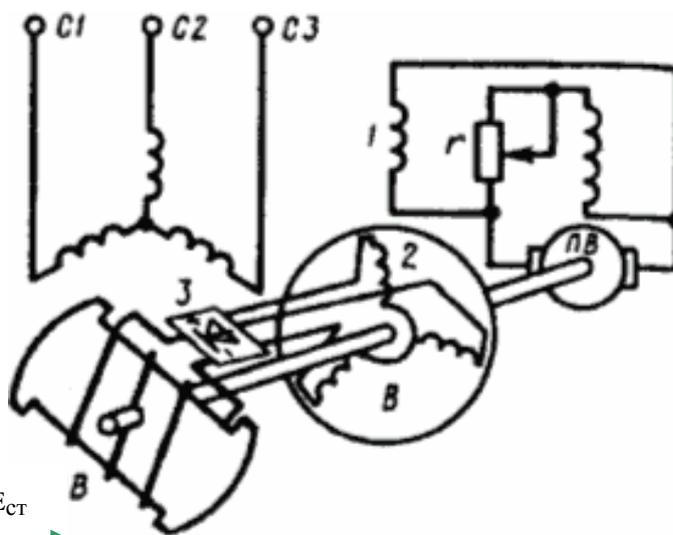
сравнивая оба способа, делаем вывод, что асинхронный пуск значительно проще синхронного. синхронный пуск применяется только в двигателях очень большой мощности – сотни и тысячи квт при очень редких включениях.

двигатели без пусковой обмотки имеют очень высокий к.п.д. (до 95%), но для их пуска требуется дополнительный двигатель.

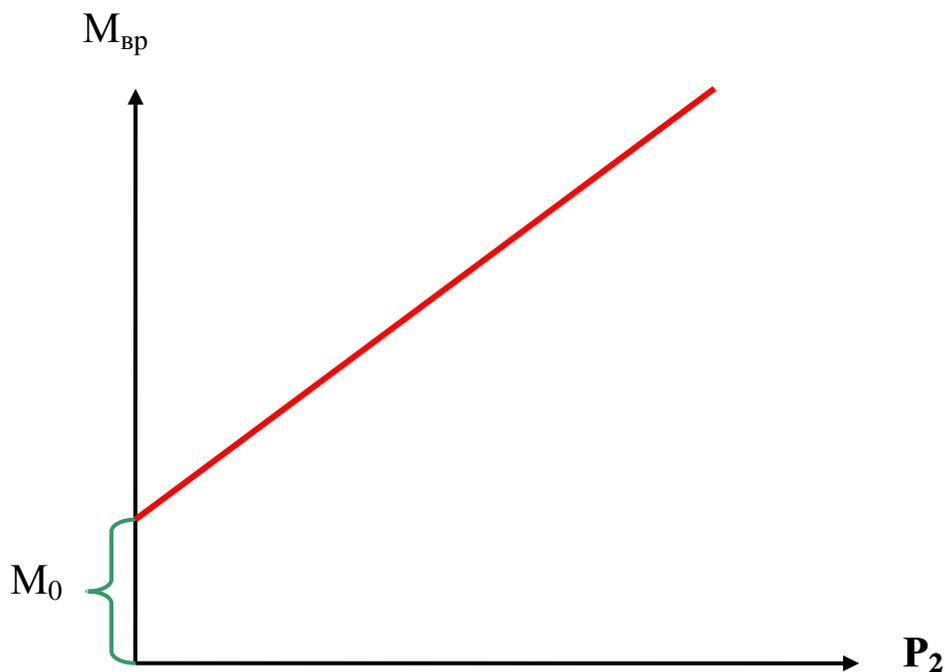
13.3. рабочие характеристики синхронных двигателей.

рабочими характеристиками называется зависимость параметров синхронного двигателя от полезной мощности на валу двигателя.

Рис.10 Схема асинхронного пуска синхронного двигателя.



$m_{вр}; n; \eta; \cos\varphi; i; p_1 = f(p_2).$
 1) $m_{вр} = f(p_2).$



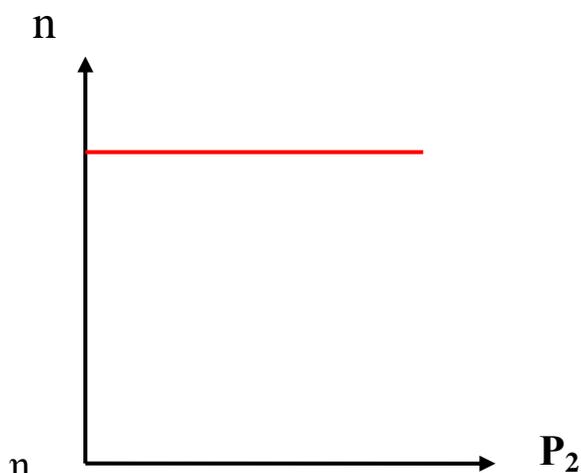
$$M_2 = \frac{P_2}{2\pi * n / 60}$$

т.к. $n = \text{const}$, то это прямая линия, при подбore масштаба она может идти под углом в 45° .

$m = m_2 + m_0$,
 где m_0 – момент, идущий на преодоление сил сопротивления и трения в подшипниках,

воздухе.

2) $n = f(p_2)$ – абсолютно жесткая характеристика, т. к. $n_1 = n_2$ – основное условие работы синхронного двигателя.



3) $\eta = f(p_2).$

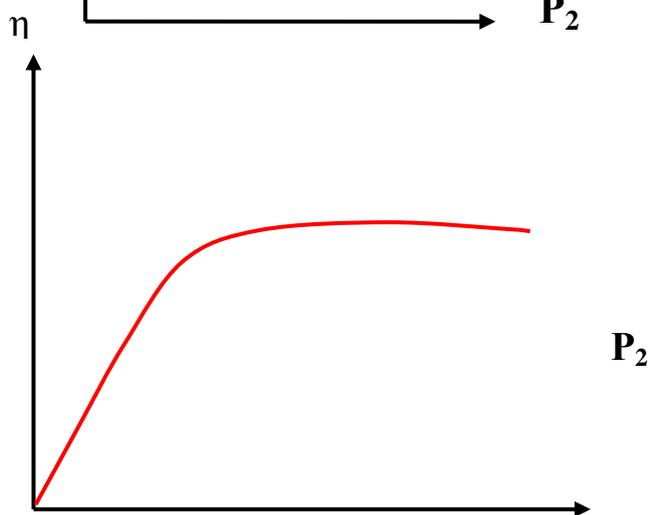
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

где δp – механические потери, потери в стали и потери в меди.

$$\delta p = \delta p_{\text{мех}} + \delta p_{\text{ст}} + \delta p_{\text{м}}$$

$\delta p_{\text{м}}$ – потери в меди ротора и статора.

$\delta p_{\text{ст}}$ – потери на перемагничивание только в статоре, т.к. в ротор подается постоянный ток.

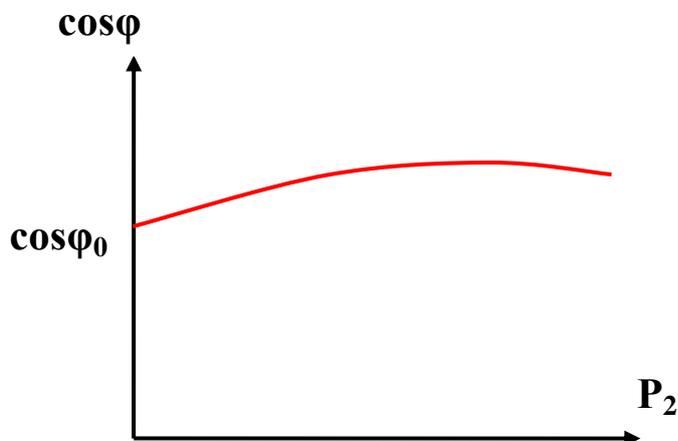


вначале η возрастает быстро, затем изменяется мало или уменьшается за счет потерь в меди.

4) $\cos\varphi=f(p_2)$.

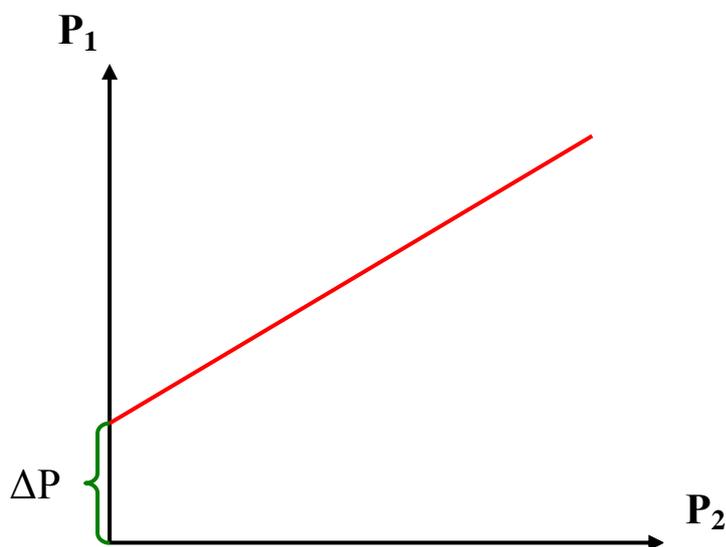
Т.к. $\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$, то

на основании этого выражения делаем вывод: при $p_{2ном}$ – оптимальный режим, а в остальных случаях несколько ниже.



5) $p_1=f(p_2)$.

$p_1 = p_2 + \delta p$ – это уравнение прямой линии, сдвинутой относительно начала координат на величину δp , но так как δp_m от квадрата тока, то кривая несколько изгибается.



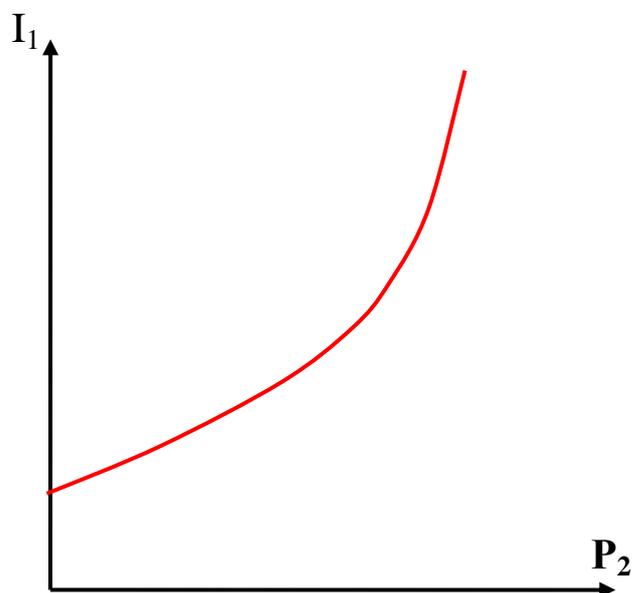
б) $i=f(p_2)$.

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3}U \cos \varphi} = \frac{P_2}{\eta \sqrt{3}U \cos \varphi}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

так как в начале

характеристики одновременно с увеличением p_2 увеличивается и η , ток меняется незначительно. в дальнейшем η и $\cos\varphi$ практически не меняются, поэтому ток резко возрастает.



13.4. Режимы работы синхронных двигателей.

В зависимости от величины тока возбуждения различают три режима работы синхронных двигателей:

1. Режим недовозбуждения (недостаточный ток возбуждения).
2. Оптимальный режим (наивыгоднейший для данного двигателя).
3. Режим перевозбуждения.

