

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Ивановский государственный химико-технологический университет

В.Л.Котов, М.Г.Донцов

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Электрические машины и аппараты. Основы промышленной электроники

Конспект лекций для студентов специальности 200503

Стандартизация и сертификация

Иваново 2007

Лекция 1. Магнитные цепи.

Работа электрических машин и аппаратов, а также электроизмерительных приборов основана на использовании электромеханического и индуктивного действий магнитного поля.

Чтобы использовать эти явления, в рабочем объеме названных электротехнических устройств, необходимо создать магнитное поле заданной интенсивности и конфигурации.

Часть электротехнического устройства, содержащая ферромагнитные тела, предназначенная для создания магнитного поля, называется **магнитной цепью**.

Магнитная цепь состоит из элементов, возбуждающих магнитное поле, которые называются **источником магнитодвижущей силы (МДС)** и **магнитопроводом**. Источниками магнитодвижущей силы могут быть постоянные магниты или катушки с током. Магнитопровод – ферромагнитный сердечник, который создает замкнутый путь для магнитных силовых линий поля.

Конструктивно магнитные цепи могут быть разветвленными и неразветвленными, однородными и неоднородными, с одним или несколькими источниками МДС.

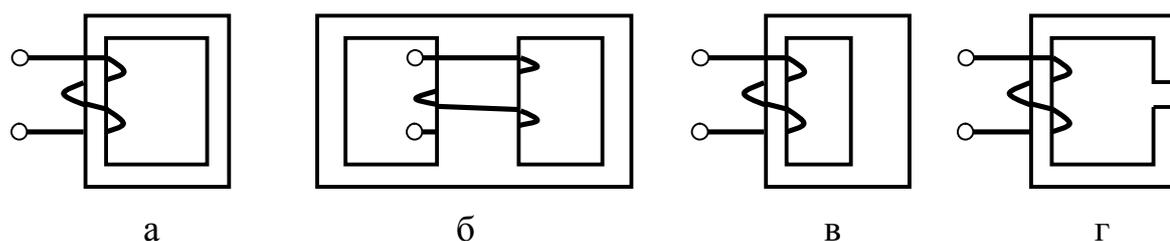


Рис. 1. Магнитная цепь с одним источником МДС:

а, в, г – неразветвленные; б – разветвленная; в – неоднородная (правый стержень магнитопровода имеет большее сечение); г – неоднородная (магнитная цепь имеет воздушный зазор).

1.1. Основные характеристики магнитного поля.

Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция **В**. Величина магнитной индукции численно равна силе, с которой магнитное поле действует на проводник длиной 1 м, расположенный перпендикулярно магнитным силовым линиям, по которому протекает ток в 1 А. В системе СИ магнитная индукция измеряется в Теслах, $1 \text{ Тл (Тесла)} = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$. Магнитная индукция величина векторная, ее направление в любой точке магнитного поля совпадает с направлением касательной к магнитной силовой линии. Магнитная индукция определяет интенсивность поля в заданной точке пространства, поэтому она является точечной характеристикой поля. При расчете электротехнических

устройств наряду с точечной характеристикой магнитного поля пользуются объемной характеристикой - **магнитным потоком Φ** .

Магнитный поток Φ , пронизывающий площадку S , расположенную перпендикулярно силовым линиям поля, определяется как:

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.1)$$

В системе СИ магнитный поток измеряется в Веберах (Вб), $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}$. Магнитная индукция, создаваемая проводниками, по которым течет ток, зависит от величины токов, геометрических размеров проводников и от свойств среды, в которой создается поле.

$$B = \mu_a \cdot H \quad (1.2)$$

где H – напряженность магнитного поля, величина, зависящая от тока и геометрических размеров проводников; μ_a – магнитная проницаемость – величина, характеризующая свойства среды, в которой создается магнитное поле. В системе СИ напряженность магнитного поля измеряется в А/м, а магнитная проницаемость в Гн/м.

1.2. Намагничивание ферромагнитных материалов.

Магнитная индукция, образованная данным током в вакууме, отличается от индукции, образованной тем же током в ферромагнитной среде из-за ее намагничивания:

$$B = B_0 + B_{cp} \quad (1.3)$$

где B_0 – индукция, создаваемая током в вакууме; B_{cp} – индукция, создаваемая намагниченной средой.

Сущность намагничивания среды состоит в ориентации спиновых магнитных моментов во внешнем поле. Степень намагничивания характеризуется векторами **намагниченности J** – магнитным моментом элементарных токов, отнесенных к единице объема вещества.

Если магнитная индукция, создаваемая данным током в вакууме равна:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad (1.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума, то магнитная индукция, создаваемая тем же током в ферромагнитной среде, будет:

$$B = \mu_0(H + J) = \mu_0 H + \mu_0 J \quad (1.5)$$

Следовательно, ферромагнитная среда при намагничивании усиливает магнитную индукцию, создаваемую током. Усиление индукции будет тем больше, чем больше намагниченность ферромагнетика. Свойство

ферромагнитных материалов усилить магнитное поле характеризуется относительной магнитной проницаемостью μ_r . Она показывает во сколько раз магнитная индукция \mathbf{B} , создаваемая данным током в данном ферромагнитном материале, больше магнитной индукции \mathbf{B}_0 , создаваемой тем же током в вакууме.

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (1.6)$$

Иными словами, относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз ферромагнитный материал способен усилить магнитное поле.

В электротехнике для усиления магнитных полей используют ферромагнитные материалы с относительной проницаемостью 700 – 800 000. Их характерной особенностью является сильная зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего поля.

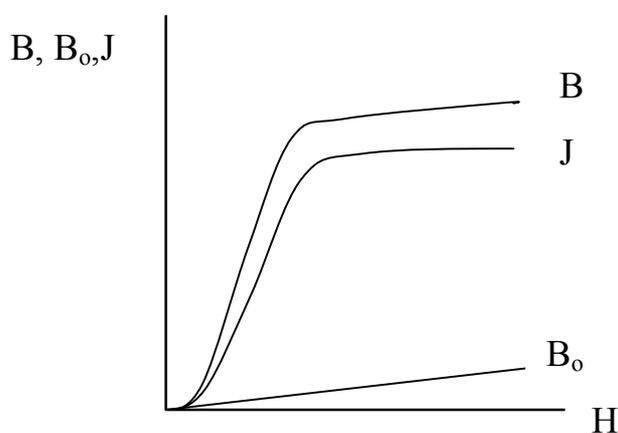


Рис. 1.2. Зависимость магнитной индукции в вакууме B_0 , намагниченности ферромагнетика J , и магнитной индукции B от напряженности H внешнего поля.

Как видно из рис. 1.2, намагниченность ферромагнитного материала быстро растет в слабых полях, а когда все спиновые моменты будут сориентированы вдоль внешнего поля, ее рост прекращается.

Зависимость $B=f(H)$ называется кривой первоначального намагничивания. В слабых полях индукция B увеличивается за счет намагничивания ферромагнетика, а когда он намагнитится до насыщения, индукция растет только за счет B_0 , создаваемой внешним полем.

Кривая первоначального намагничивания позволяет определить абсолютную μ_a и относительную μ_r магнитные проницаемости при заданной напряженности внешнего поля:

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad \text{и} \quad \mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (1.7)$$

знание которых необходимо при практических расчетах электромагнитных устройств. Кривые первоначального намагничивания ферромагнитных материалов, выпускаемых для электротехнической промышленности, можно найти в электротехнических справочниках.

Если после намагничивания ферромагнитного материала до насыщения и достижения максимальной индукции B_m уменьшать напряженность внешнего поля до 0, то магнитная индукция будет уменьшаться по кривой 1-2 и не будет совпадать с кривой первоначального намагничивания 0-1 (рис.1.3).

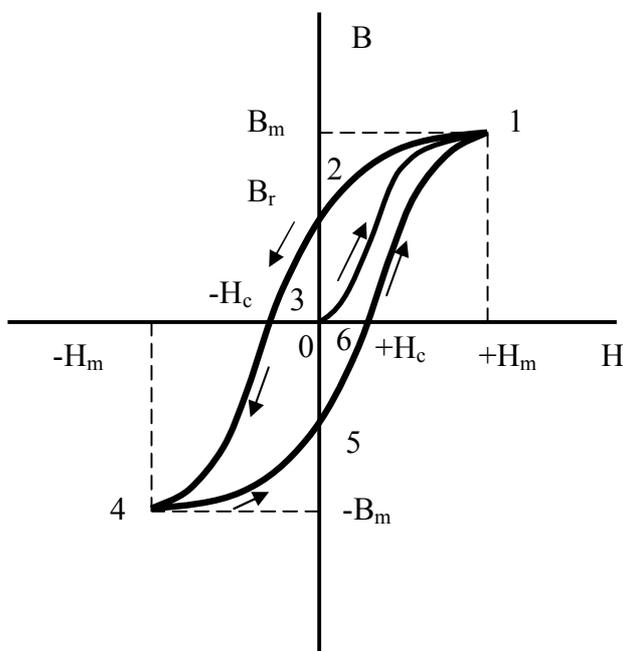


Рис. 1.3. Петля гистерезиса

Значение напряженности внешнего поля, при которой ферромагнетик полностью размагнитится, называется **коэрцитивной силой** $-H_c$. При изменении напряженности поля от $-H_c$ до $-H_m$ ферромагнетик будет опять намагничиваться по кривой 3-4, достигая максимальной индукции $-B_m$, а при изменении напряженности поля от $-H_m$ до 0 он вновь будет размагничиваться до значения индукции $-B_r$, а при достижении напряженности поля $+H_c$ он вновь будет полностью размагничен. Дальнейшее намагничивание ферромагнитного материала пойдет по кривой 6-1.

Замкнутая кривая, характеризующая изменение магнитной индукции в зависимости от напряженности внешнего поля, называется **петлей гистерезиса**. Ее площадь пропорциональна энергии, которая затрачивается на один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнитного материала.

1.3. Основные ферромагнитные материалы.

В зависимости от величины коэрцитивной силы ферромагнитные материалы делят на магнитомягкие $H_c < 400$ А/м и магнито жесткие $H_c > 400$ А/м.

Магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса, что говорит о малых потерях на перемагничивание; индукция насыщения B_m у таких материалов велика и лишь незначительно отличается от остаточной

При напряженности внешнего поля $H=0$ магнитная индукция $B \neq 0$, а достигает некоторого значения B_r , которое называется остаточной индукцией. Таким образом, размагничивание ферромагнитной среды отстает от изменения напряженности внешнего поля. Явление отставания изменения магнитной индукции от изменения напряженности внешнего поля называется **магнитным гистерезисом**.

Для того чтобы полностью размагнитить ферромагнитный материал, необходимо создать поле противоположного направления напряженностью $-H_c$.

