

Лекция 6

- **Магнитные цепи постоянного**
- **и переменного тока**

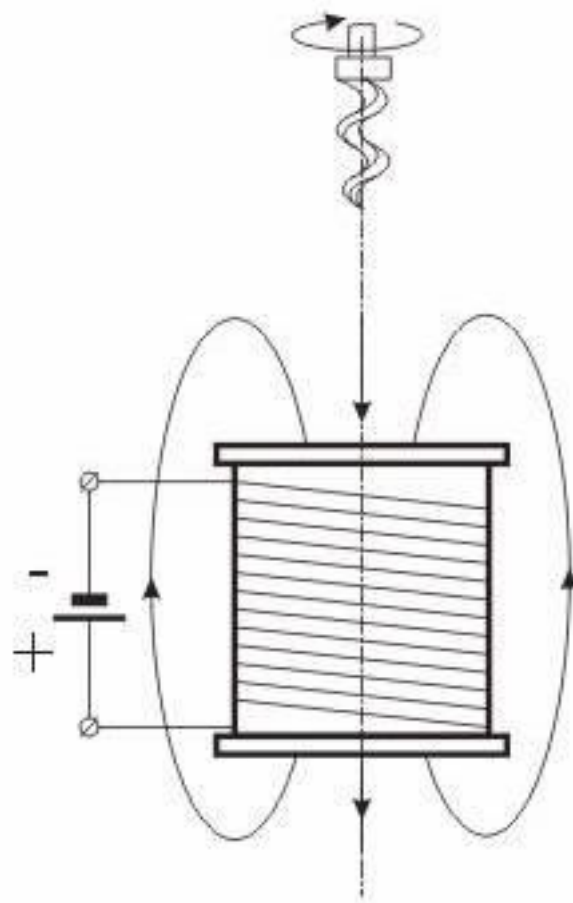
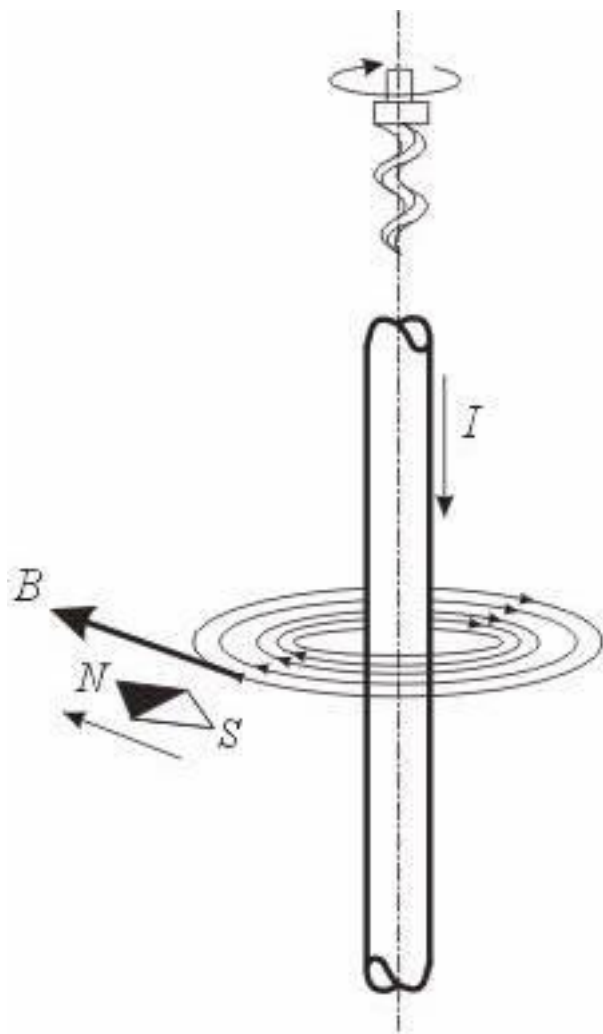
Магнитные цепи

-
- **Магнитные цепи** – совокупность ферромагнитных и не ферромагнитных частей электротехнических устройств
- по которым замыкается магнитный ПОТОК.