Независимо от величины тока, подаваемого в обмотку возбуждения результирующий магнитный поток в двигателе должен оставаться постоянным. Это можно доказать следующим образом:

$$E_1 = 4.44 \Phi_{рез} f W_1 K_{y1} \approx U_1 = U_{сети}.$$

Если пренебречь падениям напряжения в обмотках:

$$\Phi_{рез} = \frac{U_{сети}}{4.44 f W_1 k_{y1}} = Const$$

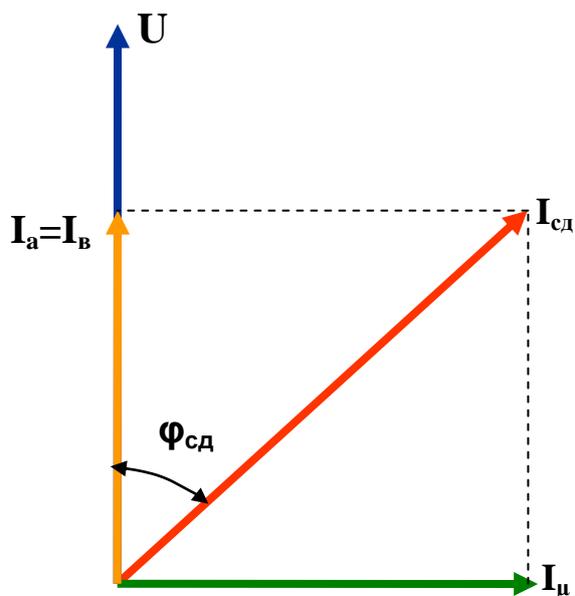
При $U_{сети} = Const$ $\Phi_{рез}$ складывается из потоков статора и ротора

$$\Phi_{рез} = \Phi_{ст} + \Phi_{рот}, \quad \Phi_{рот} = \frac{I_{\epsilon} W_{\epsilon}}{R_{маг}}$$

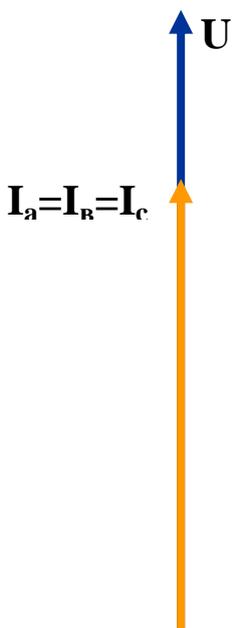
При разных потоках ротора будет изменяться, и поток статора, но результирующий поток остаётся постоянным.

1) $\Phi_{рот} < \Phi_{рез}$, тогда из сети двигатель потребляет намагничивающий ток I_{μ} , идущий на создание потока статора, такого, чтобы соблюдалось условие $\Phi_{рез} = Const$

Угол φ – между током и напряжением будет отстающим.



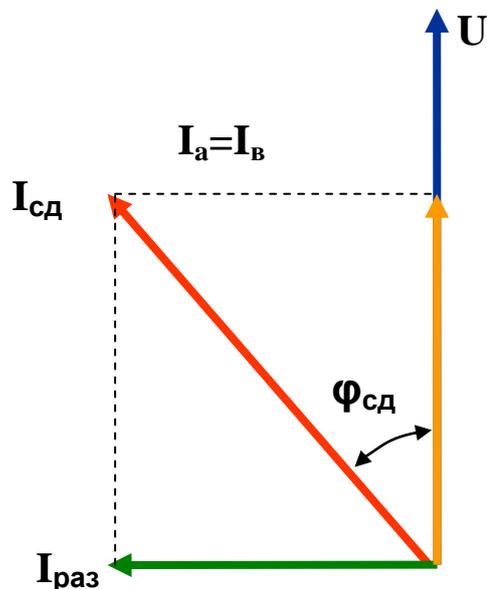
2) Подбираем такой ток возбуждения, чтобы $\Phi_{\text{рот}} = \Phi_{\text{рез}}$, т.е. $\Phi_{\text{ст}} = 0$; $I_{\mu} = 0$.
 $\varphi = 0$; $\cos\varphi = 1$.



Это наиболее выгодный режим работы для двигателя.
 Ток двигателя наименьший, потери на нагрев практически равны нулю.

3) $\Phi_{\text{рот}} > \Phi_{\text{рез}}$. Для соблюдения условия $\Phi_{\text{рез}} = \text{const}$ на создание потока статора требуется размагничивающий ток $I_{\text{раз}}$.

В этом режиме $\cos\varphi$ двигателя будет меньше 1, но при этом поднимается $\cos\varphi$ сети.



ЛЕКЦИЯ № 14 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерением называется нахождение значений физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств – измерительных приборов, схем и специальных устройств.

В электрических измерениях используют единицы системы СИ: вольт (V), ом (Ω), фарада (F), герц (Hz), ампер (A), и секунда (s).

Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины заданного размера.

Измерительным прибором называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Степень приближения результатов измерения к истинному значению измеряемой величины зависит от достоверности воспроизведения мерами единиц величин, точности измерительных приборов и применяемых методов измерения.

14.1 Погрешность измерений

Результаты измерения физической величины дают лишь приближенное значение. Отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины называют *погрешностью* измерения. Различают абсолютную и относительную погрешности измерения.

Абсолютная погрешность измерения ΔA равна разности между результатом измерения A_x и истинным значением измеренной величины A :

$$\Delta A = A_x - A.$$

Относительная погрешность измерения δ_A представляет собой отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A} 100 .$$

Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, вместо истинного значения используют так называемое действительное значение, под которым понимают значение измеряемой величины, найденное экспериментальным путём и настолько приближающееся к истинному значению, что может быть использована вместо него. По этой причине на практике значение погрешности измерения можно оценить только приближённо. Погрешности считаются положительными, если результат измерения превышает действительное значение.

Для получения действительного значения измеряемой величины в ряде случаев учитывают погрешности средств измерений путём введения поправок. *Поправкой* называется абсолютная погрешность, взятая с обратным знаком.

14.2 Классификация измерительных приборов

Все измерительные приборы различают по следующим 5 признакам:

1. По роду измеряемой величины
2. По роду тока
3. По классу точности
4. По принципу действия
5. По условиям работы

1. По роду измеряемой величины

I – Измерение тока (A)

U – Измерение напряжения (V)

P – Измерение мощности (W)

R – Измерение сопротивления (Ω)

2. По роду тока



Приборы, работающие на постоянном токе



Приборы, работающие на переменном токе



Приборы, работающие на постоянном и переменном токе



Приборы, работающие на 3-х фазном переменном токе

3. По принципу действия



Приборы магнитоэлектрической системы.



Логометр магнитоэлектрический.



Приборы электромагнитной системы.



Логометр электромагнитный.

4. По

условию работы



Прибор работает в горизонтальном положении



Прибор работает в вертикальном положении



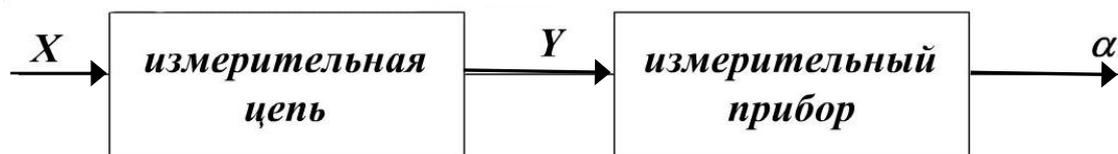
Прибор работает под углом

5. По классу точности

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,5; 2,5; 4.

14.3. Измерительные механизмы электромеханических приборов

Все электромеханические приборы состоят из измерительной цепи и измерительного механизма (рис. 5.1).



Измерительная цепь является преобразователем измеряемой величины X в некоторую промежуточную величину Y , функционально связанную с X т.е. $Y = f_1(X)$

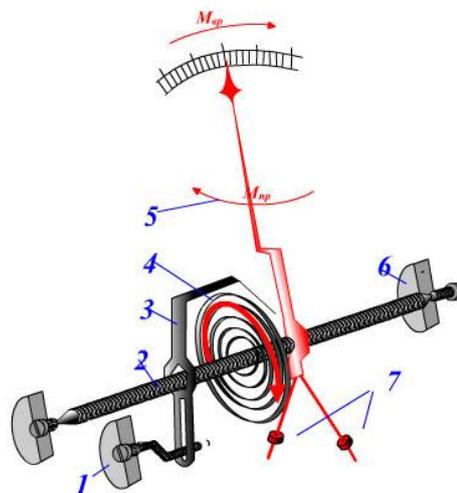
Электрическая величина Y , которой является ток или напряжение, воздействует на измерительный механизм. Измерительный механизм является преобразователем приведённой к нему электрической энергии в механическую энергию, необходимую для перемещения его подвижной части относительно неподвижной т.е. $\alpha = f_2(Y)$.

14.4. Общие узлы электромеханических приборов

Механическая схема указывающего прибора приведена на рис. 5.2.

Подвижная часть прибора приходит в движение под воздействием электромагнитного вращающего момента $M_{вр}$ (возникающего, например, в рамке с током, помещённой в магнитное поле или в результате втягивающего действия электромагнита).

На оси вращающейся части прибора укреплена стрелка, поэтому поворот оси на некоторый угол α приводит к перемещению стрелки на такой же угол по шкале. Движение подвижной части прибора не свободно. Ось подвижной части связана со спиральной пружиной, которая при вращении оси заводится и создаёт противодействующий момент, пропорциональный углу закручивания пружины. Стрелка указывающего прибора останавливается в том положении, в котором наступает равенство моментов – вращающего и противодействующего моментов.



1 – корректор

- 2 – ось
- 3 – поводок корректора
- 4 – спиральная пружина
- 5 – указательная стрелка
- 6 – оправа с подпятником
- 7 – противовесы – балансные грузики

Рис. 5.2

Механическая сила, действующая на механизм создаёт $M_{вр}$ (вращающий момент)

$$M_{вр} = F_1(X, \alpha) \quad (5.1)$$

$$(5.2)$$

$$M_{вр} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\alpha}$$

Где $W_{\text{маг}}$ - энергия магнитного (или электрического) поля, сосредоточенная в измерительном механизме. Под действием $M_{вр}$ подвижная часть поворачивается до тех пор пока он не уравнивается противодействующим моментом $M_{пр}$. Противодействующий момент $M_{пр}$ направлен навстречу вращающему моменту $M_{вр}$ и возрастает при увеличении угла поворота подвижной части.

$$M_{пр} = F_2(\alpha). \quad (5.3)$$

Положение равновесия подвижной части определяется

$$M_{вр} = M_{пр}. \quad (5.4)$$

Подставив (5.1) и (5.3) в (5.4) получим уравнение преобразования механизма прибора

$$\alpha = F(X)$$

14.5. Устройство для создания успокаивающего момента

Подвижная часть измерительного механизма по действием разности моментов $M_{вр}$ и $M_{пр}$ перемещается в ту или иную сторону, до тех пор пока не наступит равенство $M_{вр} = M_{пр}$. Время, необходимое для этого называют временем успокоения подвижной части прибора.

Для обеспечения требуемого времени успокоения подвижной части в аналоговых приборах применяют воздушные, магнитоиндукционные или жидкостные успокоители.

При движении крыла воздух в воздушных успокоителях перемещается из одной части камеры в другую, создавая успокаивающий момент.

Для успокоения движения подвижной части прибора (указателя) используются успокоители.

Момент успокоения ($M_{ус}$) пропорционален скорости движения подвижной части прибора, направлен навстречу движения подвижной

$$M_{вр} = P \frac{d\alpha}{dt}.$$

P – коэффициент успокоения

1 – крыло успокоителя

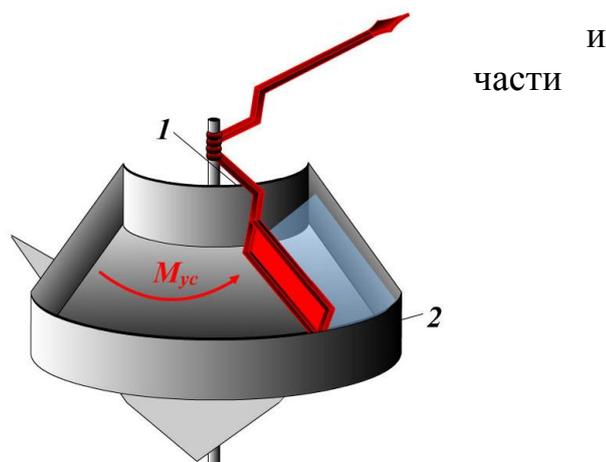


Рис. 5.3

14.6. Системы электроизмерительных приборов

Рассмотрим различные системы электроизмерительных приборов, отличающихся друг от друга по принципу действия.