индукции B_r , а коэрцитивная сила H_c мала, поэтому они легко перемагничиваются.

Самым распространенным магнитомягким материалом является листовая **электротехническая сталь**, которая применяется для изготовления магнитопроводов электрических машин и аппаратов. Для уменьшения вихревых токов, возникающих в магнитопроводах при работе в переменных магнитных полях, вводя в ее состав при варке до 45% кремния.

Магнитопроводы, работающие в слабых магнитных полях, должны иметь большую относительную магнитную проницаемость на начальном участке кривой намагничивания - $\mu_{a \text{ нач.}}$. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют железо-никелевые сплавы с добавками молибдена или ванадия, которые называются **пермаллоями**.

Для получения очень сильных магнитных полей применяют железо-кобальтовые сплавы, называемые **пермендюрами**. Они позволяют получать магнитные поля с индукцией насыщения до 2,5 Тл.

Магнито жесткие материалы имеют высокую остаточную индукцию и коэрцитивную силу и применяются для изготовления постоянных магнитов. Наиболее распространенные магнито жесткие сплавы Fe-Ni-Al (альни), Fe-Ni-Al-Co (альнико), Fe-Ni-Al-Si (альниси), которые обладают коэрцитивной силой до 200 кА/м и магнитной энергией в зазоре между полюсами магнита свыше 80 кДж/м³. Для работы в ответственной аппаратуре применяют постоянные магниты из сплавов кобальта с самарием, гадолинием и диспрозием, которые обладают высочайшими магнитными характеристиками, но очень дороги. Широкое распространение получили также магниты из порошков, которые получают прессованием порошков сплавов альни, альнико и кобальт-самарий, а также магниты из ферритов бария и кобальта.

Особую группу магнитных материалов составляют магнитомягкие материалы со специальными свойствами. Наиболее распространены в этой группе материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, которые применяют в вычислительной технике, т. К. они четко и быстро переходят из одного магнитного состояния $-B_m$ в другое $+B_m$. К этой группе относятся также **термомагнитные и магнито стрикционные материалы**. Термомагнитные материалы (сплавы никеля с медью) изменяют свои свойства при изменении температуры и применяются в измерительной технике для компенсации влияния температуры на показания приборов. Магнито стрикционные материалы изменяют геометрические размеры под действием внешнего магнитного поля и применяются в генераторах акустических колебаний звуковой и ультразвуковой частоты.

1.4. Закон полного тока.

Свойство тока создавать магнитное поле называется **намагничивающей силой тока Θ** . В системе Си намагничивающая сила измеряется в амперах.

Закон полного тока гасит: интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру, равен алгебраической сумме токов, пронизывающих этот контур.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i = \Theta \quad (1.8)$$

где, i – номер тока; n – количество токов; l – средняя длина силовой линии.

Положительными считаются токи, направления которых совпадают с направлением обхода контура. Положительные направления тока и магнитного поля, создаваемого этим током, связаны правилом правостороннего винта. Если положительное направление тока совпадает с направлением поступательного движения винта, то направление его вращения совпадает с положительным направлением магнитного поля.

В большинстве электромагнитных устройств напряженность поля вдоль силовой линии изменяется в зависимости от свойств участков, по которым она проходит. В таких случаях магнитная цепь разбивается на ряд однородных участков, в пределах которых условия прохождения магнитных силовых полей не меняются (рис. 1.4).

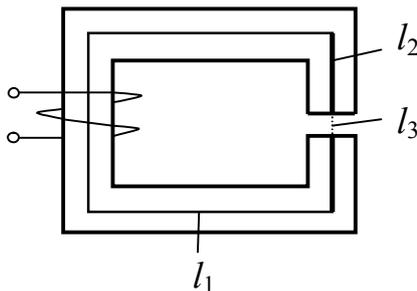


Рис. 1.4. Неоднородная магнитная цепь (выделены однородные участки: l_1 , l_2 , l_3).

В этом случае интеграл по замкнутому контуру можно заменить суммой интегралов по отдельным участкам. Учитывая, что в реальных устройствах для создания полей используются катушки с токами, намагничивающая сила которых:

$$\Theta = I \cdot w \quad (1.9)$$

где w – число витков катушки.

Закон полного тока может быть записан следующим образом:

$$I \cdot w = \int_0^{l_1} H_1 \cdot dl_1 + \int_0^{l_2} H_2 \cdot dl_2 + \int_0^{l_3} H_3 \cdot dl_3 \quad (1.10)$$

Так как в пределах каждого участка напряженность поля не меняется, после интегрирования получим:

$$I \cdot w = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 \quad (1.11)$$

Если магнитная цепь однородна, тогда $I \cdot w = H \cdot l$ и

$$H = \frac{I \cdot w}{l} \quad (1.12)$$

т. е. напряженность магнитного поля – есть намагничивающая сила, приходящаяся на единицу длины силовой линии.

1.5. Расчет неразветвленной магнитной цепи с одним источником намагничивающей силы.

При расчете магнитных цепей размеры магнитопровода и марка стали, из которой он изготовлен, должны быть известны. Свойства стали описывается кривой намагничивания, которую находят в справочнике по заданной марке. При этом различают прямую и обратную задачи. При решении прямой задачи по заданной величине магнитного потока или индукции требуется определить величину намагничивающей силы, которая необходима для их создания. При решении обратной задачи по заданной величине намагничивающей силы необходимо определить величину магнитного потока. При этом считают, что магнитный поток замыкается только по магнитопроводу, выпучивание магнитных силовых линий у неоднородных цепей с воздушным зазором пренебрегают.

а) прямая задача.

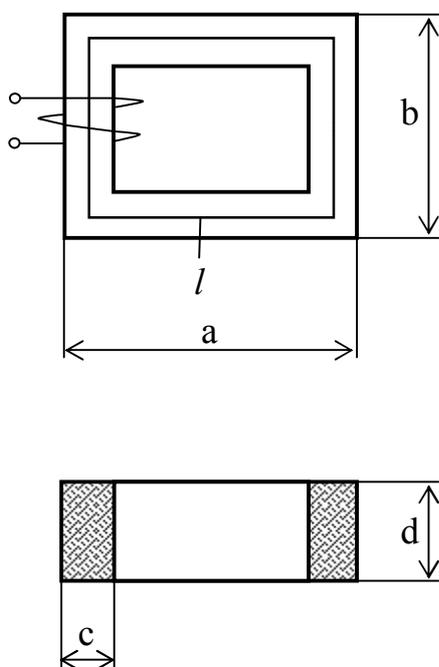


Рис. 1.5а. Чертеж магнитопровода.

Дано: Магнитный поток Φ ,
Геометрические размеры магнитопровода и кривая намагничивания.

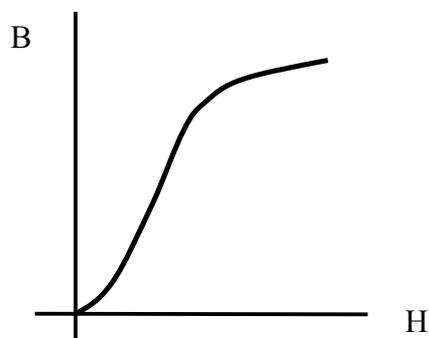


Рис. 1.5б. Петля гистерезиса

Определить величину тока в катушке, имеющей w витков для создания потока Φ .

1. Определяем магнитную индукцию в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения сердечника, по чертежу $S=c \cdot d$.

2. По кривой намагничивания для рассчитанного значения B , находим напряженность H поля сердечника.

3. По закону полного тока находим намагничивающую силу катушки:

$$H \cdot l = \Theta,$$

где l – средняя длина силовой линии.

По чертежу $l = 2(a - c) + 2(b - c)$.

4.Находим ток в катушке:

$$\Theta = I \cdot w, \quad I = \frac{\Theta}{w}$$

б) обратная задача.

Дано: число витков катушки w , ток протекающий по катушке I , геометрические размеры магнитопровода и кривая намагничивания.

Определить величину магнитного потока в сердечнике.

1. находим намагничиваю силу катушки:

$$\Theta = I \cdot w$$

2.Находим напряженность поля в сердечнике:

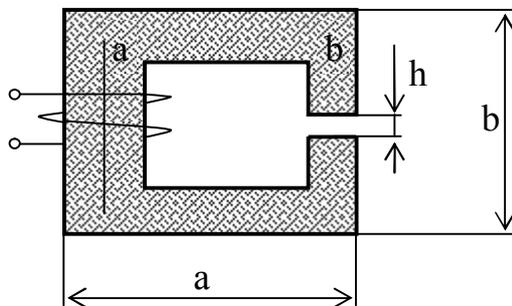
$$H = \frac{\Theta}{l}$$

3.По кривой намагничивания находим магнитную индукцию B в сердечнике.

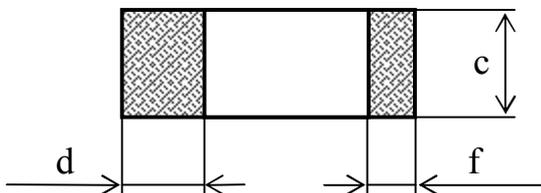
4.Находим магнитный поток Φ :

$$\Phi = B \cdot S,$$

в) неоднородная неразветвленная магнитная цепь (прямая задача).



Дано: Магнитный поток Φ , геометрические размеры магнитопровода, кривая намагничивания.
Определить: величину тока в катушке, имеющей w витков для создания потока Φ .



Решение:

1.Разбиваем цепь на три однородных участка «а», «b» и «h».

2.Определяем сечения

участков «а» и «b»:

$$S_a = c \cdot d; \quad S_b = c \cdot f.$$

Рис. 1.6. Неоднородная цепь с воздушным зазором.

3.Находим магнитную индукцию на участке «а» и «b»:

$$B_a = \frac{\Phi}{S_a}; \quad B_b = \frac{\Phi}{S_b}$$

4. По кривой намагниченности находим напряженность полей H_a и H_b на участках «а» и «б».

5. Находим напряженность поля в воздушном в зазоре:

$$H_3 = \frac{B_b}{\mu_0}$$

6. Находим намагничивающую силу:

$$\Theta = H_a \cdot l_a + H_b \cdot l_b + H_3 \cdot h;$$

где: $l_a = b - f$; $l_b = 2(a - d/2 - f/2) + (b - h)$.

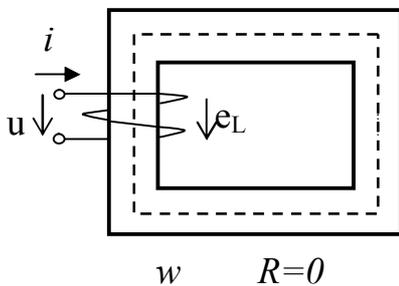
7. Находим ток в катушке:

$$I = \frac{\Theta}{w}$$

Обратная задача может быть решена методом последовательных приближений или графоаналитическими методами.