Магнитное поле и его параметры

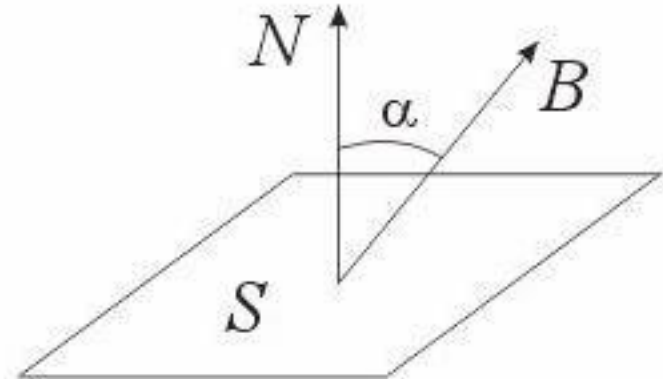
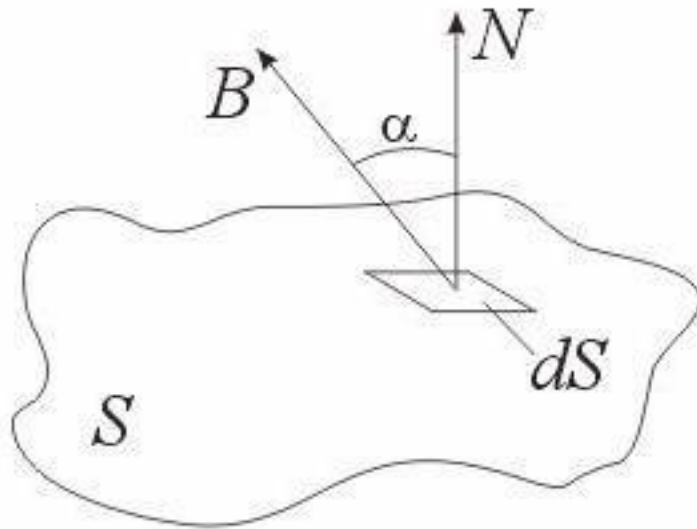
- Основной величиной, характеризующей интенсивность и направление магнитного поля является \mathbf{B} – вектор магнитной индукции, которая измеряется в теслах [Тл].
- Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правоходового винта (буравчика). Вектор \mathbf{B} направлен по касательной к магнитной линии, направление вектора совпадает с осью магнитной стрелки, помещенной в рассматриваемую точку магнитного поля. Величина \mathbf{B} определяется по механической силе, действующей на элемент проводника с током, помещенный в магнитное поле.
- Если \mathbf{B} во всех точках поля имеет одинаковую величину и направление, то такое поле называется равномерным. \mathbf{B} зависит не только от величины тока I , но и от магнитных свойств окружающей среды.

Магнитное поле прямолинейного проводника и катушки. Правило буравчика



Магнитный поток

- Φ – магнитный поток, который измеряется в веберах [Вб].
- Элементарным магнитным потоком $d\Phi$ сквозь бесконечно малую площадку называется величина $d\Phi = B \cos \alpha dS$,
- где α – угол между направлением и нормалью к площадке dS .
- Магнитный поток сквозь поверхность S .
- Если магнитное поле равномерное, а поверхность S представляет собой плоскость, то магнитный поток определяется выражением
- $\Phi = B S$.