Различные системы приборов имеют следующие названия:

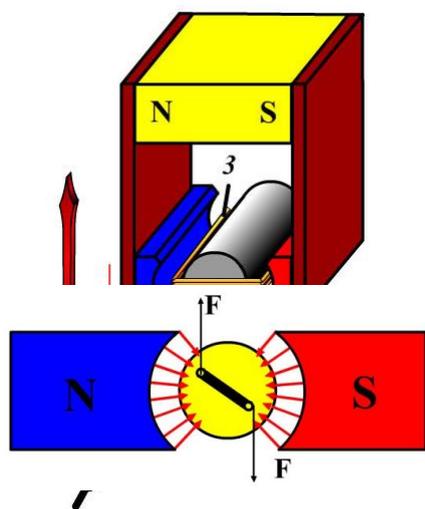
а) магнитоэлектрические, б) электромагнитные, в) электродинамические, г) индукционные.

Ко всем электроизмерительным приборам предъявляются требования высокой точности, малого собственного потребления энергии, надёжность в работе и простота конструкции.

14.7. Приборы магнитоэлектрической системы

Работа механизмов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита и тока, проходящего по катушке (рамке) (рис 5.4)

Ток в рамке подводится через спиральные пружины и проходя по виткам рамки взаимодействуя с магнитным полем создаёт пару сил FF , образующих вращающий момент $M_{вр}$, который, в свою очередь, уравнивается противодействующим моментом $M_{пр}$, созданным пружинами.



1. Воздушный зазор
2. Стальной неподвижный цилиндр
3. Рамка

Рис. 5.4

$$F = B \cdot l \cdot I, \quad M_{вр} = C_1 I, \quad M_{пр} = C_2 \alpha \quad M_{вр} = M_{пр},$$

$$C_1 I = C_2 \alpha, \quad \alpha = \frac{C_1}{C_2} I, \quad \alpha \sim I.$$

Угол поворота стрелки пропорционален току.

Этой пропорциональностью определяется равномерная шкала у магнитоэлектрических приборов и, следовательно, одинаковая точность показаний на любом участке шкалы.

Магнитоэлектрические приборы применяются в качестве амперметров и вольтметров.

Магнитоэлектрический прибор пригоден для измерений только в цепях постоянного тока. Если магнитоэлектрический прибор включить в цепь переменного тока, то вследствие непрерывного изменения направления вращающего момента при каждом изменении направления тока стрела прибора из-за инерции рамки не даст отклонения, а будет лишь дрожать.

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы:

1. Равномерная шкала
2. Большая чувствительность прибора
3. Малое потребление мощности
4. Высокая точность прибора

Недостатки приборов магнитоэлектрической системы:

1. Малая перегрузочная способность
2. Боязнь внешних электромагнитных полей
3. Приборы магнитоэлектрической системы пригодны только для цепей постоянного тока

14.8. Приборы электромагнитной системы

Работа электромагнитных измерительных механизмов основана на взаимодействии магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, по обмотке которой протекает измеряемый ток, с одной или несколькими ферромагнитными сердечниками, эксцентрично укрепленными на оси.

Электромагнитные приборы действуют на принципе втягивания в катушку с током сердечника из мягкой стали (рис 5.5), при этом происходит поворот оси на тот или иной угол. Вместе с осью поворачивается и связанная с ней стрелка.

Равновесное состояние прибора наступает тогда, когда вращающий момент, действующий на ось прибора в результате втягивания лепестка катушкой, становится равным противодействующему моменту спиральной пружины. Сила втягивания лепестка в катушку пропорциональна I^2 , т.е. зависимость угла отклонения стрелки прибора от тока, проходящего по катушке, имеет нелинейный характер. Поэтому шкала у электромагнитного прибора неравномерная.

При протекании тока через катушку возникает магнитное поле, которая воздействуя на подвижный сердечник стремится расположить его так, чтобы энергия поля ($W_{\text{маг}}$) была наибольшей.

$$W_{\text{маг}} = \frac{1}{2} I^2 L$$

L – индуктивность катушки

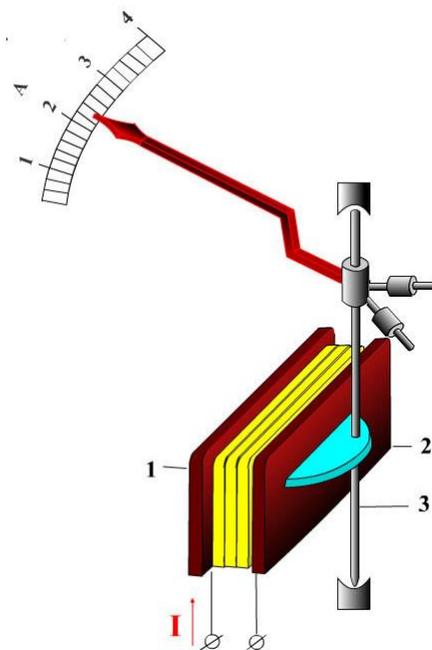
Возникающий вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\alpha} = \frac{dL}{d\alpha} I^2 = C_1 I^2, \quad M_{\text{пр}} = C_2 \alpha,$$

при $M_{вр} = M_{пр}$,

$$C_1 I^2 = C_2 \alpha, \quad \alpha = \frac{C_1}{C_2} I^2, \quad \alpha \sim I^2$$

1. Неподвижная катушка
2. Подвижный сердечник
3. Ось подвижного сердечника



Достоинства приборов электромагнитной системы:

1. Не боится перегрузок
2. Хорошая чувствительность прибора
3. Пригодность для работы на постоянном и переменном токе
4. Простая конструкция

Недостатки приборов электромагнитной системы:

1. Неравномерность шкалы
2. Малая чувствительность к малым значениям измеряемой величины
3. Большое собственное потребление мощности

Приборы электромагнитной системы пригодны для работы на постоянном и переменном токе.

14.9. Приборы электродинамической системы

Работа измерительных механизмов электродинамической системы основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами – неподвижной и подвижной. При протекании в обмотках катушек токов I_1 и I_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки подвижной и неподвижной катушек совпадали (рис. 5.6).

Энергия магнитного поля двух катушек с токами I_1 и I_2

$$M_{\text{маг}} = \frac{1}{2} I^2 L_1 + \frac{1}{2} I^2 L_2 + M_{1,2} I_1 I_2$$

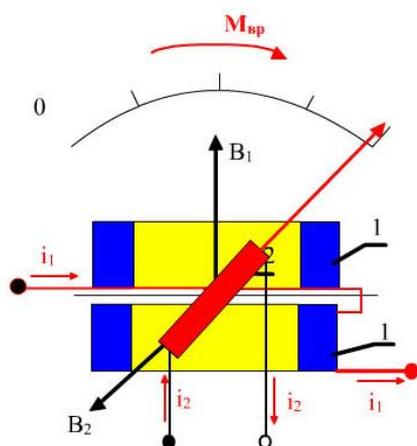
Где L_1 и L_2 - индуктивности катушек

$M_{1,2}$ - взаимная индукция катушек.

Только взаимная индуктивность $M_{1,2}$ зависит от угла поворота подвижной части, поэтому неподвижная катушка 1 обычно выполняется из двух одинаковых частей,

разделённых воздушным зазором. Для подвода тока к подвижной катушке используются спиральные пружины.

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{маг}}}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = C_1 I_1 I_2$$



1. Неподвижная катушка
2. Подвижная катушка

Рис. 5.6

$$M_{\text{вр}} = C_1 I_1 I_2, \quad M_{\text{пр}} = C_2 \alpha, \\ M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$$

$$C_1 I_1 I_2 = C_2 \alpha, \quad \alpha \sim I \\ \alpha = \frac{C_1}{C_2} I_1 I_2 = c I_1 I_2$$

При различных токах в подвижной и неподвижной катушках получается момент пропорциональный произведению токов. Если один из токов выбрать равным току в цепи $I_1 = I_2$, а другой ток сделать пропорциональным напряжению $I_2 \sim U$, то вращающий момент окажется пропорциональным произведению $U \cdot I$

$$M_{\text{вр}} = U I = P$$

Такое включение электродинамического прибора – ваттметра пригодно для непосредственного измерения мощности.

$$C_1 P = C_2 \alpha$$

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2} P$$

Таким образом, отклонение стрелки прибора пропорционально мощности. Электродинамические ваттметры применяются для измерения мощности как в цепях постоянного тока, так и переменного тока.

Достоинства приборов электродинамических систем:

1. Равномерная шкала
2. Одинаковые показания на постоянном и переменном токе (при последовательном соединении катушек)

Недостатки приборов электродинамических систем:

1. Невысокая чувствительность
2. Большое собственное потребление мощности
3. Чувствительность к перегрузкам.

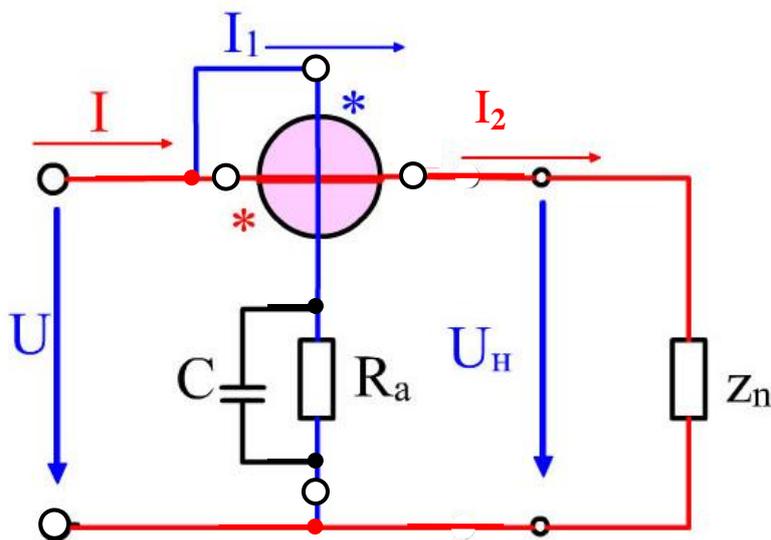
ЛЕКЦИЯ № 15

15.1 Ваттметры электродинамической системы

При изменении мощности постоянного тока электродинамическим ваттметром неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой и по ней проходит тока нагрузки I .

Она называется последовательной цепью ваттметра.

К подвижной катушке соединённой последовательно с добавочным резистором подводится напряжение U и по ней проходит ток (рис. 5.7).

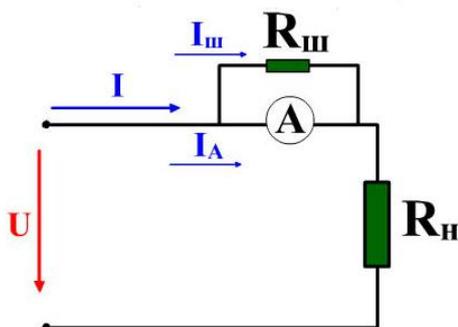


Для ваттметра имеем
 $\alpha = CUI = CP$

Зажимы последовательной и параллельной цепи ваттметра имеют разметку. Зажимы, обозначенные (*) называются генераторными и должны включаться в линию со стороны генератора, т.е. со стороны поступления энергии.

15.2. Измерение тока

Измерение тока производится с помощью амперметра, который включается в электрическую цепь последовательно (рис. 5.8)



$$\left. \begin{aligned} I_A R_A &= I_{ш} R_{ш} \\ R_{ш} &= R_A \frac{I_A}{I_{ш}} \end{aligned} \right\} (5.5) \quad \left. \begin{aligned} I &= I_A + I_{ш} \\ I_{ш} &= I - I_A \end{aligned} \right\} (5.6)$$

Подставив (5.5) в (5.6) получим

$$R_{ш} = R_A \frac{I_A}{I - I_A} = R_A \frac{I_A}{I_A \left(\frac{I}{I_A} - 1 \right)}$$

$$R_{ш} = R_A \frac{I_A}{I_A (n - 1)} = \frac{R_A}{n - 1}$$

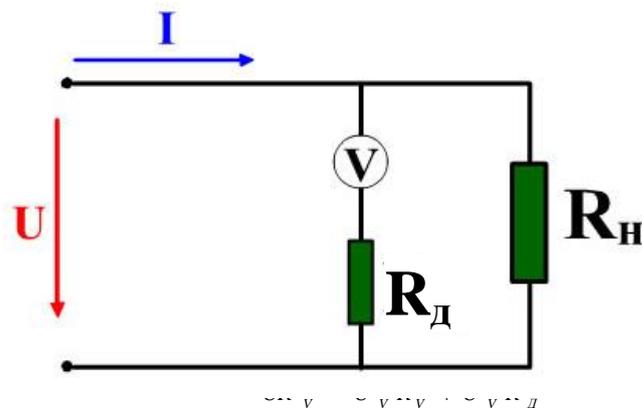
$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}$$

Для расширения диапазонов измерения амперметра постоянного тока служит шунт

Для расширения диапазонов измерения в цепях переменного тока применяют трансформаторы тока.