1.6. Катушка со стальным сердечником при синусоидальном напряжении.

Катушка со стальным сердечником является важнейшим элементом трансформаторов, электрических машин, электромагнитных реле, магнитных усилителей и многих других электротехнических устройств. Ее работа при синусоидальном напряжении имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при расчете и эксплуатации электрооборудования.



Допустим, что активное сопротивление катушки пренебрежительно мало, а ее магнитный поток целиком замыкается по сердечнику (рис. 1.7). При подключении ее к источнику синусоидального напряжения:

Рис. 1.7. Идеализированная катушка с ферромагнитным сердечником. $u = U_m \sin \omega t$, (1.13)

в ней будет протекать переменный ток, намагничивающая сила которого будет создавать переменный магнитный поток Φ . Пересекая витки катушки, поток будет наводить в ней ЭДС самоиндукции e_L , направление которой совпадает с направлением тока.

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.14)$$

На основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$u = -e_L = w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.15)$$

Совместное решение уравнений 1.13 и 1.15 дает:

$$\Phi = \frac{U_m}{w \cdot \omega} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.16)$$

Обозначим

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega}, \quad (1.17)$$

тогда для магнитного потока в сердечнике будем иметь:

$$\Phi = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.18)$$

Поток в сердечнике катушки изменяется по синусоидальному закону и отстает по фазе приложенного напряжения на четверть периода.

Синусоидальный поток циклически перемагничивает сердечник, в котором при этом происходит необратимое преобразование энергии в тепло. Затраты на перемагничивание **называется потерями на гистерезис**. Кроме того, переменный поток вызывает появление в сердечнике вихревых токов, которые также способствуют его нагреву. Суммарная энергия, расходуемая на гистерезис и вихревые токи, **называется потерями в стали**, которые уменьшают КПД электротехнических устройств. Для уменьшения потерь магнитопроводы с переменным током изготавливают из специальной электротехнической стали, а для снижения вихревых токов они собираются из отдельных, изолированных друг от друга слоев лака, листов.

Решая уравнение 1.17 относительно напряжения и переходя к действующему его значению, получим:

$$U = \frac{2\pi \cdot f \cdot w}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_m = 4,44 f \cdot w \cdot \Phi_m .$$

Т. к. по абсолютной величине ЭДС самоиндукции равна приложенному напряжению, можно записать:

$$E = 4,44 f \cdot w \cdot \Phi_m \quad (1.19)$$

Выражение 1.19 называется уравнением трансформаторной ЭДС и используется при расчете всех электромагнитных устройств с переменным магнитным потоком.

Лекция 2. Трансформатор.

2.1. Назначение. Области применения. Принцип Действия. Номинальные величины.

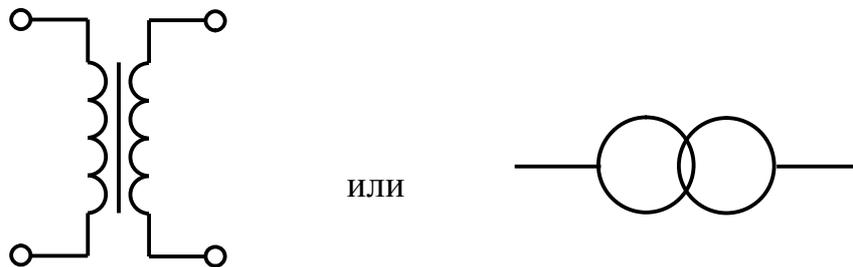
Трансформатор это статический электромагнитный аппарат, который посредством магнитного поля преобразует переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы используются при передаче электроэнергии от станции к потребителю, при ее распределении между отдельными потребителями, для питания отдельных особо мощных потребителей, в технике связи, радиотехнике и телевидении, в измерительной технике.

Столь широкие области применения трансформаторов требуют широкого диапазона их мощностей. Трансформаторы изготавливаются на мощности от сотен мВА до нескольких ВА, а трансформаторы систем автоматики на доли ВА.

Конструктивно трансформаторы бывают однофазные и трехфазные; в зависимости от количества обмоток они делятся на двухобмоточные и многообмоточные, а в зависимости от способа охлаждения они бывают сухие и масляные.

На схемах трансформаторы обозначаются символами:



Трансформатор состоит из стального замкнутого сердечника и двух или нескольких не связанных электрически между собой обмоток. Они также тщательно изолированы от сердечника.

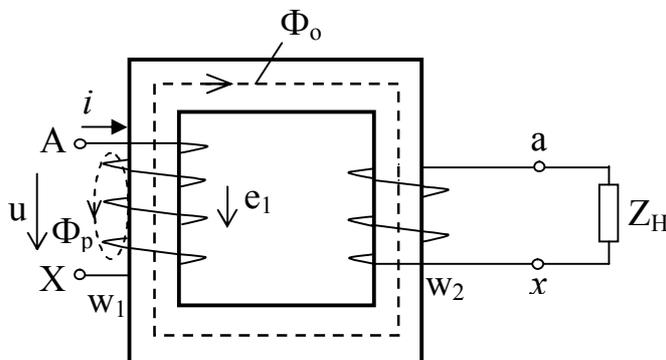


Рис. 2.1. Электромагнитная схема трансформатора.

Сердечник служит для усиления магнитного потока, который связывает обмотки между собой. Для уменьшения в нем вихревых токов сердечник изготавливается из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Обмотка, которая подключается к источнику энергии, называется первичной и обозначается символом w_1 ,

обмотка, от которой электроэнергия отводится, называется вторичной и обозначается символом w_1 . Начало и конец обмотки высшего напряжения обозначается буквами «А» и «Х», а начало и конец обмотки низшего напряжения обозначаются буквами «а» и «х».

Трансформатор может иметь несколько вторичных обмоток, каждая из которых замыкается на свою нагрузку.

Под действием подведенного переменного напряжения u_1 в первичной обмотке возникает переменный ток i_1 . Намагничивающая сила $i_1 \cdot w$ этого тока создает переменный магнитный поток Φ , большая часть которого замыкается по сердечнику, образуя **основной магнитный поток Φ_0** . Меньшая часть потока замыкается в воздухе, охватывая только витки первичной обмотки, и называется **потокосом первичного рассеяния Φ_p** .

Основной магнитный поток Φ_0 охватывает витки обеих обмоток и индуцирует в них переменные e_1 и e_2 . На основании закона электромагнитной индукции можно записать:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi_0}{dt} ; \quad e_2 = -W_2 \frac{d\Phi_0}{dt} \quad (2.1)$$

Отношение ЭДС в обмотках трансформатора называется коэффициентом трансформации:

$$K_{12} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2} = \text{const} \quad (2.2)$$

Для данного трансформатора коэффициент трансформации k_{12} есть величина постоянная.

В паспорт трансформатора в качестве коэффициента трансформации заносится отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения.

Потоки рассеяния, замыкающиеся в воздухе, сцеплены только с одной из обмоток, и также индуцируют в них ЭДС, которые называются ЭДС рассеяния e_{p1} и e_{p2} .

Величины, характеризующие условия работы, на которые трансформатор рассчитан, называются номинальными, они заносятся в паспорт трансформатора.

Номинальной полезной мощностью трансформатора называется полная мощность на зажимах вторичной обмотки S_{2H} при номинальном напряжении U_{2H} и номинальном токе I_{2H} .

$$S_{2H} = U_{2H} \cdot I_{2H} \quad (2.3)$$

Т. к. КПД трансформатора очень высок, можно считать, что:

$$S_{1H} \approx S_{2H} = U_{1H} \cdot I_{1H} = U_{2H} \cdot I_{2H} = U_H \cdot I_H$$

или

$$S_H = U_H \cdot I_H \quad (2.4)$$

Номинальным током обмотки называется ток, связанный с номинальной мощностью и номинальным напряжением соотношением:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}}; \quad I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}} \quad (2.5)$$

2.2. Холостой ход трансформатора.

Холостым ходом трансформатора называется такой режим работы, при котором к зажимам первичной обмотки подведено номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. В этом режиме в первичной обмотке протекает ток холостого хода i_0 , намагничивающая сила которого $i_0 \cdot w_1$ создает магнитный поток, меньшая часть которого замыкается в воздухе, охватывая только витки первичной обмотки, а большая его часть замыкается в сердечнике, охватывая витки обеих обмоток и создает ЭДС самоиндукции e_1 и e_2 . При изучении цепей переменного тока, для цепи с идеальным индуктивным элементом, поток которого замыкается в воздухе, было получено соотношение:

$$e_L = -u_L \frac{di}{dt} \quad \text{или} \quad u_L = L \frac{di}{dt}$$

Т. к. ЭДС рассеяния создается потоком, замыкающимся в воздухе, для него можно записать аналогичное выражение:

$$e_{1p} = -L_{1p} \frac{di}{dt} \quad (2.6)$$

где L_{1p} – индуктивность рассеяния.

Для ЭДС e_1 , создаваемой потоком, замыкающимся в ферромагнитном сердечнике, такого выражения записать нельзя. Кроме того, обмотка трансформатора обладает активным сопротивлением R_1 , при протекании по которому тока в нем возникает падение напряжения $i \cdot R_1$.

На основании второго закона Кирхгофа для контура первичной обмотки можно записать:

$$e_1 + e_{1p} = -u_1 + i \cdot R_1$$

Следовательно:

$$u_1 = -e_1 - e_{1p} + i \cdot R_1$$

Учитывая 2.6 получим:

$$u_1 = -e_1 + L_{1p} \frac{di}{dt} + i \cdot R_1 \quad (2.7)$$

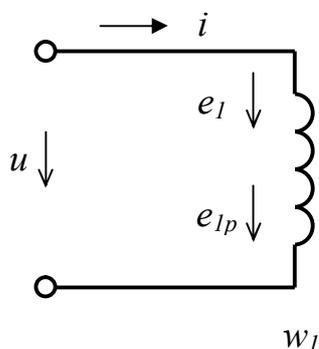


Рис.2.2. Контур первичной обмотки.

Уравнение 2.7 позволяет считать, что реальная обмотка трансформатора может быть представлена в виде двух катушек: $R_1 - L_p$ – линейной катушки, поток которой замыкается в воздухе и идеализированной – с числом витков w_1 и $R=0$, магнитный поток которой замыкается в сердечнике.