Напряженность магнитного поля

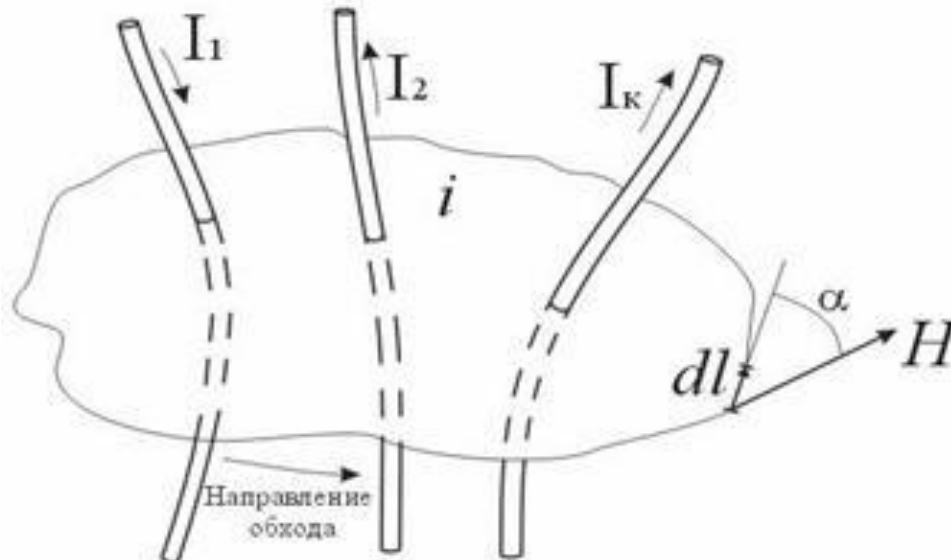
- При исследовании магнитных полей и расчете магнитных устройств пользуются расчетной величиной **H**– напряженностью магнитного поля [А/м]
- **$B = \mu_a H$** ,
- где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды.
- Для неферромагнитных материалов и сред (дерево, бумага, медь, алюминий, воздух) μ_a не отличается от магнитной проницаемости вакуума и равна
- $\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}$, Гн/м (генри/метр).
- У ферромагнетиков μ_a переменная и зависит от B.

Магнитные цепи

- Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток. Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

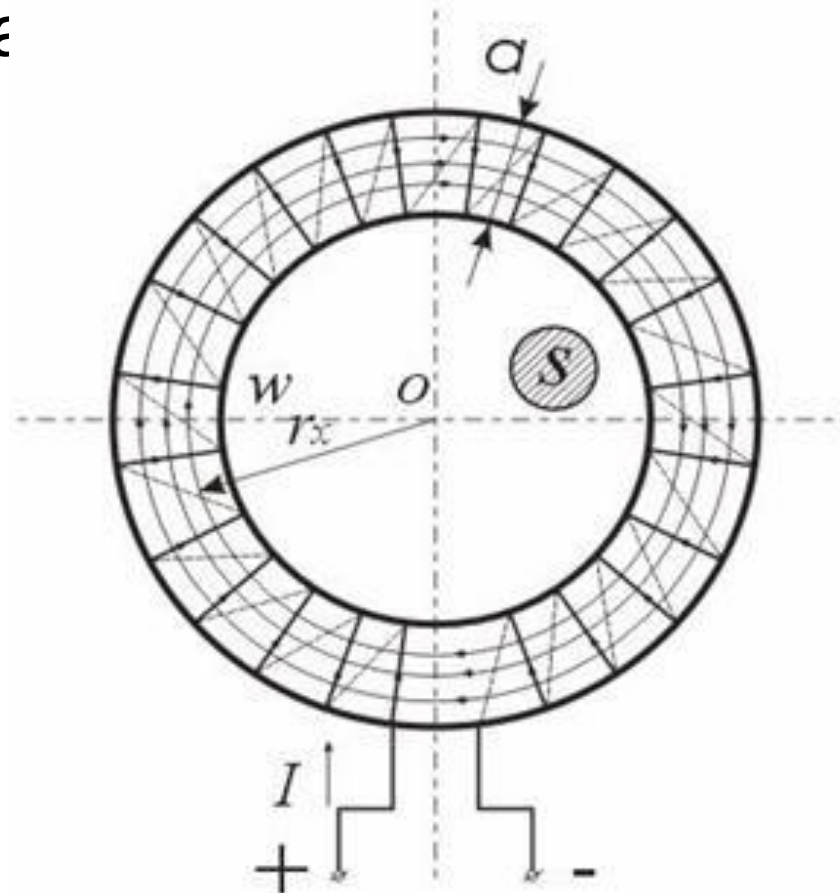
Закон полного тока

- В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока
- $\int_L H \cos \alpha \, dl = S_L$,
- где: H – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;
- dL – элемент длины замкнутого контура L ;
- α – угол между направлениями векторов L и H ;
- S_L – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур L .
- Ток I_k , пронизывающий контур L считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правого винта (буравчика).



Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

- Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца из однородного материала:



- Обмотка имеет W витков и обтекается током I . Магнитные линии внутри кольца представляют собой concentric окружности с центром в точке O . Применим к контуру C_x , совпадающему с одной из магнитных линий, проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:
 - H и dL совпадают, следовательно $a = 0$;
 - величина H_x во всех точках контура одинакова;
 - сумма токов, пронизывающих контур, равна IW .
- Отсюда
 - $H_x = IW/2\pi r_x$ [A/m],
 - где r_x – радиус окружности.
- Вектор H внутри кольца зависит от расстояния r_x . Если a – ширина кольца $\ll d$, то эта разница между значениями H в пределах сердечника невелика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:
 - $H_{cp} = IW / L$,
 - где L – длина средней магнитной линии.

Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления

- В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.
- Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.
- Исходя из соотношений $\Phi = B_{\text{ср}} S$ и $B_{\text{ср}} = m_a H_{\text{ср}}$ получим
- $\Phi = B_{\text{ср}} S = m_a H_{\text{ср}} S$. (*)
- Магнитный поток Φ зависит от произведения $IW = F$, которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).
- Величину $L / (m_a S) = R_M$ – принято назвать магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением $r = L / \gamma S$).
- Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к. $m_a = m_0 = \text{const}$. Магнитное сопротивление сердечника нелинейно – m_a зависит от B .
- Если намагничивающую силу F , уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу (*) принято назвать законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