15.3 Измерение напряжения

Для измерения напряжения на каком-либо элементе электрической цепи вольтметры подключаются параллельно (рис. 5.9).



$$R_D = \frac{UR_V - U_V R_D}{U} = R_V \left(\frac{U - U_V}{U_V} \right) = R_V \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right)$$

$$R_D = R_V (n - 1) \quad n = \frac{U}{U_V}$$

Для расширения диапазонов измерения вольтметра применяют добавочное сопротивление.

15.4. Измерение сопротивления методом амперметра и вольтметра

Этот метод основан на раздельном измерении тока I в цепи измеряемого сопротивления R_x и напряжения на его зажимах и последующим вычислением значения R_x по показаниям измерительных приборов (рис. 5.10 и рис. 5.11).

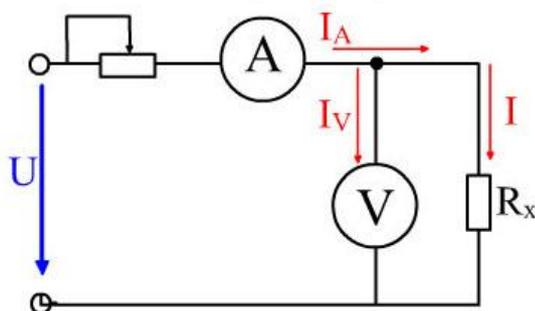


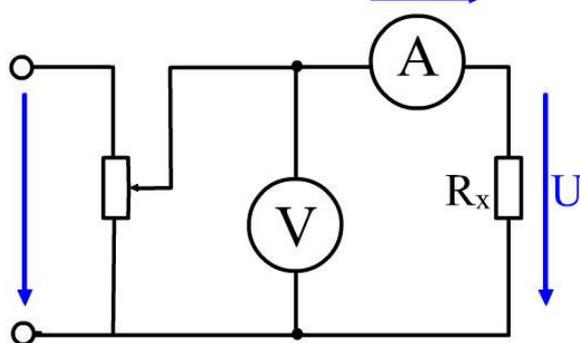
Рис. 5.10

$$R_x = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{\frac{U}{R_x} + \frac{U}{R_V}} = \frac{R_x}{1 + \frac{R_x}{R_V}}$$

Относительная погрешность измерения в процентах

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} \cdot 100 = - \frac{\frac{R_x}{R_V}}{1 + \frac{R_x}{R_V}} \cdot 100 \approx - \frac{R_x}{R_V} \cdot 100$$



Относительная погрешность в процентах

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} \cdot 100 = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100$$

Сравнивая полученные выражения относительных погрешностей приходим к выводу, что для минимизации погрешности измерений, значение измеряемого сопротивления R_x должно соответствовать неравенству:

$$R_x \ll R_V \text{ (для схемы 5.10);}$$

$$R_x \gg R_A \text{ (для схемы рис 5.11).}$$

При практическом использовании метода рекомендовано правило:

1. Измерение малых сопротивлений производить по схеме рис 5.10
2. При измерении больших сопротивлений предпочтение следует отдавать схеме рис 5.11.

15.5 Общие сведения об измерениях неэлектрических величин

При контроле технологических процессов и в научных исследованиях приходится производить измерение различных неэлектрических величин.

В большинстве случаев целесообразно измерять неэлектрические величины электрическими приборами. Это объясняется тем, что электрические величины легче, чем неэлектрические, можно передавать на сравнительно большие расстояния, над электрическими величинами можно производить различные математические операции.

Электрические приборы для измерения неэлектрических величин обязательно содержат измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую (ИП).

Измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины, например ЭДС, от входной измеряемой неэлектрической величины (температуры, перемещения и т.д.)

На рисунке 5.12 показана упрощённая схема электрического прибора для измерения неэлектрической величины. Измеряемая неэлектрическая величина « x » подаётся на вход ИП. Выходная электрическая величина « y » преобразователя измеряется электрическим измерительным устройством ЭИУ. Обычно шкала измерительного устройства градуируется в единицах измеряемой электрической величины.

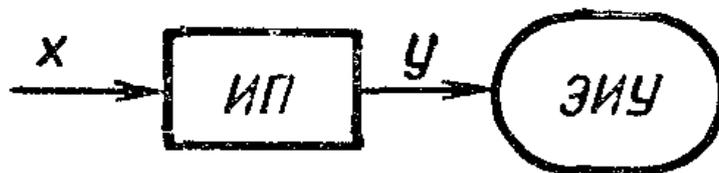


Рис. 5.12

На следующем рисунке (рис. 5.13) в качестве примера показан электрический прибор, предназначенный для измерения температуры. В этом приборе: $ТП$ – термопара, ЭДС которой является функцией измеряемой величины температуры, mV – милливольтметр для измерения ЭДС термопары. В данном случае термопара – ИП, а милливольтметр – электрическое измерительное устройство.

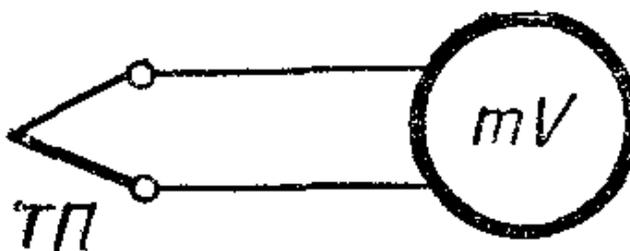


Рис. 5.13

15.6 Классификация измерительных преобразователей

По принципу действия все ИП подразделяются на следующие группы:

Резистивные измерительные преобразователи. Эти ИТ подразделяются на реостатные и тензочувствительные.

Работа резистивных ИП основана на изменении электрического сопротивления в зависимости от перемещения движка по электрическому проводнику (реостатные преобразователи) или от механической деформации проводника или полупроводника (тензометрические ИП)

Резистивные ИП применяются для измерения перемещений, а также величин, которые могут быть преобразованы в линейное или угловое перемещение тел, а именно: давлений, сил, вращающих моментов, уровня жидкостей, ускорений и т.д.

Электромагнитные измерительные преобразователи. Они подразделяются на индуктивные, взаимоиндуктивные, магнитоупругие и индукционные.

Индуктивные и взаимоиндуктивные ИП представляет собой катушку индуктивности или взаимной индуктивности, параметры которой изменяются под воздействием измеряемой величины. Магнитоупругие ИП представляют собой разновидность индуктивных ИП с замкнутым магнитопроводом, а индукционные ИП – катушку, в которой наводится ЭДС при её перемещении в постоянном магнитном поле.

Электромагнитные ИП применяются для измерения скорости, линейного и углового перемещения, а также тех величин, которые могут быть преобразованы в перемещение.

Электростатические измерительные преобразователи. Они подразделяются на ёмкостные и пьезоэлектрические.

К ёмкостным относятся ИП, у которых электрическая ёмкость или диэлектрические потери в ней изменяются под действием измеряемой величины. Работа пьезоэлектрических ИП основана на пьезоэлектрическом эффекте, т.е. возникновении ЭДС в некоторых кристаллах под действием механических сил.

Электрические ИП применяются для измерения силы, давления, перемещения и количество вещества.

Тепловые измерительные преобразователи. Их действие основано на тепловых процессах – при нагреве, охлаждении, теплообмене и др.

Тепловые ИП подразделяются на терморезисторы и термоэлектрические ИП. В терморезисторах используется зависимость сопротивление проводника или полупроводника от температуры. Действие термоэлектрических ИП основано на возникновении ЭДС при нагреве или охлаждения спая двух разнородных проводников.

Тепловые ИП применяются преимущественно для измерения температуры, а также скорости и расхода жидкостных и газообразных веществ, малых концентраций газов (вакуум), влажности, перемещения, размеров и даже для химического анализа газовых смесей.

15.7. Резистивные измерительные преобразователи.

Реостатные измерительные преобразователи. Реостатный ИП (рис. 5.14) представляет собой в простейшем случае реостат, щётка (движок) которого

перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины. Преобразователь состоит из обмотки, нанесённой на каркас, и щётки.

Реостатные ИП применяются для измерения угловых и линейных перемещений и тех величин, которые могут быть преобразованы в эти перемещения (усилия, давления, уровни и объёмы жидкостей и т.д.). Реостатные ИП применяются также в качестве прецизионных регулируемых резисторов (реохордов) в автоматических мостах и компенсаторах.

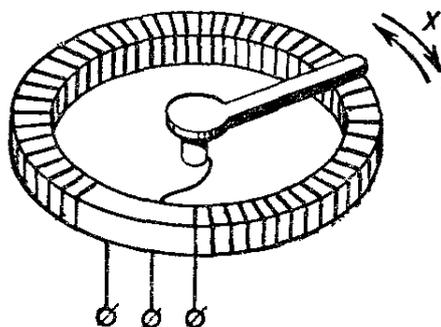


Рис. 5.14

Пример применения реостатного ИП для измерения уровня объёма жидкости показан на рисунке 5.15. В результате изменения положения поплавка, определяемого уровнем или объёмом жидкости, изменяется положение щётки ИП, что вызывает изменения сопротивлений резисторов R_1 и R_2 последовательно с рамками логометра. В результате изменяются отношение токов в рамках логометра и его показания. Шкала логометра градуируется в значениях измеряемой величины объёма или уровня жидкости.

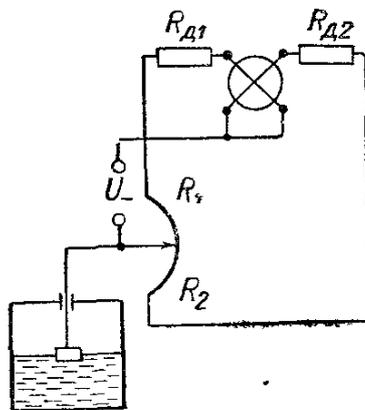


Рис. 5.15

Тензочувствительные измерительные преобразователи (тензорезисторы). Работа тензорезисторов основана на зависимости электрического сопротивления проводника или полупроводника от создаваемого в нём механического напряжения. Они подразделяются на металлические и полупроводниковые. Из металлических тензорезисторов наиболее распространены проволочные и фольговые. Если проволоку подвергнуть механическому воздействию, то сопротивление её изменится. Относительное изменение сопротивления проволоки

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l}$$

Где k – коэффициент тензочувствительности; $\Delta l/l$ - относительная деформация проволоки.

Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на неё объясняется изменением геометрических размеров и удельного сопротивления материала.

Проволочные тензорезисторы (рис. 5.16) представляют собой, приклеенную к полоске бумаги 1, тонкую зигзагообразную проволоку 2, называемую решёткой. В качестве подложки используется тонкая (0,03 – 0,05 мм) бумага, а также плёнка лака или клея, а для работы при высоких температурах – слой цемента. Проволока вместе с подложкой наклеивается на деталь.

Тензопреобразователь включается в схему с помощью привариваемых или припаиваемых выводов 3. Он наклеивается на поверхность исследуемой детали так, чтобы направление ожидаемой деформации совпадало с осью длинной стороны петель проволоки. При деформации детали сопротивление проволоки изменяется.