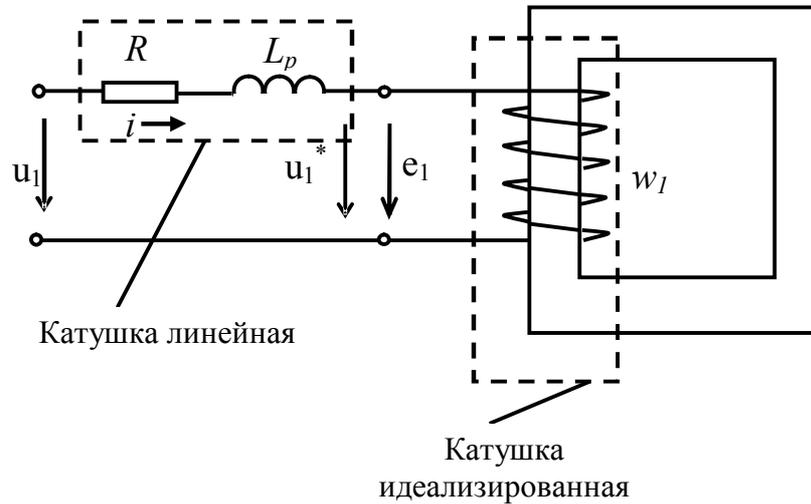


Рис. 2.3. Электромагнитная схема линейной и идеализированной катушек

Пусть напряжение на зажимах идеализированной катушки u^* изменяется по закону:

$$u^* = U_m \sin \omega t \quad (2.8)$$

На основании второго закона Кирхгофа для контура идеализированной катушки можно записать:

$$u^* = -e_1; \quad e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_o}{dt}$$

Следовательно:

$$u^* = w_1 \frac{d\Phi_o}{dt} \quad (2.9)$$

Отсюда основной магнитный поток:

$$\Phi_o = \frac{1}{w_1} \int u^* dt \quad (2.10)$$

Подставляя в 2.10 уравнение 2.89 получаем:

$$\Phi_o = \frac{1}{w_1} \int U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\omega \cdot w_1} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.11)$$

Обозначим

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega} \quad (2.12)$$

тогда

$$\Phi_o = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.13)$$

Поток в сердечнике отстает от изменения напряжения на зажимах идеализированной катушки u^* на одну четверть периода.

В уравнении 2.12 перейдем от амплитудного значения напряжения к действующему и получим:

$$\Phi_m = \frac{U_m}{w \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi \cdot f \cdot w_1} = \frac{U}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w_1}$$

т. к. $|u^*| = |e_1|$, то

$$E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \quad (2.14)$$

Полученное уравнение называется уравнением трансформаторной ЭДС, которое используется при расчетах электромагнитных устройств.

Для контура первичной обмотки, представленного на рис. 2.3 запишем уравнение второго закона Кирхгофа:

$$-\underline{U}_1 + \underline{I} \cdot R_1 + j\underline{I}X_{1p} = \underline{E}_1$$

решая его относительно \underline{U}_1 получим уравнение электрического состояния первичной обмотки:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I} \cdot R_1 + j\underline{I}X_{1p} \quad (2.15)$$

Т. к. приложенное к зажимам первичной обмотки напряжение уравновешивает ЭДС наводимую потоком в сердечнике.

2.3. Опыт холостого хода трансформатора.

Опыт холостого хода трансформатора служит для определения коэффициента трансформации, потерь мощности в сердечнике и определения параметров намагничивающей цепи в схеме замещения. При проведении опыта первичная обмотка трансформатора ставится под номинальное напряжение, а к зажимам вторичной обмотки подключается вольтметр.

Т. к. ток холостого хода трансформатора мал, то можно считать, что $U_{10} \approx E_1$. Тогда:

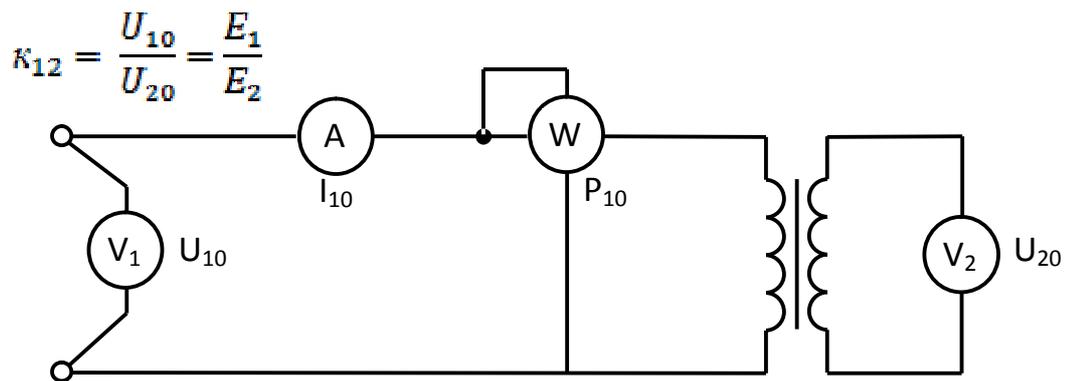


Рис. 2.4. Схема проведения опыта холостого хода

Т.к. в опыте холостого ходе ток в первичной обмотке трансформатора мал, то и потери малы, а ваттметр в цепи первичной обмотки показывает потери в сердечнике. Данные опыта холостого хода заносятся в паспорт трансформатора. Ток холостого хода записывается в процентах от номинального.

$$i = \frac{I_{10}}{I_{1н}} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

2.4. намагничивающие силы в трансформаторе.

Падение напряжения в первичной обмотке трансформатора мало, следовательно, можно считать, что напряжение на зажимах идеализированной катушки u^* равно приложенному первичному напряжению u_1 . Тогда:

$$\Phi = \frac{1}{w_1} \int u_1 dt,$$

т. к. $U_{1m} = \text{const}$, то и $\Phi_{m \text{ осн}} = \text{const}$.

Напряженность поля в сердечнике, работающего трансформатора можно определить на основании закона полного тока:

$$H = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{l_c} \quad (2.17)$$

При постоянной амплитуде основного потока, амплитуда напряженности поля также будет постоянной и не будет зависеть от величины нагрузки.

На холостом ходу вторичный ток равен нулю $i_2 = 0$, а $i_1 = i_{10}$, а напряженность поля:

$$H = \frac{i_{10} \cdot w_1}{l_c}$$

т. к. напряженность поля на зависит от нагрузки можно записать:

$$\frac{i_{10} \cdot w_1}{I_C} = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{I_C} \quad \text{или} \quad i_{10} \cdot w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2 \quad (2.18)$$

Уравнение 2.18 носит название уравнения намагничивающих сил. Поделив обе части на w_1 и переходя к действующим значениям, получим уравнение первичного тока:

$$\underline{I_1} = \underline{I_{10}} + \left(-I_2 \frac{w_2}{w_1}\right) \quad (2.19)$$

При увеличении вторичного тока I_2 , магнитный поток которого по принципу Ленца направлен навстречу потоку, создаваемого первичным током, поток в сердечнике будет уменьшаться. Но т. к. $E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m$ уменьшение потока вызовет уменьшение ЭДС E_1 , но:

$$\underline{U_1} = -\underline{E_1} + \underline{I_1} \cdot R_1 + j\underline{I_1} X_{1p}$$

и уменьшение ЭДС приведет к увеличению первичного тока, в результате чего магнитный поток останется неизменным.

Таким образом, составляющая первичного тока $-I_2 \frac{w_2}{w_1}$, называемая приведенным вторичным током, компенсирует размагничивающее действие вторичного тока. Другая его составляющая I_{10} создает поток в сердечнике.

2.5. Короткое замыкание трансформатора.

Короткое замыкание трансформатора при эксплуатации это тяжелая авария, которая, в случае отказа защиты, может привести к его разрушению. Процессы, протекающие в трансформаторе при коротком замыкании, удобно рассматривать на его модели, состоящей из двух линейных и двух идеализированных катушек (рис.2.5).

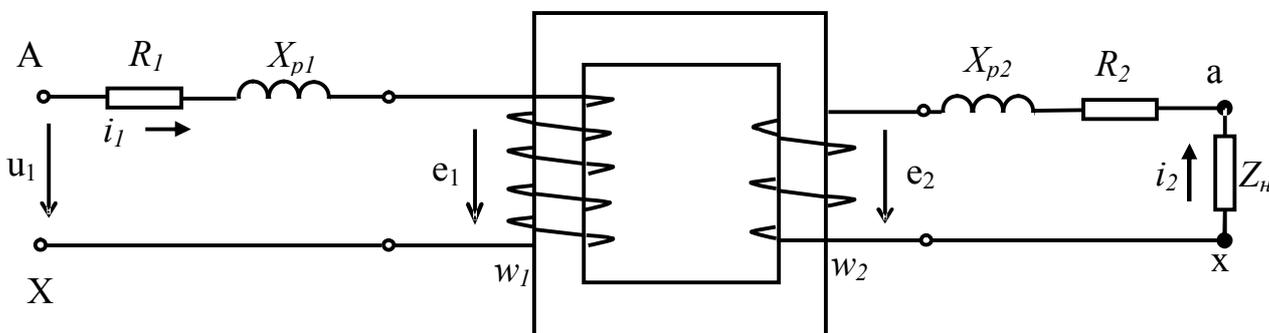


Рис. 2.5. Электромагнитная схема трансформатора

Запишем уравнение второго закона Кирхгофа для контура вторичной обмотки в рабочем режиме:

$$e_2 = i_2 \cdot R_2 + i_2 \cdot X_{p2} + i_2 \cdot Z_2 \quad (3.20)$$

При коротком замыкании сопротивление между зажимами вторичной обмотки станет равной нулю и уравнение (3.20) примет вид:

$$e_2 = i_2 \cdot R_2 + i_2 \cdot X_{p2} \quad (3.21)$$

Следовательно, короткое замыкание сопровождается уменьшением ЭДС вторичной обмотки. Т. к. $\frac{e_1}{e_2} = k_{12} = \mathbf{const}$, то $e_{1к} = k_{12} \cdot e_{2к}$ и, следовательно, короткое замыкание сопровождается уменьшением ЭДС первичной обмотки. Поскольку поток в сердечнике пропорциональна ЭДС, то при коротком замыкании поток в сердечнике будет уменьшаться, а трансформатор размагничивается. Ранее в параграфе 2.2. отмечено, что ЭДС E_1 уравновешивает приложенное напряжение, следовательно при уменьшении E_1 равновесие нарушится, что приведет в резкому всплеску тока.

2.6. Опыт короткого замыкания трансформатора.

Опыт короткого замыкания служит для определения потерь мощности в обмотках трансформатора, а также для определения их параметров в схеме замещения.