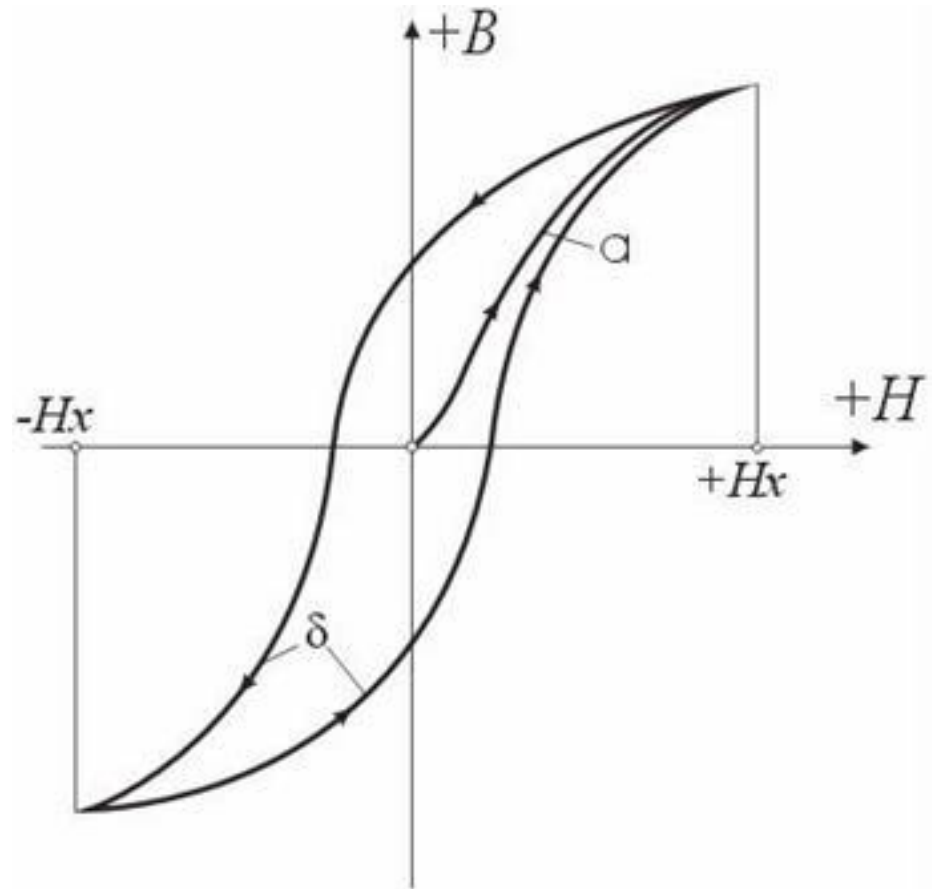
Ферромагнитные материалы и их свойства

- Известно, что магнитная проницаемость μ ферромагнитных материалов переменная величина и зависит от B . Это влечет за собой непостоянство магнитного сопротивления R_M и значительно усложняет расчеты магнитных цепей. Поэтому для расчета магнитных цепей, содержащих ферромагнитные участки, необходимо располагать кривыми намагничивания, представляющими собой зависимость $B = f(H)$. Эти зависимости получают экспериментальным путем – испытанием замкнутых магнитопроводов с распределенной обмоткой.
- Первоначальному намагничиванию образца соответствует кривая a , называемая кривой первоначального намагничивания
- Если образец подвергать циклическому намагничиванию при изменении напряженности магнитного поля в пределах $+H_x$ до $-H_x$, то график будет представлять замкнутую кривую, известную под названием петли гистерезиса.

Зависимость $B(H)$ – петля гистерезиса

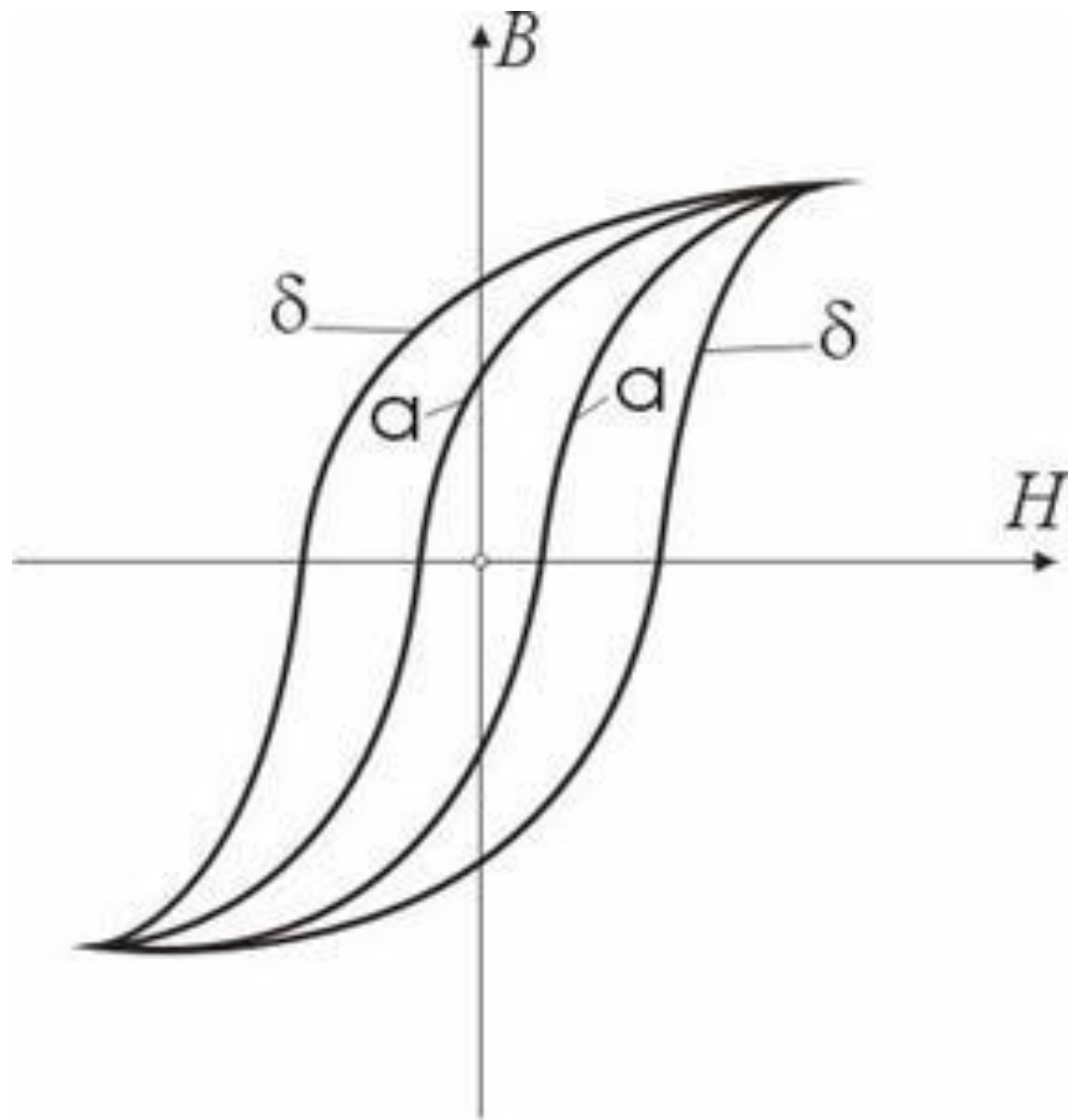
- Если процесс циклического намагничивания повторять для постепенно увеличивающихся значений напряженности магнитного поля, то можно получить семейство петель гистерезиса, и так называемую предельную петлю гистерезиса, которой соответствует изменение напряженности магнитного поля в пределах от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$, увеличение H сверх H_{\max} не повлечет за собой увеличение площади петли гистерезиса.