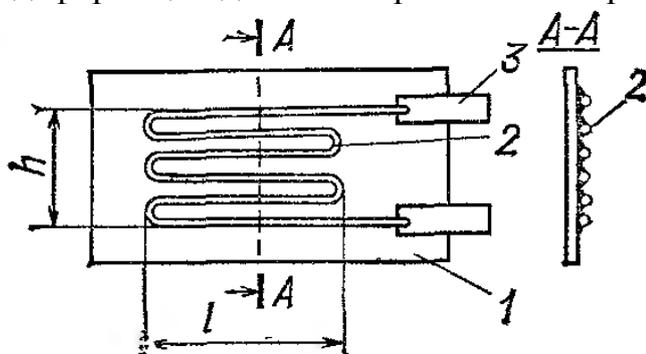


Рис. 5.16

ЛЕКЦИЯ № 16 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

16.1. Введение

Современное промышленное и сельскохозяйственное производство характеризуется большим многообразием технологических процессов. Для их осуществления человеком созданы тысячи самых разнообразных машин и механизмов: обработка материалов и изделий осуществляется на станках, прокатных станах, прессах, исполнительными органами которых являются шпиндели, механизмы подачи, суппорты, валики, нажимные винты, штампы и т.д.; перемещение твердых материалов, изделий, газов и жидкостей - с использованием конвейеров, подъемных кранов, лифтов, эскалаторов, насосов, вентиляторов, компрессов и т.д.; подобные и многие другие машины и механизмы используются и в городском коммунальном хозяйстве, медицинской технике, быту, связи, строительстве, на транспорте и т.п. и практически все процессы, связанные с механической энергией, движением, осуществляются электроприводом. Исключения составляют лишь автономные транспортные средства (автомобили, самолеты, некоторые виды подвижного состава, судов), использующие неэлектрические двигатели. В

относительно небольшом числе промышленных установок используется гидропривод, еще реже - пневмопривод.

Такое широкое применение ЭП объясняется целым рядом его достоинств и преимуществ по сравнению с другими видами приводов: использование электрической энергии, распределение и преобразование которой в другие виды энергии, в том числе и в механическую, наиболее экономично; большой диапазон мощности и скорости движения; разнообразие конструктивных исполнений, что позволяет рационально сочленять его с ИО и рабочей машиной и использовать для работы в самых разнообразных условиях – в воде, в среде агрессивных жидкостей и газов, в условиях космического пространства и т.д.; простота автоматизации технологических процессов; высокий КПД и экологическая частота.

Сегодня в приборных системах используются электроприводы, мощность которых составляет единицы микроватт; мощность электропривода компрессора на перекачивающей газ станции - десятки мегаватт, т.е. диапазон современных электроприводов по мощности превышает 10^{12} . Такого же порядка и диапазон по частоте вращения: в установке, где вытягиваются кристаллы полупроводников, вал двигателя должен делать 1 оборот в несколько десятков часов при очень жестких требованиях к равномерности движения; частота вращения шлифовального круга в современном хорошем станке может достигать 150000 об/мин.

Но особенно широк - безгранично широк - диапазон применений современного электропривода: от искусственного сердца до шагающего экскаватора, от вентилятора до антенны радиотелескопа, от стиральной машины до гибкой производственной системы. Именно эта особенность - теснейшее взаимодействие с технологической сферой - оказывала и оказывает на электропривод мощное стимулирующее влияние. Непрерывно растущие требования со стороны технологических установок, использование достижений в смежных областях науки и техники – электромашиностроении и электроаппаратостроении, электронике и вычислительной технике, автоматике и электротехнике определяют развитие электропривода, совершенствование его элементарной базы, его методологии. В свою очередь, развивающийся электропривод положительно влияет на технологическую сферу, обеспечивает новые, недоступные ранее возможности.

С энергетической точки зрения электропривод - главный потребитель электрической энергии: сегодня в развитых странах он потребляет более 60% всей производимой электроэнергии. В условиях дефицита энергетических ресурсов это делает особенно острой проблему энергосбережения в электроприводе и средствами электропривода.

16.2. Основные понятия и определения

Электрический привод - совокупность устройств, приводящих в движение производственные машины и установки при помощи электрических двигателей, используется очень широко. Если для привода и применяются другие двигатели, например, гидравлические, то энергия, используемая для приведения в движение этих двигателей, практически всегда получается путем преобразования электрической энергии. Такое универсальное применение электропривода объясняется рядом его

преимуществ, а также простотой и легкостью распределения и преобразования электрической энергии.

На раннем этапе развития электропривода, когда электрический двигатель только пришел на смену паровой машине, применялся **групповой электропривод**, обеспечивающий движение нескольких исполнительных органов одной или нескольких рабочих машин. Такая система электропривода имела громоздкую разветвленную кинематическую цепь (трансмиссию). Для пуска, останова и регулирования скорости машин используются управляемые муфты, коробки передач, фрикционы, управляющие кулачки и специальные механические преобразовательные устройства. Громоздкость, высокая стоимость, сложность эксплуатации и автоматизации группового электропривода привели к его замене на индивидуальный. При **индивидуальном электроприводе** движение каждого исполнительного механизма машины обеспечивается отдельным электрическим двигателем (**одионочный электропривод**) или несколькими двигателями. Последняя разновидность индивидуального электропривода, в которой двигатели работают совместно на общий вал, называется **многодвигательным приводом**.

Если необходимо обеспечить синхронное вращение валов нескольких электрических двигателей, которые не имеют механической связи, то используется электропривод по схеме электрического вала.

Многодвигательный привод и электрический вал являются разновидностями взаимосвязанного электропривода. **Взаимосвязанный электропривод** представляет собой два или несколько электрически или механически связанных между собой электроприводов, при работе которых поддерживается заданное состояние их скоростей и (или) нагрузок, и (или) положения исполнительных органов рабочих машин.

Еще одним примером взаимосвязанного электропривода является привод цепного конвейера, приводимого в движение двумя или несколькими двигателями, расположенными вдоль цепи. Угловые скорости этих двигателей одинаковы. Упрощение кинематических цепей машин сопровождалось усложнением систем управления их электроприводов. **Современный электропривод** – это индивидуальный автоматизированный электропривод. Управляющее устройство совместно с электроприводом образует **систему автоматического управления (САУ)**.

В зависимости от рода двигателя электропривод делится на привод с двигателями постоянного тока и привод с двигателями переменного тока. В промышленности, сельском хозяйстве и быту подавляющее большинство машин - более 90% - трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Ими комплектуется весь нерегулируемый электропривод (около 90%), а теперь – и частотно-регулируемый электропривод. Значительно реже используются асинхронные двигатели с фазным ротором. До 80-90-х годов регулируемый электропривод комплектовался электродвигателями постоянного тока. Теперь их доля сократилась до 15-20%. В мощных электроприводах используются синхронные двигатели. Успехи силовой электроники вызвали к жизни много новых электрических машин - это вентильные, вентильно-индукторные, бесконтактные двигатели постоянного тока и т.п.

Согласно ГОСТ Р 50369-92, электрическим приводом называется электромеханическая система, состоящая из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей. Управляющих и информационных устройств и устройств сопряжения с внешними системами, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением в целях осуществления технологического процесса. Структурная схема автоматизированного электропривода приведена далее

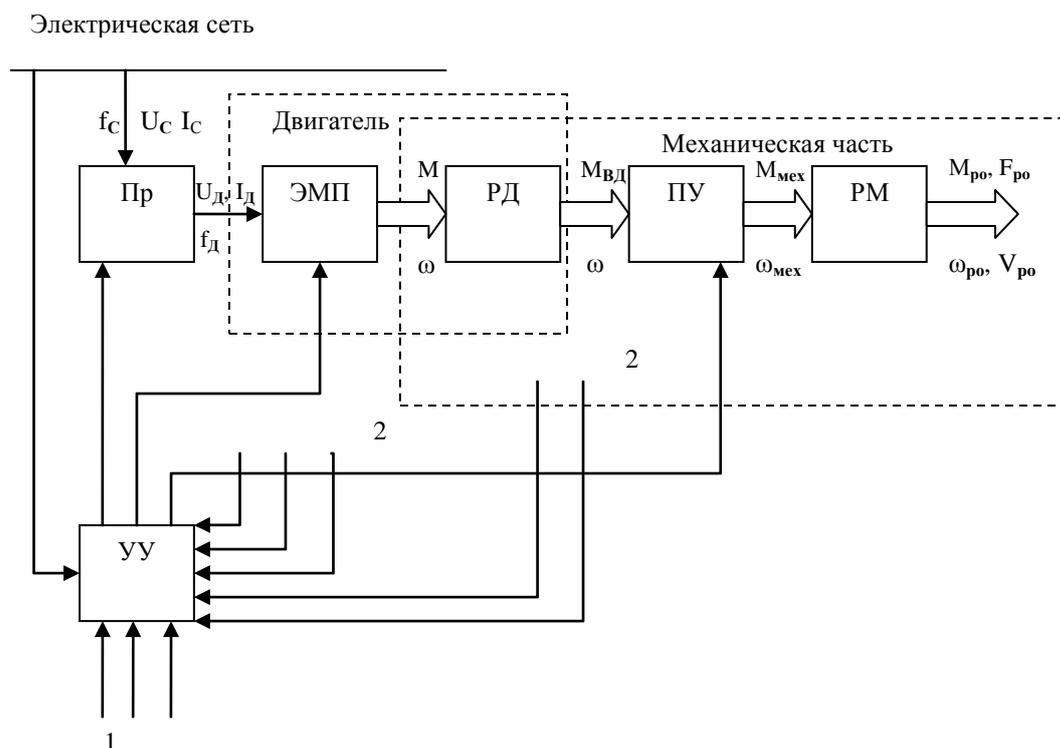


Рис.16.1 Схема автоматизированного электропривода: 1 – от задающих устройств; 2 – от измерительных преобразователей обратных связей.

Передающее устройство (ПУ) передает механическую энергию электродвигательного устройства к исполнительному органу **рабочей машины (РМ)**, который перемещается со скоростью $V_{ро}$ или вращается с угловой скоростью $\omega_{ро}$. К исполнительному органу приложено усилие $F_{ро}$ (или момент $M_{ро}$). Передающее устройство редукторного электропривода содержит редуктор. При отсутствии редуктора электропривод называется безредукторным.

Примерами исполнительных органов подъемно-транспортных машин являются крюк и грейфер механизма подъема, тележка и мост механизмов передвижения, поворотная платформа механизма поворота, кабина, клеть и скип подъемников, лента и цепь конвейера.

Рабочая машина (или производственный механизм) состоит из множества взаимосвязанных деталей и узлов, один из которых непосредственно выполняет заданный технологический процесс или операцию, и поэтому называется **исполнительным органом (ИО)**.

Характерным для многих рабочих машин является наличие не одного, а двух или даже нескольких взаимодействующих ИО. Например, для обработки детали на токарном станке она приводится во вращение вокруг своей оси, а резец при этом перемещается вдоль детали и снимает с нее слой металла (стружку). Вращение детали осуществляет шпиндель станка (первый ИО), а механизм подачи станка (второй ИО) поступательно перемещает резец.

Совершая механическое движение, ИО выполняет заданную технологическую операцию - вращает деталь, перемещает инструмент.

Часто требуется регулирование скорости движения исполнительных органов: валков прокатных станов, кабин лифтов и подъемников, лент конвейеров и т.д. Кроме того, иногда возникает необходимость изменять направление (реверсировать) движение. ИО в процессе движения преодолевает сопротивление движению, обуславливаемое силами трения или притяжения земли, усилиями упругой и пластической деформации материалов или их сочетанием. В рассматриваемом примере эта сила сопротивления определяется процессом снятия стружки и называется усилием резания.

Электродвигательное устройство (или **двигатель**) преобразует электрическую энергию в механическую или, наоборот, механическую энергию в электрическую. Такое преобразование энергии осуществляется в части двигателя, обозначенной на схеме ЭМП – **электромеханический преобразователь**, который развивает при угловой скорости ω электромагнитный момент, передаваемый ротору двигателя РД.

Часть электромагнитного момента расходуется на изменение запасенного в массе ротора кинетической энергии и на преодоление механических потерь двигателя. Оставшаяся часть момента $M_{р0}$ (момент на валу двигателя) воздействует на передаточное устройство.

По роду тока, потребляемого двигателем, различают электроприводы постоянного и переменного тока.

Ротор двигателя (РД) совместно с передаточным устройством и рабочим механизмом составляет **механическую часть** электропривода.

Стремление к упрощению кинематической цепи привело в некоторых случаях к слиянию двигателя с рабочим механизмом, к созданию электроприводов с крайне простой механической частью, в которой барабан или шкив выполняет функцию ротора двигателя.

Преобразовательное устройство (Пр) обеспечивает питание двигателя. Оно преобразует электрическую энергию (род тока или электрические величины и показатели) и создает управляющее воздействие на двигатель.