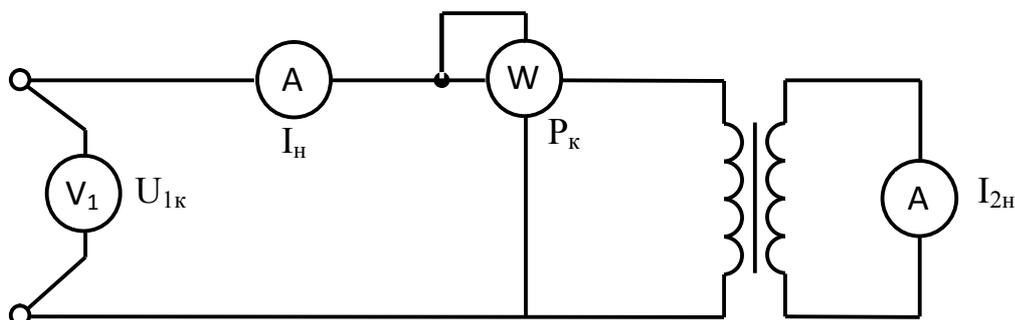


Рис. 2.6. Схема проведения опыта короткого замыкания.

При проведении опыта вторичная обмотка замыкается не на амперметр, а к первичной обмотке подводится пониженное напряжение, но такое, чтобы в первичной обмотке протекал номинальный ток.

Поскольку поток в сердечнике будет минимален, то и потери на перемагничивание будут незначительными, и можно считать, что ваттметр будет показывать потери мощности на нагрев обмоток.

Полное сопротивление короткого замыкания можно определить по закону Ома:

$$Z_{к} = \frac{U_{к}}{I_{к}} \quad (3.22)$$

Активное сопротивление короткого замыкания по закону Джоуля-Ленца:

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}, \quad (3.23)$$

а индуктивное сопротивление короткого замыкания по соотношениям вытекающим из треугольника сопротивлений:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} \quad (3.24)$$

Данные опыта короткого замыкания заносится в паспорт трансформатора: мощность в ваттах, а напряжение в процентах от номинального:

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100\% \quad (3.25)$$

2.7. Работа трансформатора под нагрузкой.

Работа под нагрузкой является основным режимом работы трансформатора. Уравнения электрического состояния обмоток трансформатора, работающего под нагрузкой, могут быть получены из рассмотрения его электромагнитной схемы, представленной на рис. 2.5.

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot R_1 + j\underline{I}_1 X_{1p} \quad (3.26)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \cdot R_2 - j\underline{I}_2 X_{2p} \quad (3.27)$$

Уравнения токов было получено ранее при анализе намагничивающих сил трансформатора:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_2^* \quad (3.28)$$

Уравнения 3.26 – 3.28 показывают, что роль ЭДС в первичной и вторичной обмотках различны, т. к. в уравнения они вошли с разными знаками. В первичной обмотке ЭДС уравновешивает приложенного напряжение, а во вторичной играет роль источника энергии. Т. к. обе ЭДС созданы потоками в сердечнике, то энергия из первичной обмотки во вторичную переносится магнитным потоком. Эти уравнения показывают также, что потоки рассеяния участия в переносе энергии не принимают, т. к. ЭДС рассеяния участия в уравнения не вошли. Следовательно, потоки рассеяния вредны и при изготовлении трансформаторов принимают меры для их подавления.

Уравнение 3.28 показывает, что в полном соответствии с законами сохранения любое изменение вторичного тока приводит к изменению тока первичного.

2.8. Потери и КПД трансформатора.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение активных мощностей вторичной и первичной обмоток:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.29)$$

Мощность P_1 , отбираемая трансформатором из сети:

$$P_1 = P_2 + \sum \Pi, \quad (2.30)$$

где $\sum \Pi$ - суммарные потери.

Суммарные потери складываются из гистерезисных потерь в сердечнике и потерь на нагрев обмоток трансформатора. Потери в сердечнике P_{10} пропорциональны его массе, определяются в опыте холостого хода и для данного трансформатора являются постоянной величиной.

Потери на нагрев медных обмоток пропорциональны квадрату тока:

$$\Pi_{Cu} = I_1^2 \cdot R_k \quad (2.31)$$

Умножим и разделим 2.31 на I_{1H}^2 и получим:

$$\Pi_{Cu} = \frac{I_1^2}{I_{1H}^2} \cdot I_{1H}^2 \cdot R_k \quad (2.32)$$

$\frac{I_1}{I_{1H}} = \beta$ - коэффициент загрузки (нагрузки) трансформатора.

Подставляя в 2.31 выражение 2.32 получим:

$$\Pi_{Cu} = \beta^2 \cdot P_k$$

Мощность P_2 передаваемая трансформатором приемнику:

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (2.33)$$

Т. к. вторичное напряжение трансформатора при изменении нагрузки меняется мало, можно считать, что:

$$U_2 \approx U_{2H}$$

Умножим и разделим 2.33 на I_{2H} и получим:

$$P_2 = \frac{I_2}{I_{2H}} I_{2H} \cdot U_{2H} \cdot \cos\varphi_2; \quad \frac{I_2}{I_{2H}} = \beta; \quad S_H = I_{2H} \cdot U_{2H}, \quad \text{тогда}$$

$$P_2 = \beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2$$

Подставляя значения P_2 и потерь в 2.30 получим:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 + P_{10} + \beta^2 \cdot P_K} \quad (2.34)$$

Проверка 2.34 на экстремум показывает, что КПД будет иметь максимальное значение при равенстве потерь в медных обмотках и сердечнике, т. е.:

$$P_{10} = \beta^2 \cdot P_K \quad (2.35)$$

В течение года часть времени трансформатор работает на холостом ходу, т. к. от сети он никогда не отключается. Поэтому годовой КПД будет отличаться от вычисленного по уравнению 2.34:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 \cdot t_p}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_2 \cdot t_p + P_{10} \cdot t_r + \beta^2 \cdot P_K \cdot t_p}, \quad (2.36)$$

где t_p – число часов работы трансформатора с коэффициентом загрузки β ;
 t_r – число часов в году.

Лекция 3. Электрические машины. Принцип действия.

В основу работы всех электрических машин положены два закона физики: электромагнитной индукции и закон Ампера. Величина ЭДС, наведенной в проводящем контуре, находящимся в магнитном поле:

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

Следовательно, любой электромагнитной механизм должен иметь устройство для создания магнитного поля (в электрических машинах это статор) и совокупность проводников, в которых наводится ЭДС (якорь,

ротор). Как создается магнитное поле физически безразлично. В электрических машинах оно создается катушками со стальными сердечниками или постоянными магнитами.

Наведение ЭДС может осуществляться различными способами:

1. Вращением проводников в неподвижном магнитном поле (способ реализован в машинах постоянного тока).

2. Вращение поля около неподвижных проводников (способ реализован в синхронных машинах).

3. Вращением проводников во вращающемся магнитном поле (способ реализован в асинхронных двигателях).

4. Изменение неподвижного магнитного поля во времени около проводников находящихся в нем (способ реализован в трансформаторе).

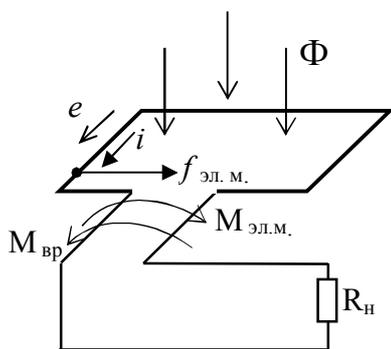


Рис. 3.1. Проводящий контур в магнитном поле. Генераторный режим.

Если неподвижную часть машины (на рис. 3.1 изображен один ее виток) поместить в магнитное поле и привести во вращение, то в ней будет индуцироваться ЭДС. Направление ЭДС определяют по правилу правой руки (силовые линии входят в ладонь, большой палец показывает направление перемещения проводника, а четыре вытянутых пальца указывают направление ЭДС). Если цепь замкнута, то в ней появится ток, направление которого будет совпадать с направлением ЭДС. Согласно закону Ампера: на

проводник с током со стороны магнитного поля будет действовать сила, направление которой определяется по правилу левой руки (силовые линии входят в ладонь, большой палец показывает направление силы, а четыре вытянутых пальца указывают направление тока).

Момент электромагнитной силы, как видно из рис. 3.1, является тормозящим, он замедляет вращение витки и для продолжения вращения необходимо увеличивать внешний вращающий момент, т. е. подводить к машине механическую энергию. Таким образом, в данном случае в машине идет процесс преобразования механической энергии в электрическую. Такой режим называется **генерированием**. Для этого режима характерно:

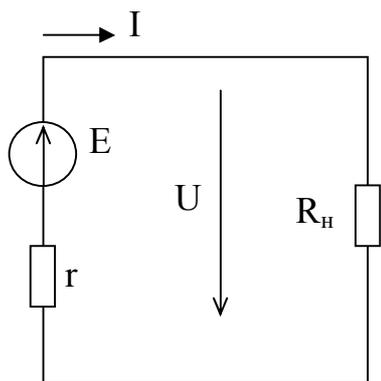


Рис. 3.2. Схема замещения вращающегося витка в магнитном

1. Ток и ЭДС в подвижной части машины совпадают по направлению, что говорит о том, что машина отдает электроэнергию;

2. Электромагнитный момент является тормозящим, т. е. машина должна получать механическую энергию извне.

Рассмотренный виток можно представить схемой замещения рис. 3.2.
 На основании второго закона Кирхгофа:

$$E = I \cdot r + I \cdot R_{\text{н}}$$

обозначим как $I \cdot R_{\text{н}} = U$, тогда:

$$E = I \cdot r + U \quad \text{и} \quad U = E - I \cdot r \quad (3.1)$$

Выражение 3.1 называется основным уравнением машины, работающей в генераторном режиме. Оно показывает, что напряжение на зажимах генератора всегда меньше ЭДС на величину внутреннего падения напряжения.

3.2. Двигательный режим.

Если к подвижной части машины (один ее виток изображен на рис. 3.2) подвести напряжение, то по ней потечет ток. При взаимодействии

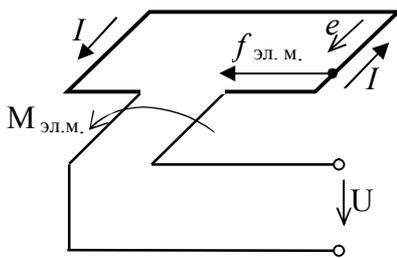


Рис. 3.2. Проводящий контур в магнитном поле. Двигательный режим.

проводника с током и магнитного поля, возникает электромагнитная сила, направление которой определяется по правилу левой руки. Электромагнитный момент этой силы заставит подвижную часть машины вращаться. При вращении в подвижной части машины возникнет ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки.

Если вал подвижной части машины сцепить с нагрузкой (мешалка, станок, вентилятор и пр.), то нагрузка будет тормозить вращение. Чтобы машина продолжала вращаться, необходимо увеличивать электромагнитный момент, создаваемый током, т. е. увеличить ток.