Предельная петля гистерезиса определяет значение остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы H_c .



- Кривая, соединяющая вершины петель гистерезиса, называется основной кривой намагничивания. Эти кривые приводятся в справочных руководствах и используются в расчетах магнитных цепей.
- Процесс циклического перемагничивания требует затраты энергии, как известно из курса физики, пропорциональной площади петли гистерезиса.
- В связи с этим магнитопроводы электротехнических устройств, работающих в условиях непрерывного перемагничивания (например трансформаторы), целесообразно выполнять из ферромагнитных материалов, имеющих узкую петлю гистерезиса (на рис. , кривые а). Такие ферромагнитные материалы называют магнитомягкими (листовая электротехническая сталь и ряд специальных сплавов, например пермаллой, состоящий из никеля, железа и других компонентов).
- Для изготовления постоянных магнитов рекомендуется использовать ферромагнитные материалы с широкой петлей гистерезиса (кривые d), имеющих большую остаточную индукцию и большую коэрцитивную силу.
- Такие ферромагнитные материалы называют магнитотвердыми (ряд сплавов железа с вольфрамом, хромом и алюминием).

Петли гистерезиса магнитомягких (кривые а) и магнитотвердых (кривые d) материалов



Расчет неразветвленной магнитной цепи

- Формула, выражающая закон полного тока магнитной цепи, была получена для кольцевого магнитопровода постоянного поперечного сечения и с равномерно распределенной обмоткой. Эту формулу распространяют и на магнитные цепи, где намагничивающая обмотка сосредоточена на ограниченном участке магнитопровода, а отдельные участки цепи выполнены из различных ферромагнитных и неферромагнитных материалов и имеют различное поперечное сечение.
- В приближенных расчетах магнитных цепей принимают, что магнитный поток на всех участках цепи остается одним и тем же, хотя на самом деле в магнитной цепи образуются также потоки рассеяния Φ_r , которые замыкаются по воздуху, а не следуют по пути магнитопровода.
- В расчетах магнитных цепей различают прямую и обратную задачи.