Электропривод, получающий энергию от автономного источника, называется автономным. По характеру автономного источника различают аккумуляторный и теплоэлектрический электропривод. В качестве последнего обычно применяют дизель-электрический привод.

Управляющее устройство (УУ) предназначено для управления преобразовательным, электродвигательным и передаточным устройствами. Оно получает информацию от датчиков управляющих воздействий и измерительных преобразователей обратной связи, сигнализирующих о состоянии электропривода, и вырабатывает управляющие сигналы по заданным алгоритмам.

По степени управляемости различают следующие разновидности электроприводов:

- Нерегулируемый, приводящий в действие исполнительный орган рабочей машины с одной рабочей скоростью, зависящей только от возмущающих воздействий;

- Регулируемый, параметры которого могут изменяться под действием управляющего устройства, и его разновидность – многоскоростной электропривод, в состав которого входит многоскоростное электродвигательное устройство;

- Программно-управляемый, т.е. управляемый в соответствии с заданной программой;

- Следящий, обеспечивающий перемещение исполнительного органа рабочей машины в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

- Адаптивный (приспосабливающийся), автоматически изменяющий структуру и параметры САУ при изменении условий работы.

16.3. Механика электрического привода

Движение любого элемента механической части ЭП подчиняется известным из курса физики законам механики. Поступательное и вращательное движение элемента описывается соответственно следующими уравнениями:

$$\Sigma F = m \, dv/dt + V \, dm/dt, \quad (16.1)$$

$$\Sigma M = J \, dw/dt + \omega \, dJ/dt, \quad (16.2)$$

где

ΣF и ΣM - соответственно совокупность сил и моментов, действующих на элемент;

m и J – масса и момент инерции элемента;

t – время.

В большинстве случаев масса и момент инерции элементов при движении не изменяются, их производные оказываются равными нулю и уравнения (1.1) и (1.2) упрощаются:

$$\Sigma F = ma; \quad (16.3)$$

$$\Sigma M = J\varepsilon, \quad (16.4)$$

где $a = dv/dt$ и $\varepsilon = dw/dt$ - соответственно ускорения при поступательном и вращательном движениях.

Уравнения (1.3) и (1.4) отражают известный закон механики: ускорение движения механического элемента (тела) пропорционально алгебраической сумме действующих на него сил (моментов) и обратно пропорционально его массе (моменту инерции).

Другими словами, элемент будет двигаться с неизменной скоростью (или находиться в состоянии покоя, что является частным случаем движения с нулевой скоростью), если сумма сил или моментов, к нему приложенных, будет равна нулю. Такое движение называют, установившимся ($\Sigma F = 0$; $\Sigma M = 0$). При $\Sigma F > 0$ и $\Sigma M > 0$, элемент будет двигаться с ускорением, а при $\Sigma F < 0$ и $\Sigma M < 0$ - с замедлением.

Рассмотрим самую простейшую механическую систему, состоящую из ротора двигателя и непосредственно связанной с ним нагрузки - рабочего органа машины(рис. 11.2):

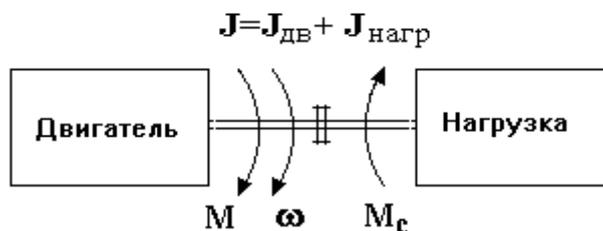


Рис. 16.2

Несмотря на простоту, система вполне реальна: именно так реализована механическая часть ряда насосов, вентиляторов, многих других машин, к такой модели может быть приведена механическая часть большинства электроприводов.

К системе на приложены два момента - электромагнитный момент M , развиваемый двигателем, и момент M_c , создаваемый нагрузкой, а также потери механической части (трение); каждый момент имеет свою величину и направление.

Моменты M и M_c могут зависеть от времени, от положения, от скорости. Наиболее интересна и важна связь моментов M и M_c со скоростью ω . Зависимости $\omega(M)$ и $\omega(M_c)$ называют механическими характеристиками соответственно двигателя и нагрузки (механизма).

Механической характеристикой двигателя называется зависимость его скорости от развиваемого момента $\omega(M)$ или усилия $v(F)$. Различают естественную и искусственную характеристики двигателей.

Естественная характеристика двигателя (она у него единственная) соответствует основной (паспортной) схеме его включения и номинальным параметрам питающего напряжения. На естественной характеристике располагается точка номинального (паспортного) режима двигателя с координатами $\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$.

Если двигатель включен не по основной схеме, или в его электрические цепи включены какие-либо дополнительные электротехнические элементы - резисторы, реакторы, конденсаторы, или же двигатель питается напряжением с ненормальными параметрами, то двигатель будет иметь характеристики, называемые **искусственными**. Таких характеристик двигателя может быть сколько угодно много. Поскольку эти характеристики получают с целью регулирования переменных (координат) двигателя - тока, момента, скорости, положения, то они иногда называются **регулируемыми**.

Механической характеристикой исполнительного органа (ИО) называется зависимость скорости его движения от усилия или момента на нем, т. е. $\omega_{\text{но}}(M_{\text{но}})$ или $v_{\text{но}}(F_{\text{но}})$. В результате операции приведения эти характеристики преобразуются в зависимость вида $\omega(M_c)$, где ω - угловая скорость двигателя, а M_c - приведенный к его валу момент нагрузки.

Механические характеристики принято оценивать их жесткостью

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} . \quad (16.5)$$

Они бывают абсолютно жесткими $\beta = \infty$, абсолютно мягкими $\beta = 0$, могут иметь отрицательную $\beta < 0$ или положительную $\beta > 0$ жесткость.

У каждого двигателя своя механическая характеристика и в зависимости от типа двигателя она имеет различный графический вид.

В приводе постоянного тока интерес представляют характеристики **двигателей с последовательным возбуждением и с независимым возбуждением**.

Для получения механической характеристики ДПТ используем следующие формулы:

при вращении ротора со скоростью ω в обмотке якоря индуцируется ЭДС

$$E = k\Phi\omega, \quad (16.6)$$

где $k = pN/2\pi a$ - конструктивный параметр машины.

ЭДС обмотки якоря отличается от напряжения сети на падение напряжения в суммарном сопротивлении якорной цепи от тока якоря

$$E = U - IR_{я\Sigma} \quad (16.7)$$

общее выражение электромеханической характеристики ДПТ

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_{я\Sigma}}{k\Phi} I \quad (16.8)$$

электромагнитный момент двигателя

$$M = k\Phi I, \quad (16.9)$$

тогда общее выражение механической характеристики ДПТ

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{MR_{я\Sigma}}{(k\Phi)^2} \quad [\text{рад/с}]. \quad (16.10)$$

В электроприводах постоянного тока иногда используются двигатели с последовательным возбуждением, когда специально выполненная обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря.

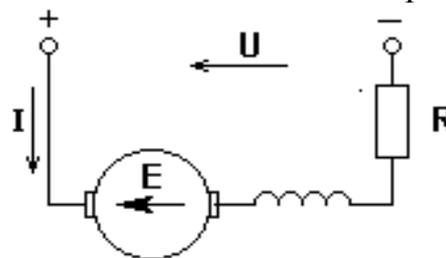


Рис.16.3 Схема двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Для двигателя последовательного возбуждения поток является функцией тока нагрузки $\Phi = \varphi(I)$, т.е. $M \equiv I^2$, механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения изображается гиперболой:

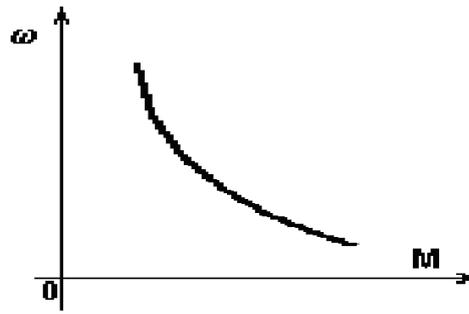


Рис.16.4 Механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения

Жесткость механической характеристики двигателя последовательного возбуждения переменна и возрастает с увеличением нагрузки.

При использовании в электроприводе постоянного тока двигателя с независимым возбуждением уравнение электромеханической характеристики $\omega(I)$:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}$$

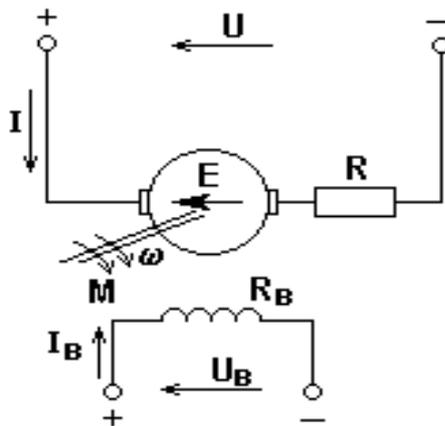


Рис.16.5 Схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Характеристика $\omega(M)$ для ДПТ независимого возбуждения - прямая линия, проходящая через две характерные точки: $M=0, \omega = \omega_0$ и $\omega = 0, M = M_{кз}$.

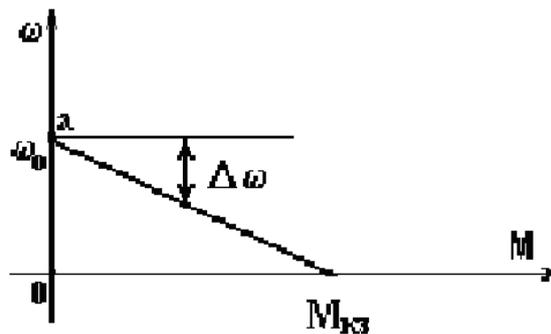


Рис.16.6 Механическая характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Скорость $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ соответствует режиму идеального холостого хода.

Величина $\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$ - перепад скорости под влиянием нагрузки.

Увеличением нагрузки при определенных условиях, можно прийти к режиму короткого замыкания: $\omega = 0$, $M = k\Phi I_{кз} = M_{кз}$.

Искусственные характеристики этих двигателей при реостатном регулировании будут иметь следующий вид:

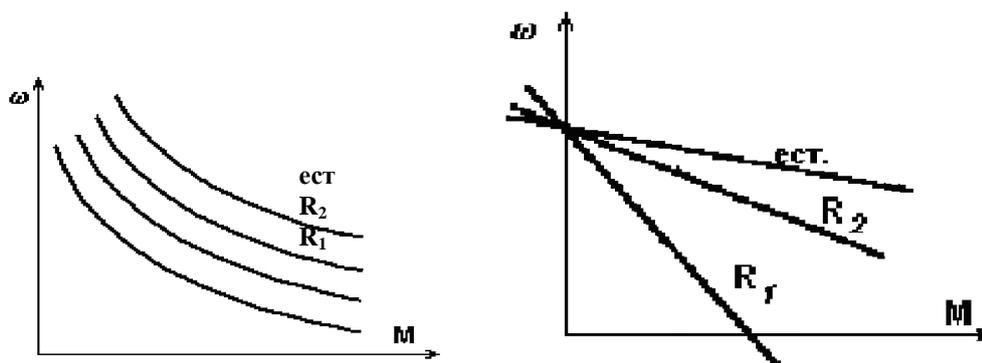


Рис.16.7 Искусственные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения и независимого возбуждения

К электроприводу переменного тока относятся приводы с **асинхронными и синхронными двигателями**.

Статор асинхронных двигателей обычно выполнен в виде нескольких расположенных в пазах катушек, а ротор - в виде “белчьей клетки” (**короткозамкнутый ротор**) или в виде нескольких катушек (**фазный ротор**), которые соединены между собой, выведены на кольца, расположенные на валу, и с помощью скользящих по ним щеток могут быть замкнуты на внешние резисторы.