Таким образом, в этом случае в машине имеет место преобразование электрической энергии в механическую. Такой режим работы называется **двигательным**. Для него характерно:

1. Электромагнитный момент является вращающим, это говорит о том, что машина отдает механическую энергию;
2. ЭДС, возникающая в подвижной части машины, направлена против тока. Следовательно, машина должна получать электроэнергию извне.

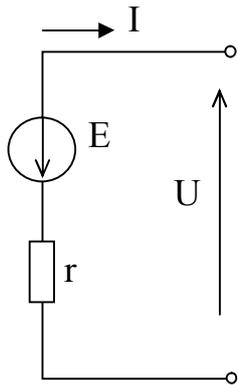


Рис. 3.2. Схема замещения вращающегося витка в магнитном поле. Двигательный режим.

Рассмотренный виток можно представить схемой замещения рис. 3.3. На основании второго закона Кирхгофа:

$$E = -I \cdot r + U \quad \text{и} \quad U = E + I \cdot r \quad (3.2)$$

Выражение 3.2 называется основным уравнением машины, работающей в двигательном режиме. Оно показывает, что напряжение на зажимах двигателя должно быть больше ЭДС на величину падения напряжения в его подвижной части.

3.3. Машины постоянного тока. Устройство.

Основными частями машины являются:

- Статор – неподвижная часть, которая служит для создания постоянного неподвижного магнитного поля;
- Якорь – вращающаяся часть машины.

Статор – литой, на его внутренней поверхности смонтированы чередующиеся полюсы, на которых смонтированы обмотки возбуждения, создающие магнитное поле.

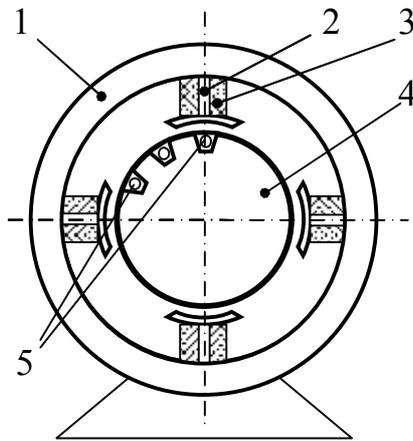


Рис. 3.4. Схематическое устройство машины постоянного тока:
1 – статор; 2 – полюс; 3 – обмотка;
4 – якорь; 5 – обмотка якоря.

Якорь собирается из листовой электротехнической стали, в пазах якоря размещается секционированная обмотка. Секции обмотки соединяются между собой и с пластинами коллектора. Коллектор монтируется на одном валу с якорем и представляет собой цилиндр, собранный из отдельных изолированных друг от друга медных пластин. Коллектор предназначен для преобразования переменного тока якоря генератора в постоянный для внешней цепи и для поддержания постоянства направления вращающего момента в двигателе. Для соединения якоря с внешней цепью на

коллектор накладываются медно-графитовые щетки, которые крепятся в специальных щеткодержателях и осуществляют скользящий контакт якоря и внешней цепи.

При вращении якоря в магнитном поле статора в нем возникает ЭДС:

$$E_{\text{я}} = C_E \cdot \Phi \cdot n \quad (3.3)$$

и электромагнитный момент

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (3.4)$$

который при работе машины генератором является тормозящим, а при работе двигателем – вращающим. В формулах 3.3 и 3.4 C_E и C_M – константы; n – частота вращения якоря; Φ – магнитный поток; $I_{\text{я}}$ – ток якоря.

Основными режимами работы машин постоянного тока в настоящее время является двигательный. В генераторном режиме они используются редко, т. к. имеются надежные и экономичные статические преобразователи переменного тока в постоянный.

3.4. Двигатели постоянного тока.

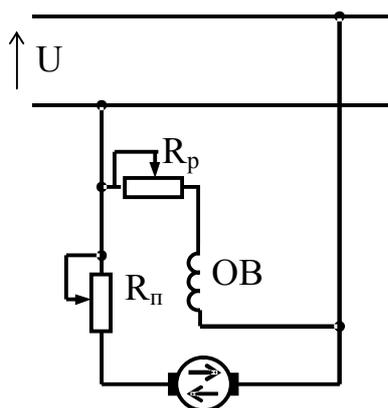
Двигатели постоянного тока широко используются в современных электроприводах, когда требуется плавное изменение частоты вращения и высокий пусковой момент. Полный цикл работы двигателя можно разделить на четыре этапа:

1. Пуск – период, в течении которого двигатель разгоняется от нулевой скорости до рабочей. Он характеризуется пусковым током, который по возможности должен быть малым; пусковым моментом, который наоборот должен быть высоким, и временем пуска, которое должно быть небольшим.

2. Рабочий период – характеризуется неизменным напряжением на якоре и обмотке возбуждения. Основными характеристиками механической энергии на этом этапе являются вращающий момент и частота вращения, наиболее важной рабочей характеристикой является механическая характеристика $n=f(M_{\text{вр}})$.

3. Регулирование – в этот период осуществляется воздействие на цепи обмоток возбуждения и якоря с целью изменения чисел оборотов машины. Способ регулирования определяется пределом и степенями изменения частоты вращения и экономичностью результатов.

4. Торможение – в большинстве случаев осуществляется естественным путем под действием трения.



3.5. Двигатель параллельного возбуждения.

В двигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения подключена параллельно обмотке якоря, поэтому $I_{\text{в}} \neq f(I_{\text{я}})$, а общий ток, потребляемый машиной складывается из тока якоря и тока возбуждения.

Рис. 3.5. Схема включения двигателя

параллельного возбуждения

Каждый из этих токов может быть вычислен по закону Ома.

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} \quad \text{и} \quad I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}$$

Из основного уравнения двигателя следует:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \quad (3.5)$$

ЭДС якоря $E_{\text{я}} = C_{\text{Е}} \cdot \Phi \cdot n$, в момент пуска когда $n=0$ и $E=0$, тогда:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$$

Поскольку сопротивление якоря очень мало, то пусковой ток якоря значительно превышает номинальный. У современных двигателей кратность пускового тока составляет: $\frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}} = 25 \div 40$.

Такой толчок тока опасен для целостности коллектора двигателя, вызывает падения напряжения в сети, что негативно отражается на работе других потребителей, питающихся от той же сети. Поэтому для ограничения пускового тока в цепь якоря включается пусковой реостат, сопротивление которого берется таким образом, чтобы кратность пускового тока не превышала $2,0 \div 2,5$, т. е.:

$$R_{\text{п}} = \frac{U}{(2 \div 2,5)I_{\text{я}}} - R_{\text{я}}$$

После разгона двигателя напряжение на его якоре будет описывается уравнением:

$$U = C_{\text{Е}} \cdot \Phi \cdot n + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} \quad (3.6)$$

тогда частота вращения якоря будет:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_{\text{Е}} \cdot \Phi} \quad (3.7)$$

Уравнение 3.7 называется скоростным, оно показывает возможные пути регулирования частоты вращения:

1. Изменением тока якоря;
2. Изменением напряжения;
3. Изменением магнитного потока, т. е. тока возбуждения.

Последний способ наиболее предпочтителен, поскольку ток возбуждения не велик и регулирование не связано с большими энергетическими затратами.

Для изменения тока возбуждения в цепь обмотки возбуждения включают регулировочный реостат.

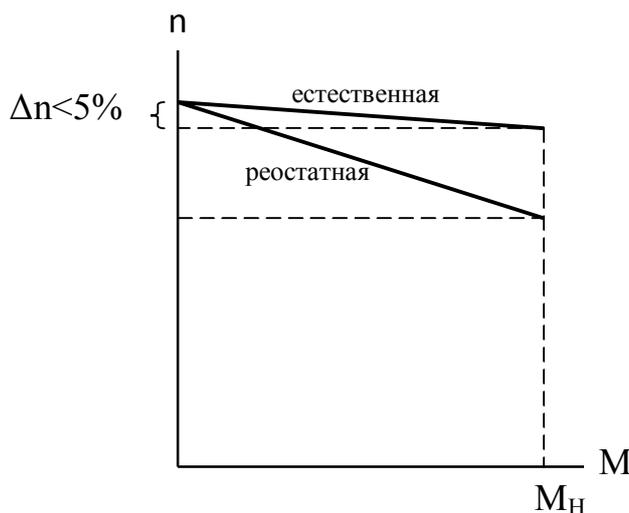
Вращающий момент, возникающий при работе двигателя:

$$M_{вр} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я} \quad \text{откуда} \quad I_{я} = \frac{M_{вр}}{C_M \cdot \Phi}$$

Подставляя последнее выражение в скоростное уравнение 3.7, получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{C_E \cdot \Phi} - \frac{M_{вр}}{C_E \cdot \Phi^2 \cdot C_M} \quad (3.8)$$

Уравнение 3.8 есть уравнение прямой в отрезках на осях. Как видно из рис. 3.6 механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения жесткая, т. е. изменения частоты вращения при изменении нагрузки от холостого хода до



номинальной не превышает 5%. Эта характеристика называется естественной.

При включении в цепь якоря реостата характеристики становятся мягче, на рис. 3.6 она указана, как реостатная.

Значение пускового момента можно определить графически, если продлить естественную характеристику до

Рис. 3.6. Механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения.

выражение для пускового момента можно получить, положив $n=0$ в уравнение 3.8. Тогда:

$$M_{п} = \frac{C_M \cdot U \cdot \Phi}{R_{я}} \quad (3.9)$$

Двигатели параллельного возбуждения имеют большой пусковой момент и допускают глубокое и плавное регулирование, имеют очень жесткую механическую характеристику. По этим причинам они применяются в приводах, где по условиям работы требуется большое постоянство скорости в широком диапазоне нагрузок, в приводах с тяжелыми

условиями пуска, а также в тех случаях, когда требуется в широком диапазоне изменять скорость работы технологического оборудования.

3.6. Двигатель последовательного возбуждения.

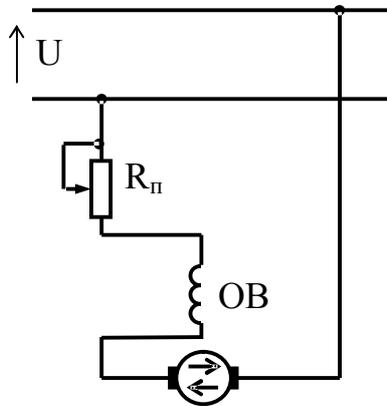


Рис. 3.7. Схема включения двигателя последовательного возбуждения.