- 1. Магнитная цепь разбивается на ряд участков с одинаковым поперечным сечением S , выполненных из однородного материала.
- 2. Намечается путь прохождения средней магнитной линии (на рис. показано пунктиром).
- 3. Т.к. магнитный поток на всех участках цепи остается постоянным, то магнитная индукция $B = \Phi / S$ на каждом из участков и напряженность магнитного поля H неизменны.
- 4. Значения H_1 и H_2 определяют по известным величинам магнитной индукции B с помощью кривых намагничивания, соответствующих ферромагнитных материалов, а для воздушного зазора
- $H_{\text{воз}} = B_{\text{воз}} / \mu_0$.

Обратная задача

- Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристики ферромагнитных материалов; 3) намагничивающая сила обмотки F . Требуется определить магнитный поток Φ .
- Непосредственное использование формулы для определения магнитного потока Φ оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничивающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.
- По полученным данным строят кривую $\Phi(F)$ – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничивающей силы найти величину магнитного потока.
- Для оценки необходимого значения Φ можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничивающей силы F при сопротивлении воздушного участка. Это значение Φ заведомо больше расчетного.
- Остальные значения можно давать меньше.

Особенности расчета магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой

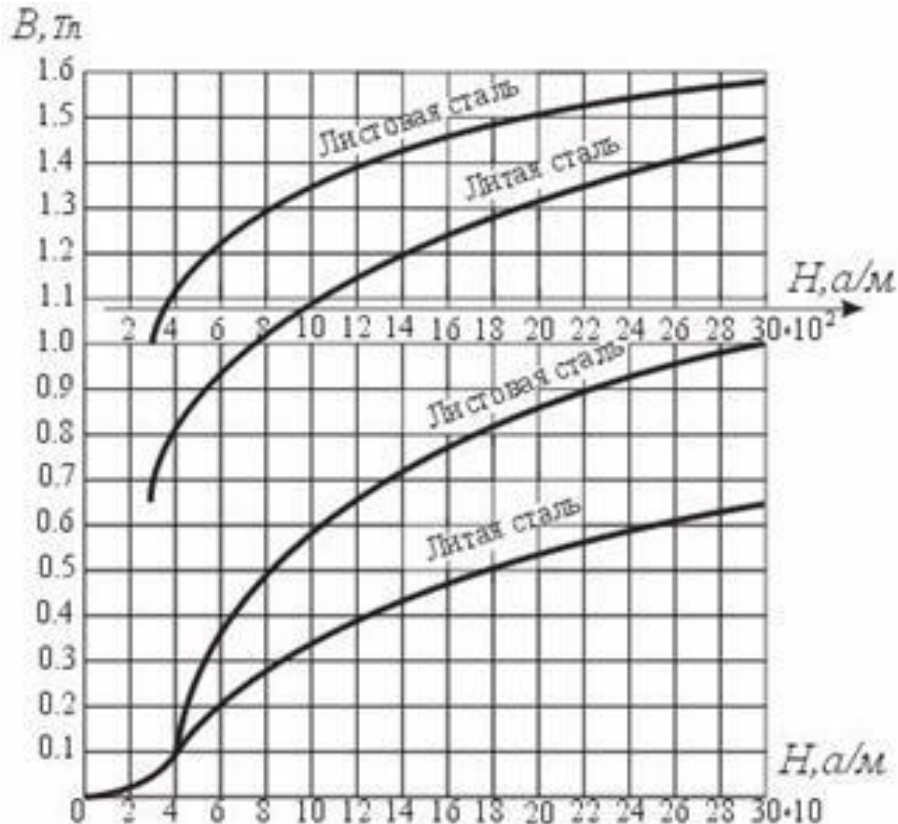
- Физические процессы в цепях переменного тока, содержащих катушку со стальным сердечником, имеют ряд особенностей по сравнению с процессами в цепях постоянного тока. Эти особенности оказывают существенное влияние на конструктивное выполнение и технические характеристики электрических аппаратов и машин переменного тока.
- Ферромагнитные элементы в цепях переменного тока имеют дополнительные потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи. Для снижения потерь стальной сердечник выполняют шихтованным из тонких изолированных друг от друга пластин.