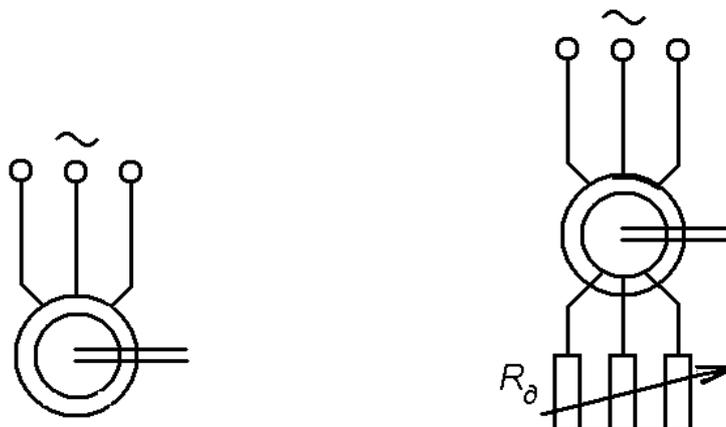


Рис.16.8 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым (с лева) и с фазным ротором (с права)

Для асинхронного двигателя справедливо:
синхронная угловая скорость поля

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad [\text{рад/с}] \quad (16.11)$$

или частота вращения

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p} \quad [\text{об/мин}], \quad (16.12)$$

т.е. при питании от сети $f_1=50$ Гц синхронная частота вращения может быть 3000, 1500, 1000, 750, 600... об/мин в зависимости от конструкции машины.

ЭДС самоиндукции

$$E_1 = 4,44 \Phi f_1 w_1 k, \quad \text{где} \quad (16.13)$$

w - число витков обмотки;

k - коэффициент, зависящий от конкретного выполнения обмотки.

Можно приближённо считать, что магнитный поток определяется приложенным напряжением, частотой и параметрами обмотки:

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4,44 f_1 w_1 k} \equiv \frac{U_1}{f_1}. \quad (16.14)$$

При нагружении вала $\omega \neq \omega_0$; отличие скоростей ω и ω_0 принято характеризовать скольжением

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \rightarrow \omega = \omega_0(1-s) \quad (16.15)$$

Мощность, потребляемая из сети, если пренебречь потерями в R_1 , примерно равна электромагнитной мощности:

$$P_1 \approx P_{эм} = M \omega_0, \quad (16.16)$$

а мощность на валу определяется как

$$P_2 = M \omega. \quad (16.17)$$

Момент на валу двигателя определяется как

$$M_{сп} = c U_1^2 \frac{R_2 s}{R_2^2 + x_2^2 s^2}. \quad (16.18)$$

Механическая характеристика и искусственные характеристики имеют вид

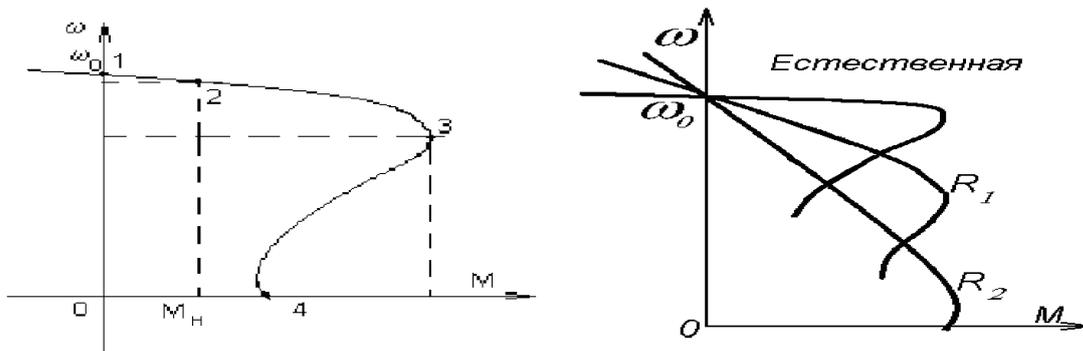


Рис.16.9 Механическая характеристика (с лева) и искусственные характеристики (с права) асинхронного двигателя

Механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая, а искусственных характеристик у него нет, т.к. $\omega_0 = \omega$.

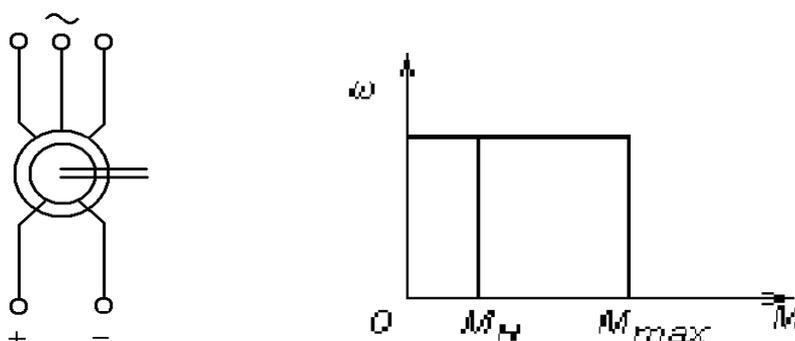


Рис.16. 10 Схема включения и механическая характеристика синхронного двигателя

ЛЕКЦИЯ № 17

17.1. Режимы работы электрических двигателей.

Электрические машины при работе нагреваются за счет потерь энергии в них. для того чтобы изоляция обмоток сохраняла изолирующую способность и оставалась достаточно эластичной в течение срока службы машины, температура нагрева изоляции и самих обмоток при длительной работе должна быть ограничена. кратковременные и не особенно высокие перегревы не приведут к выходу из строя электрической машины, но сократят срок её службы. допустимая нагрузка обычно определяется нагревом наиболее чувствительного элемента - изоляции обмоток, при условии, что нагрев всех частей машины: подшипников, стали, магнитопроводов, коллектора и других частей - не превосходит допустимого.

приведем значения допустимых температур нагрева для некоторых наиболее распространенных видов изоляции.

класс а - хлопчатобумажное волокно, шелк, электрокартон, древесина, пропитанные лаками на основе природных смол и масел; лакоткани и лакобумаги, эмали на основе полиамидных смол, $t_{доп} = 105^{\circ}\text{C}$.

класс в - стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит, пропитанные битумами, синтетическими и эпоксидными смолами, $t_{\text{доп}} = 130^{\circ}\text{C}$.

класс н - стекловолокно, асбест, стеклоткань, миканит, кремний органический каучук, пропитанные кремнийорганическими смолами, $t_{\text{доп}} = 180^{\circ}\text{C}$.

нормирование допустимых температур привело бы к значительным трудностям в эксплуатации: один и тот же двигатель, например, зимой при низкой температуре может развивать большую мощность, чем летом при более высокой температуре воздуха. вместе с тем следует ориентироваться на работу при худших условиях охлаждения летом. поэтому для различных частей двигателей нормируются допустимые превышения температуры θ над температурой окружающей среды $t_{\text{окр}}$ – допустимые перегревы. эти допустимые перегревы не должны быть превышены при работе с полной номинальной мощностью в течение сколь угодно длительного времени или при других стандартных режимах работы.

$$\theta = t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}} \quad (17.1)$$

в качестве стандартной температуры окружающей среды для умеренного климата принята температура $t_{\text{окр}} = 35^{\circ}\text{C}$. для двигателей и генераторов, работающих с искусственным охлаждением, расчетная температура может быть ниже ($t_{\text{окр}} = 20^{\circ}\text{C}$). для жаркого климата $t_{\text{окр}}$ принимается выше 35°C , а для холодного ниже.

различают следующие режимы работы двигателей:

- 1) длительный;
- 2) кратковременный;
- 3) повторно-кратковременный.

дадим характеристику каждому режиму работы.

1. длительным режимом работы называется такой режим, при котором двигатель включается на неопределенно долгое время (от нескольких десятков минут до нескольких дней, недель, месяцев, а иногда и больше год или два), т.е. за время работы двигатель успевает нагреться до установившегося значения температуры.

при любом преобразовании энергии имеются потери, которые преобразуются в тепло:

$$p_1 = p_2 + \delta p, \quad (17.2)$$

где δp – потери на нагрев.

изменение температуры происходит по экспоненте.

θ – перегрев или превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды. сама температура двигателя $t_{\text{дв}}^0$. она складывается из:

$$t_{\text{дв}}^0 = t_{\text{ос}}^0 + \theta, \quad (17.3)$$

где

$$\theta = \theta_{\text{уст}} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (17.4)$$

$\theta_{\text{уст}}$ – это значение температуры до которого нагревается двигатель.

$\theta_{\text{уст}}$ зависит от количества тепла, выделяемого в процессе работы двигателя

$$\delta p = \delta p_{\text{мех}} + \delta p_{\text{ст}} + \delta p_{\text{мед}} = \delta p_{\text{пос}} + i^2 r, \quad (17.5)$$

где i ток двигателя, r – сопротивление.

чем больше нагрузка, тем больше потери, тем больше тепла, тем выше $\theta_{\text{уст}}$.

построим изменение температуры в зависимости от времени t_0 – момента включения двигателя (рис.11.11).

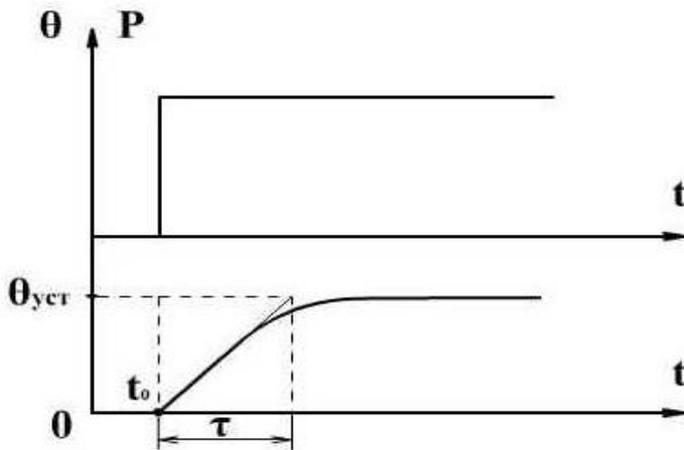


рис.17 11

проведем касательную к экспоненте и получим τ постоянную времени нагрева. через $t = \tau$ превышение температуры θ будет отличаться от $\theta_{уст}$ на 37 %, а при $t = 4\tau$ на 2 %, т.е. составит 98 % от установившегося значения. постоянная времени нагрева в основном зависит от размеров двигателя.

2. кратковременным режимом называется такой режим, при котором двигатель включается на короткое время, а затем на длительное время отключается, т.е. за время работы он не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы полностью охлаждается до температуры окружающей среды.

графически это имеет следующий вид:

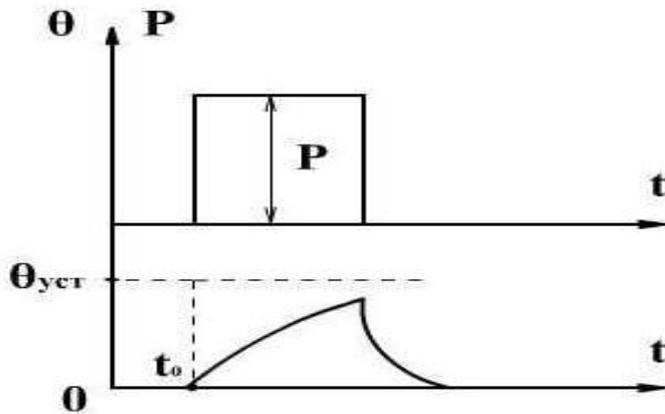
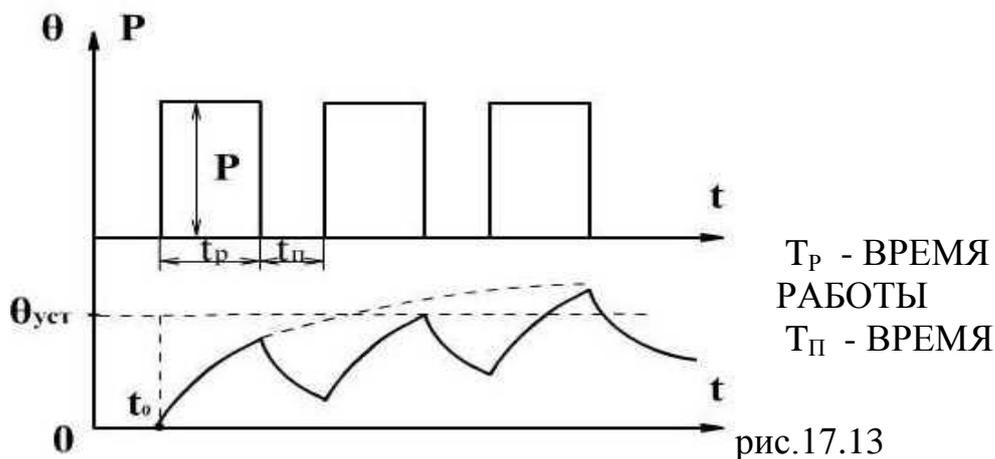


рис.17.12

в момент t_0 произошло включение, двигатель работает сравнительно мало, т.е. за это время не нагревается до установившейся температуры, затем отключается и остывает(рис.11.12).