У двигателя последовательного возбуждения обмотка возбуждения включается последовательно с якорем. Поэтому магнитный поток двигателя зависит от тока якоря, а значит от нагрузки: $I_B = I_A$, $\Phi = f(I_A)$. Качественно величину магнитного потока можно оценить, воспользовавшись магнитным законом Ома:

$$\Phi = \frac{I_A \cdot W_E}{R_M} \quad (3.10),$$

где R_M – магнитное сопротивление.

Скоростное уравнение получается

аналогично двигателю параллельного возбуждения:

$$U = E + I_A \cdot (R_A + R_B); \quad E_A = C_E \cdot \Phi \cdot n; \quad U = C_E \cdot \Phi \cdot n + I_A \cdot (R_A + R_B);$$

$$\text{и} \quad n = \frac{U - I_A \cdot (R_A + R_B)}{C_E \cdot \Phi} \quad (3.11)$$

Уравнение 3.11 показывает, что регулировать частоту вращения можно теми же способами, что и у двигателя параллельного возбуждения.

Подставим в 3.11 значение потока из 3.10:

$$n = \frac{U \cdot R_M}{C_E \cdot I_A \cdot W_E} - \frac{(R_A + R_B) \cdot R_M}{C_E \cdot W_E} \quad (3.12)$$

Из 3.12 следует, что частота вращения якоря практически обратно пропорциональна току якоря.

Подставляя в выражение $M_{вр} = C_M \cdot \Phi \cdot I_A$ значение потока из 3.10, получим:

$$M = \frac{C_M \cdot W_E}{R_M} \cdot I_A^2,$$

тогда ток якоря:

$$I_A = \sqrt{\frac{R_M}{C_M \cdot W_E}} \cdot \sqrt{M} \quad (3.13)$$

Следовательно, при увеличении нагрузки ток, потребляемый двигателем, увеличится незначительно.

Подставляя значение тока из 3.13 в скоростное уравнение 3.12, получаем:

$$n = \frac{U \cdot R_M}{C_E \cdot W_E \cdot \sqrt{M} \sqrt{\frac{R_M}{C_M \cdot W_E}}} - \frac{(R_{\Sigma} + R_E) \cdot R_M}{C_E \cdot W_E} \quad \text{и объединяя постоянные величины}$$

получим уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U \cdot k}{\sqrt{M}} - C \quad (3.14)$$

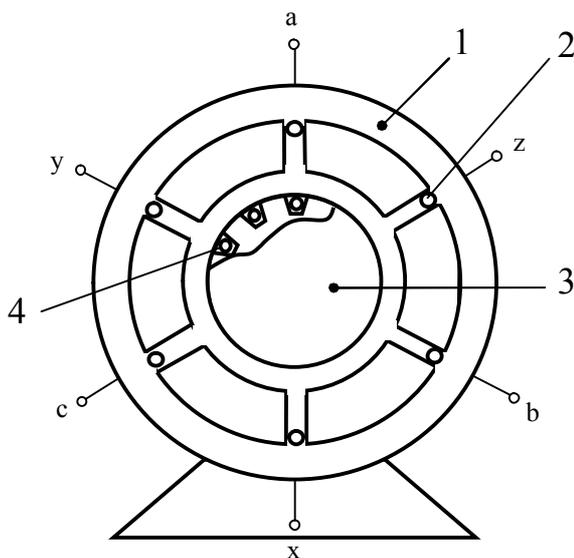
Уравнение 3.14 показывает, что механическая характеристика этого двигателя мягкая. Двигатель последовательного возбуждения легко выносит перегрузки, т. к. при перегрузках ток возрастает не сильно. Двигатель имеет большой пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения. Аналитическое выражение пускового момента можно получить из уравнения механической характеристики, положив $n = 0$, тогда:

$$M_{\pi} = \left(\frac{k}{C}\right)^2 \cdot U$$

По этим причинам двигатели последовательного возбуждения широко применяются на магистральном и городском электротранспорте.

Лекция 4. Асинхронный двигатель.

Асинхронный двигатель предложен в 1889 г. Русским электротехником М.О. Доливо-Добровольским. Предложенная конструкция была настолько проста, что в основном сохранилась до настоящего времени. Из большого количества двигателей, эксплуатирующихся в промышленности и сельском хозяйстве, 90-95% приходится на асинхронные двигатели.



4.1. Устройство и принцип действия асинхронного двигателя.

Двигатель состоит из двух частей: неподвижный статор 1, и вращающийся ротор 3. Внутренняя часть статора собрана из листовой стали, для уменьшения вихревых токов. В пазах статора размещена трехфазная обмотка. На рис. 4.1 в каждой фазе показано по одному витку. Плоскости каждой фазы

Рис. 4.1. Схематическое устройство асинхронного короткозамкнутого двигателя: 1 – статор; 2 – обмотка статора;

смещены друг от друга на 120° . В такой обмотке, подключенной к трехфазной сети, создается вращающееся магнитное поле, частота вращения которого n_1 можно определить:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (4.1)$$

где f – частота сети; p – число пар полюсов.

При промышленной частоте $f=50$ Гц частота вращения магнитного поля может принимать следующие значения:

p	1	2	3	4	5	
n_1	3000	1500	1000	750	600	и т. д.

Ротор представляет собой цилиндр, набранный из листовой стали, в пазах которого располагается обмотка, которая выполняется чаще всего из алюминиевых стержней, соединенных между собой накоротко. Такая обмотка называется «белчье колесо», а ротор короткозамкнутым. Если обмотка выполнена также как и обмотка статора из изолированной проволоки, то они соединяются звездой, а ее свободные концы выводятся на контактные кольца, размещенные на валу ротора. На контактные кольца накладываются щетки, которые позволяют соединить вращающийся ротор с внешней цепью. Такая обмотка называется **фазной** и ротор также называется **фазным**.

Вращающееся поле индуцирует в обмотке статора и ротора ЭДС e_1 и e_2 . Т. к. обмотка ротора замкнута, то в ней под действием ЭДС e_2 возникает ток, при взаимодействии которого с магнитным полем, создается электромагнитный вращающий момент, который заставляет ротор вращаться с частотой n_2 , причем $n_2 < n_1$. Ясно, что величина ЭДС e_2 зависит от скорости $n_1 - n_2$, с которой поле пересекает витки вращающегося ротора. Чем больше $n_1 - n_2$, тем больше ЭДС e_2 . Если $n_1 = n_2$, то $E_2 = 0$ и ротор вращаться не будет.

Величина:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

называется **скольжением** и заносится в паспорт двигателя. У работающего двигателя скольжение должно быть таким, чтобы вращающий момент двигателя $M_{вр}$ уравновешивал тормозящий момент $M_{тор}$ нагрузки, т. е. должно выполняться равенство:

$$M_{вр} = M_{тор} \quad (4.3)$$

Если это равенство не выполняется – двигатель остановится.

При пуске двигателя, в момент когда ротор еще неподвижен, асинхронный двигатель подобен трансформатору и его электрическое состояние можно описать уравнениями для трансформатора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{10} \cdot R_1 + j\underline{I}_{10} X_{1p} \quad (4.4)$$

$$E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot K_{0\phi 1} \quad (4.5)$$

$$E_2 = 4,44 f \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot K_{0\phi 2} \quad (4.6)$$

В отличие от уравнений трансформаторной ЭДС выражения 4.5 и 4.6 содержат множители $K_{0\phi 1}$ и $K_{0\phi 2}$ - обмоточные коэффициенты, учитывающие сдвиг по фазе между ЭДС в каждом витке обмоток статора и ротора. Величина этих коэффициентов 0,96-0,98. При пуске двигателя магнитное поле статора пересекает витки ротора с частотой n_1 , поэтому частота тока в неподвижном роторе будет такой же, как и в статоре, т. е.

$$f_1 = f_2 \text{ и } f_2 = \frac{n_1 \cdot p}{60}$$

У работающего двигателя магнитный поток пересекает витки ротора с частотой $n = n_1 - n_2$. Поэтому частота тока во вращающемся роторе будет:

$$f_{2s} = \frac{n_1 \cdot p}{60} = \frac{(n_1 - n_2) \cdot p}{60} = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \cdot \frac{n_1 \cdot p}{60} = f_2 \cdot s, \quad (4.7)$$

т. е. она будет много меньше частоты сети. Аналогичные выражения могут быть получены для ЭДС ротора и его индуктивного сопротивления:

$$E_{2s} = 4,44 f_{2s} \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot K_{0\phi 2},$$

Учитывая 4.7, получим:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot K_{0\phi 2} \cdot s = E_2 \cdot s \quad (4.8)$$

При пуске ЭДС ротора будет больше, чем при работе: $E_{2s} < E_2$, поэтому при пуске ток двигателя превышает номинальный примерно в 7 раз.

Сопротивление ротора при работе двигателя также будет уменьшаться, за счет уменьшения его индуктивной составляющей:

$$X_{2s} = X_2 \cdot s$$

Ток в роторе можно определить по закону Ома:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_2 \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 \cdot s)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (4.9)$$

4.2. Электрический баланс асинхронного двигателя.

К фазе статора двигателя из сети подводится мощность:

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi_1$$

Часть этой мощности расходуется на нагрев обмоток статора и перемагничивание сердечника статора, а большая часть вращающимся полем передается в ротор, образуя электромагнитную мощность:

$$P_{\text{эл.м}} = P_1 - P_{\text{эл1}} - P_{\text{гист}} \quad (4.10)$$

где $P_{\text{эл.м}}$ – электромагнитная мощность;

$P_{\text{эл1}}$ – электрические потери на нагрев обмоток статора;

$P_{\text{гист}}$ – потери на перемагничивание сердечника статора.

Часть электромагнитной мощности тратится на нагрев обмоток ротора, а большая ее часть переходит в механическую мощность:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эл.м}} - P_{\text{эл2}} \quad (4.11)$$

где $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность;

$P_{\text{эл2}}$ – электрические потери на нагрев обмоток ротора.

Магнитные потери в роторе не существенны, т. к. они пропорциональны квадрату частоты тока, а она в роторе очень мала. Механическая мощность, за вычетом механических потерь в подшипниках и вентиляторе, смонтированных на валу ротора, отдается нагрузке:

$$P_2 = P_{\text{мех}} - P_{\text{мех}} \quad (4.12)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери.

В паспорте двигателя в качестве номинальной мощности указывается мощность на валу P_2 , а не потребляемая мощность P_1 . Отношение мощности на валу к потребляемой мощности называется коэффициентом полезного действия двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.13)$$

КПД двигателя заносится в паспорт.

Из механики известно, что:

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{вр}} \cdot \omega_2 \quad (4.14)$$

где ω_2 – угловая частота вращения ротора.