3. повторно-кратковременным режимом называется такой режим, при котором двигатель включается на короткое время, затем отключается на малое время, т.е. за время работы он не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы полностью охладиться до температуры окружающей среды. время паузы и время работы соизмеримы.

представим этот график.



если через вершины графика изменения температуры провести изменения температуры провести линию, то изменение будет по экспоненте. только пики будут на экспоненте. рабочее время и время паузы, дают время цикла (рис.11.13)

$$t_{ц} = t_p + t_{п} \quad (17.6)$$

повторно-кратковременный режим характеризуется отношением рабочего времени к времени цикла в %. эта величина обозначается или пв %, или пр %.

$$ПВ \% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 \% ; \quad ПР \% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 \% \quad (17.7)$$

17.2. Выбор двигателей при различных режимах работы.

1. Выбор двигателя при длительном режиме работы.

двигатель при этом режиме нагревается до установившейся температуры. номинальная мощность p - та мощность, при которой двигатель работает сколько угодно долго, нагреваясь до предельно допустимой температуры, считая $t = 35,5$ °с. если двигатель недогружен, то его температура меньше предельно допустимой, если перегружен, то его температура выше предельно допустимой, а это значит, что изоляция может сгореть и двигатель выйдет из строя.

различают: $p_{им}$ - мощность исполнительного механизма и $p_{ном.дв.}$ - мощность, указанная в паспорте двигателя.

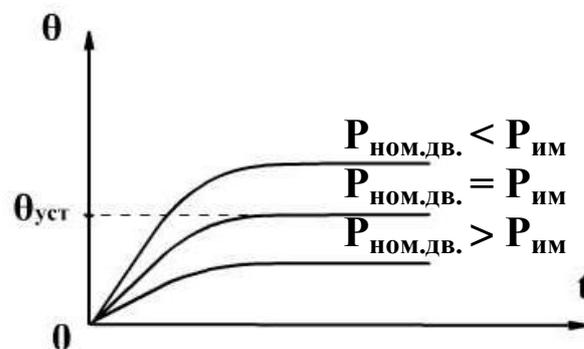


рис.17.14

из графика видно, что мощность двигателя может быть равна или больше мощности исполнительного механизма(рис 11.14).

порядок выбора:

1) определяем мощность исполнительного механизма - это мощность на валу двигателя. для различных механизмов существуют разные способы определения $P_{им}$ например:

$$P_{вен} = \frac{Qhk}{102 \eta_{вен} \eta_{пер}} \quad \text{кВт,} \quad (17.8)$$

где

q - расход воздуха в м³/сек.

h - избыточное давление или разрежение в мм. водяного столба;

k - коэффициент запаса, $k = 1,1$ для крупных вентиляторов, до 2 для очень маленьких;

102 - переводной коэффициент в кВт.

$$P_{нас} = \frac{QHk \gamma}{102 \eta_{нас} \eta_{пер}} \quad \text{кВт,} \quad (17.9)$$

где

q - расход м³/сек;

h - напор в м.;

γ - удельный вес воды = 1000 кг/м³;

k - коэффициент запаса.

для других механизмов такие формулы берутся из справочника.

2) по каталогу выбираем двигатель так, чтобы соблюдалось условие

$$P_{ном. дв.} \geq P_{им.} \quad (17.10)$$

3) производим проверку по пусковому моменту:

$$m_{пуск} > m_{сопр. и.м.} \quad (17.11)$$

чаще всего встречаются две характеристики изменения момента сопротивления:

1) вентиляторная;

2) характеристика с постоянным моментом

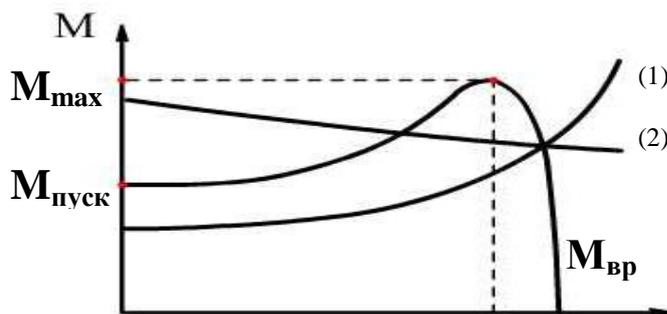


рис.17.15

на рис.11.15 представлены механические характеристики исполнительных механизмов и асинхронного двигателя. если изменение момента сопротивления происходит по вентиляторной характеристике (1) проверку можно не производить. если же изменение момента происходит по характеристике с постоянным моментом (2), то проверку обязательно производят. если условие $M_{пуск} > m_{сопр. и.м.}$ не соблюдается, то либо выбирают двигатель большей мощности, либо с повышенным пусковым моментом, а именно марки ап и аоп

2. Выбор двигателя при кратковременном режиме.

если выбирать двигатель в этом режиме по мощности, то двигатель будет использован не полностью. так как двигатель в этом режиме не нагревается до установившейся предельно допустимой температуры, то его можно перегрузить(рис.11.16).

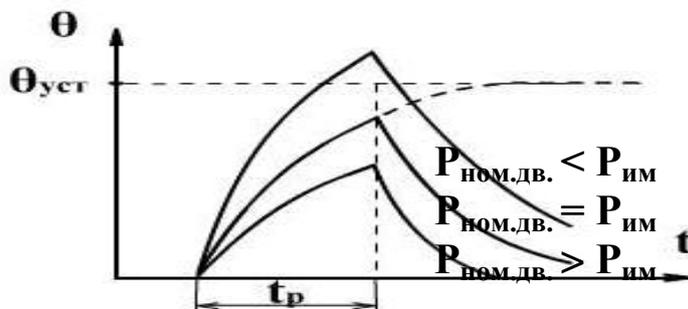


рис.17.16

поэтому выбор двигателя производят не по мощности, а по моменту.
 порядок выбора:

- 1) определяем мощность исполнительного механизма $P_{и.м.}$
- 2) определяем момент сопротивления исполнительного механизма

$$M_{и.м.} = \frac{P_{и.м.}}{2\pi \cdot n / 60} \quad (17.12)$$

- 3) по каталогу выбираем двигатель так, чтобы

$$M_{ном.дв.} > 1,2m_{сопр.и.м.} \quad (17.13)$$

т.е. 20% -это запас по моменту на случай понижения напряжения.

- 4) производим проверку по пусковому моменту

$$M_{пуск} > M_{сопр.и.м.}$$

опять рассматриваем две характеристики, как в предыдущем режиме.

если условие $M_{пуск} > M_{сопр.и.м.}$ не соблюдается, не рекомендуется брать двигатели

нормального исполнения, у которых $\frac{M_{max}}{M_{пуск}} = 1,8 \dots 2,5$, а берут двигатели

специального исполнения, у которых $\frac{M_{max}}{M_{пуск}} = 3 \dots 4$.

стоимость двигателя определяется $P_{ном.дв.}$. чем меньше мощность, тем двигатель дешевле.

3. Выбор двигателя при повторно-кратковременном режиме.

при выборе двигателя возможны два варианта:

- 1) нагрузка постоянная; 2) нагрузка переменная.
- 1) нагрузка постоянная

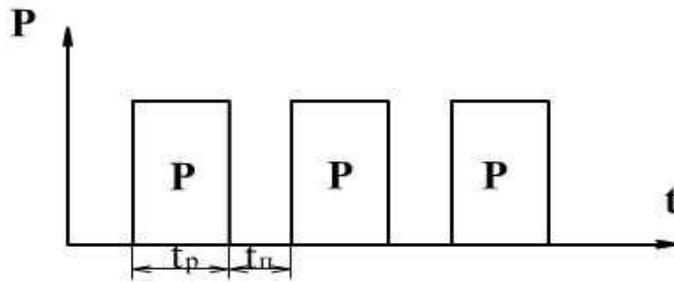


рис.17.17

при выборе двигателя в этом случае нужно учитывать и мощность исполнительного механизма и пв %, т.е. продолжительность включения.

порядок выбора:

1) определяем мощность исполнительного механизма $p_{и.м.}$

2) определяем $ПВ \% = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100 \%$;

в каталоге дается мощность двигателя в соответствии с различными пв%:
 пв% = 15%; 25% и 40%

если пв% > 40%, то режим считается длительным и выбор производится как при длительном режиме.

3) в каталоге для соответствующего значения пв % и p выбираем двигатель, так чтобы $p_{ном} > p_{и.м.}$

если значение пв % не соответствует стандартному, то производится перерасчет мощности для стандартного значения

$$P_1 \sqrt{ПВ_1 \%} = P_2 \sqrt{ПВ_2 \%}; \quad P_2 = P_1 \sqrt{\frac{ПВ_1 \%}{ПВ_2 \%}} \quad (17.14)$$

получаем новую мощность и производим выбор двигателя.

2) нагрузка переменная, т.е. изменяется за время цикла

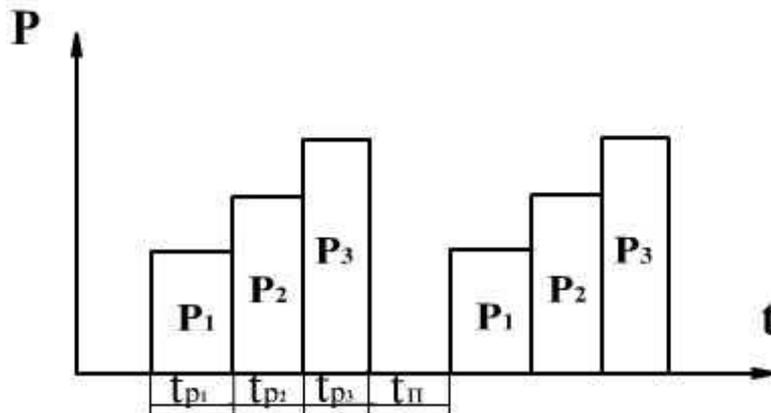


рис.17.18

в этом случае расчет производится по эквивалентной мощности.

порядок выбора двигателя:

1. определяем эквивалентную мощность исполнительного механизма

$$P_{экв} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{1p} + P_2^2 t_{2p} + P_3^2 t_{3p}}{t_{1p} + t_{2p} + t_{3p} + t_n}}, \quad (17.15)$$

где

$$t_{1p} + t_{2p} + t_{3p} + t_{п} = t \text{ цикла} \quad (17.16)$$

2. по каталогу выбираем двигатель так, чтобы соблюдалось условие:

$$P_{\text{ном.дв.}} > P_{\text{экв}} \quad (17.17)$$

3. производим проверку по пусковому моменту

$$M_{\text{пуск}} > m_{\text{сопр.и.м.}}$$

4. производим проверку по максимальному моменту

$$M_{\text{ном.дв.}} > 1,2m_{\text{сопр.и.м.}}$$

если условие (3) или (4) не соблюдается, то выбор производят по тому условию, которое не соблюдается, т.е. выбирают более мощный двигатель.

во всех возможных случаях рекомендуется применять асинхронные двигатели трехфазного тока.

в тех случаях, когда требуются большие мощности двигателя (>100кВт) и установки работают длительное время, то рекомендуется применять синхронные двигатели.

если необходимо изменять скорость в широких пределах, рекомендуются двигатели постоянного тока.

в сухих и чистых помещениях применяют двигатели в защищенном исполнении серии а и ал

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин А. С., Немцов М. В. «Электротехника». Высшая школа. Москва. 2000 г.
2. под редакцией В. Г. Герасимова «Электротехника». Высшая школа. Москва. 1989 г.
3. под редакцией В. Г. Герасимова «Основы промышленной электроники». Высшая школа. Москва. 1986 г.
4. В. Н. Ушаков «Электротехника и электроника». Учебное пособие. Москва. Высшая школа. 1997 г.