Подставляя 4.14 и 4.15 в 4.11, получим:

$$M_{\text{вр}} \cdot \omega_2 = M_{\text{вр}} \cdot \omega_1 - P_{\text{эл2}} \quad (4.16)$$

Решая 4.16 относительно $M_{\text{вр}}$, получим:

$$M_{\text{вр}} = \frac{P_{\text{эл2}}}{(\omega_1 - \omega_2) \cdot \frac{\omega_1}{\omega_1}} = \frac{P_{\text{эл2}}}{(\omega_1 - \omega_2) \cdot \omega_1}, \quad (4.16)$$

Т. к. $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$, а $\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30}$, то $s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$, тогда

$$M_{\text{вр}} = \frac{P_{\text{эл2}}}{s \cdot \omega_1} \quad (4.17)$$

4.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Механической характеристикой двигателя называется зависимость частоты вращения ротора от момента на валу, т. е.

$$n_2 = f(M_{\text{вр}})$$

Хотя уравнение механической характеристики может быть получено из 4.17, практически ее всегда рассчитывают по каталожным данным.

Номинальный момент можно вычислить по формуле известной из механики:

$$M_n = 9550 \frac{P_n (\text{кВт})}{n_n} \quad (4.18)$$

$$\text{Максимальный момент: } M_{\text{max}} = \lambda \cdot M_n \quad (4.19)$$

Где λ – перегрузочная способность двигателя, приводится в каталогах.

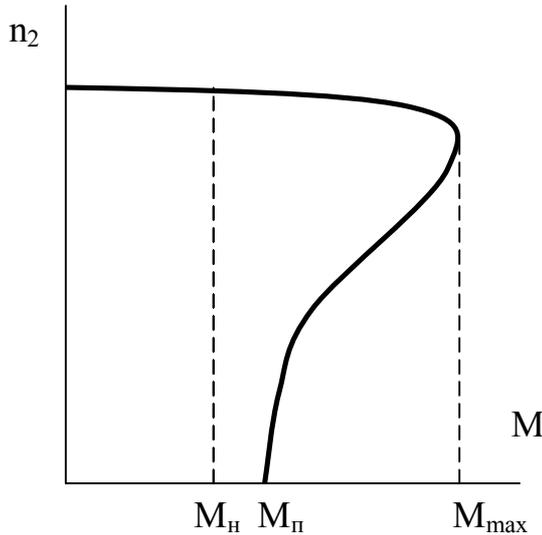
Скольжение соответствующее максимальному моменту называется **критическим скольжением**:

$$s_{\text{кр}} = s_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (4.20)$$

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} \quad (4.21)$$

Вращающий момент при любой нагрузке вычисляется по формуле Клосса:

$$M = \frac{2 M_{max}}{\frac{s_{кр} + s}{s} + \frac{s}{s_{кр}}} \quad (4.22)$$



Задаваясь величиной скольжения можно вычислить вращающий момент и частоту вращения ротора n_2 :

$$n_2 = \frac{\epsilon_0 f}{p} (1 - s) \quad (4.23)$$

и построить характеристику либо в координатах

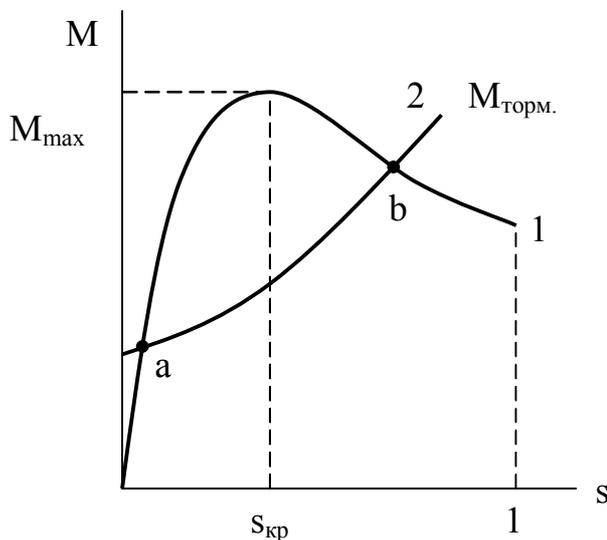
$n_2 = f(M)$, либо в координатах

$M = f(s)$.

Рис. 4.2. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Участок характеристики от 0 до M_H называется рабочим, на

участке от M_H до M_{max} происходит работа двигателя с перегрузкой, а на участке от M_{max} до M_H происходит разгон двигателя. На рабочем участке характеристика имеет малый угол наклона и в пределах этого участка характеристика называется жесткой. Это означает, что в диапазоне нагрузки от нуля до номинальной частота вращения уменьшается не более, чем на 10%.



Механическая характеристика, построенная в координатах $M = f(s)$

позволяет понять, почему двигатель не может работать при скольжении больше критического.

Как известно любой двигатель работает устойчиво, с установившейся частотой вращения при условии:

$$M_{зр} = M_{торм}$$

Рис. 4.3. Зависимость момента двигателя (1) и тормозящего момента нагрузки (2) от

Пусть зависимость $M_{\text{торм}} = f(s)$ описывается кривой 2 рис. 4.3, тогда равенство вращающего и тормозящего моментов достигается в точках «а» и «б». Если двигатель работает в режиме соответствующему точке «а», то при увеличении тормозящего момента нагрузки, будет увеличиваться скольжение и вместе с ним вращающий момент двигателя.

В режиме, соответствующему точке «б» увеличение скольжения вызывает уменьшение вращающего момента и двигатель остановится.

Поэтому двигатель работает устойчиво лишь на восходящем участке характеристики при условии:

$$s < s_{\text{кр}} \quad (4.24)$$

Асинхронный двигатель весьма надежен в работе, прост в эксплуатации, и единственным его недостатком является сильная зависимость вращающего момента от напряжения сети:

$$M = \text{Const} \cdot U^2 \quad (4.25)$$

Поэтому, при понижении напряжения сети перегруженный двигатель может не взять с места.

Перегрузочная способность двигателя оценивается величиной:

$$\lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_n}$$

Она заносится в каталогах и обычно не бывает больше 2,8, в каталоги заносятся также кратность пускового тока $\frac{I_n}{I_n}$ и кратность пускового момента.

4.4. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Реверсирование асинхронного двигателя

Все возможности регулирования вытекают из уравнения:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

Регулирование путем изменения частоты питающего напряжения может применяться, если имеется специальное оборудование для ее изменения.

Изменение числа пар полюсов возможно, только для двигателей специального исполнения, а регулирование будет ступенчатым.

Регулирование путем изменения скольжения реально осуществляется только для двигателей с фазным ротором, для этого в цепь ротора включают регулировочный реостат.

Очень часто регулирование осуществляется не электрическими путями, ступенчато с помощью редукторов.

Реверсирование – изменение направления вращения легко осуществляется изменением чередования фаз, для чего достаточно поменять местами любые два линейных провода питающих двигатель.

4.5. Пуск асинхронных двигателей.

При пуске любого двигателя всегда стремятся иметь большой пусковой момент и малый пусковой ток. Оба требования выполнить трудно, поэтому обычно ограничивают пусковой ток, а если двигатель малой мощности, то толчком тока пренебрегают и применяют прямой пуск. При прямом пуске статорная обмотка ставится сразу по полное напряжение сети.

Пуск осуществляется следующим образом. Включается автоматический воздушный выключатель ВВ, при этом в цепь управления подается напряжение U_{BC} . Нажатием кнопки «Пуск» замыкается цепь управления, срабатывает контактор и замыкаются его силовые контакты «К» и блок контакт БК, шунтирующий кнопку «Пуск». Двигатель начинает работать.

От токов короткого замыкания и перегрузок двигатель защищен предохранителем Пр и тепловым реле Тр. При перегрузке контакты реле размыкаются, цепь управления обесточивается, срабатывает контактор и размыкает силовые контакты «К». Двигатель останавливается. Для рабочей остановки двигателя нажимается кнопка «Стоп».

Двигатели средней или большой мощности запускают при пониженном напряжении, снижая тем самым пусковой ток. Напряжение понижают путем подключения реостата последовательно со статорной обмоткой, или путем переключения ее с рабочей схемы на пусковую – звезда.

1. Соответствие мощности, установленных генераторов и трансформаторов максимальной мощности потребителей.
2. Достаточная пропускная способность линий.
3. Надежность, обеспечивающая бесперебойность энергоснабжения.
4. Высокое качество электроэнергии (постоянство напряжения и частоты).
5. Безопасность и удобство в эксплуатации.
6. Экономичность.

По степени необходимости в бесперебойном энергоснабжении нагрузки промышленных предприятий разделяются на три категории:

1. Нагрузки, перерыв в энергоснабжении которых опасен для жизни людей, может вызвать повреждения оборудования, нарушение нормальной жизни населения города.

2. Нагрузки, перерыв в энергоснабжении которых вызывает существенный недовыпуск продукции, простой рабочих машин, механизмов, транспорта.

3. Все остальные нагрузки, например, вспомогательные цеха, склады, вспомогательные механизмы.

Энергоснабжение нагрузок первой категории должно осуществляться от двух независимых источников питания, каждый из которых полностью обеспечивал бы эти нагрузки электроэнергией.

Необходимость резервирования энергоснабжения нагрузок второй категории определяется на основе сопоставления возможного ущерба от перерыва энергоснабжения с капитальными затратами на осуществление резервного питания.

Для нагрузок третьей категории резервный источник питания, как правило, не предусматривается.

Электроснабжение предприятий разделяется на внешние и внутренние. Под внешним энергоснабжением понимают систему сети и подстанций от энергосистемы или районной станции до понижающих подстанций предприятия. Передача энергии осуществляется по воздушный или подземным кабельным линиям при напряжении 6,3, 10,5, и 35 кВ. На небольших предприятиях, установленная мощность электроприемников которых не превышает 500 кВА, сооружается одна подстанция с двумя или тремя трансформаторами понижающих напряжение до 400/230 В. На крупных предприятиях осуществляется глубокие выводы высокого напряжения. В этом случае высоковольтную линию, идущую от энергосети, заводят вглубь территории предприятия, где сооружается ЦРП – центральный высоковольтный распределительный пункт. В предприятии устанавливают отдельные подстанции, которые соединяются с ЦРП и между собой высоковольтной линией. Такая схема сокращает протяженность внутризаводских низковольтных сетей, что приводит к снижению капитальных затрат на их сооружение и экономии электроэнергии.

Внутренним энергосбережением называется распределения электрической энергии внутри цехов предприятия. Для большинства токоприемников предприятий распределение электроэнергии происходит при напряжении 380/220 В. Двигатели мощностью 100 кВт и выше устанавливаются на напряжение 6 кВ и включают на высоковольтные шины трансформаторной подстанции.

В некоторых случаях предусматриваются линии постоянного тока напряжением 24-120 В и преобразователи переменного тока в постоянный.