- Непосредственное использование формулы для определения магнитного потока Φ оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничивающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.
- По полученным данным строят кривую $\Phi(F)$ – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничивающей силы найти величину магнитного потока.
- Для оценки необходимого значения Φ можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничивающей силы F при сопротивлении воздушного участка. Это значение Φ заведомо больше расчетного.
- Остальные значения можно давать меньше.

Потери в сердечнике

- Потери в сердечнике, называемые потерями в стали P_c , увеличиваются при повышении частоты питающего напряжения. Переменный магнитный поток Φ индуцирует в стальном сердечнике вихревые токи (токи Фуко), замыкающиеся в плоскостях, перпендикулярных к оси потока. Эти токи вызывают нагрев стали, снижая тем самым к.п.д. и ограничивая нагрузочную способность электромагнитных устройств. Потери энергии в стальном магнитопроводе значительно снижаются при уменьшении толщины листа электротехнической стали (0,1 ÷ 0,5 мм). Потери от вихревых токов:
 - $P_v = k_v f^2 B_m^2 d^2 / \rho$,
 - где k_v – коэффициент, определяемый экспериментально;
 - f – частота перемагничивания стали;
 - B_m – максимальная магнитная индукция;
 - d – толщина листа электротехнической стали сердечника;
 - ρ – удельное сопротивление материала сердечника.
- Помимо потерь от вихревых токов, в стальном магнитопроводе при переменном магнитном потоке возникают потери, обусловленные явлением гистерезиса
 - $P_r = k_r f B_m^2 G$,
 - где k_r – постоянный коэффициент;
 - G – вес сердечника в килограммах.
- Суммарные потери от вихревых потоков и гистерезиса $P_c = P_v + P_r$ [Вт] называют магнитными потерями или потерями в стали.

Векторная диаграмма и схема замещения катушки с сердечником



- При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность L нельзя считать постоянной, и поэтому необходимо использовать зависимость между ЭДС и потокосцеплением или потоком. Форма кривой зависимости между потоком Φ и намагничивающим током i подобна форме основной кривой намагничивания $B(H)$, т.к. $\Phi = B S$, а $H = IW / L$.
- Нелинейный характер зависимости между Φ и i приводит к тому, что индуктивность катушки $L = W \Phi / i$ перестает быть величиной постоянной и зависит от величины намагничивающего тока.

- Если к катушке подведено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$, а активное сопротивление обмотки $R \approx 0$, то приложенное напряжение уравнивается только ЭДС самоиндукции: $u = -e$, $U_m \sin(\omega t + \pi/2) = W d\phi / dt$.
- Интегрируя это выражение, получим
- $\phi = U_m / (2 \pi f) W \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t)$.
- Из полученного соотношения следует:
 1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток Φ , вызванный протекающим по цепи током i , тоже синусоидальный.
 2. Заданному действующему значению напряжения U на зажимах катушки соответствует определенная амплитуда магнитного потока Φ_m независимо от того, имеется ли у катушки стальной сердечник или же магнитный поток целиком замыкается по воздуху. Магнитный поток индуцирует в обмотке катушки ЭДС самоиндукции e , равную по величине приложенному напряжению и противоположную ему по направлению
- $e = -W d\phi/dt = -W \Phi_m \omega \cos(\omega t) = 2 \pi f W \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$,
- $E_m = 2 \pi f W \Phi_m$, $E=U= 4,44 f W \Phi_m$.
- При этом индуцируемая ЭДС E отстает от магнитного потока на четверть периода.

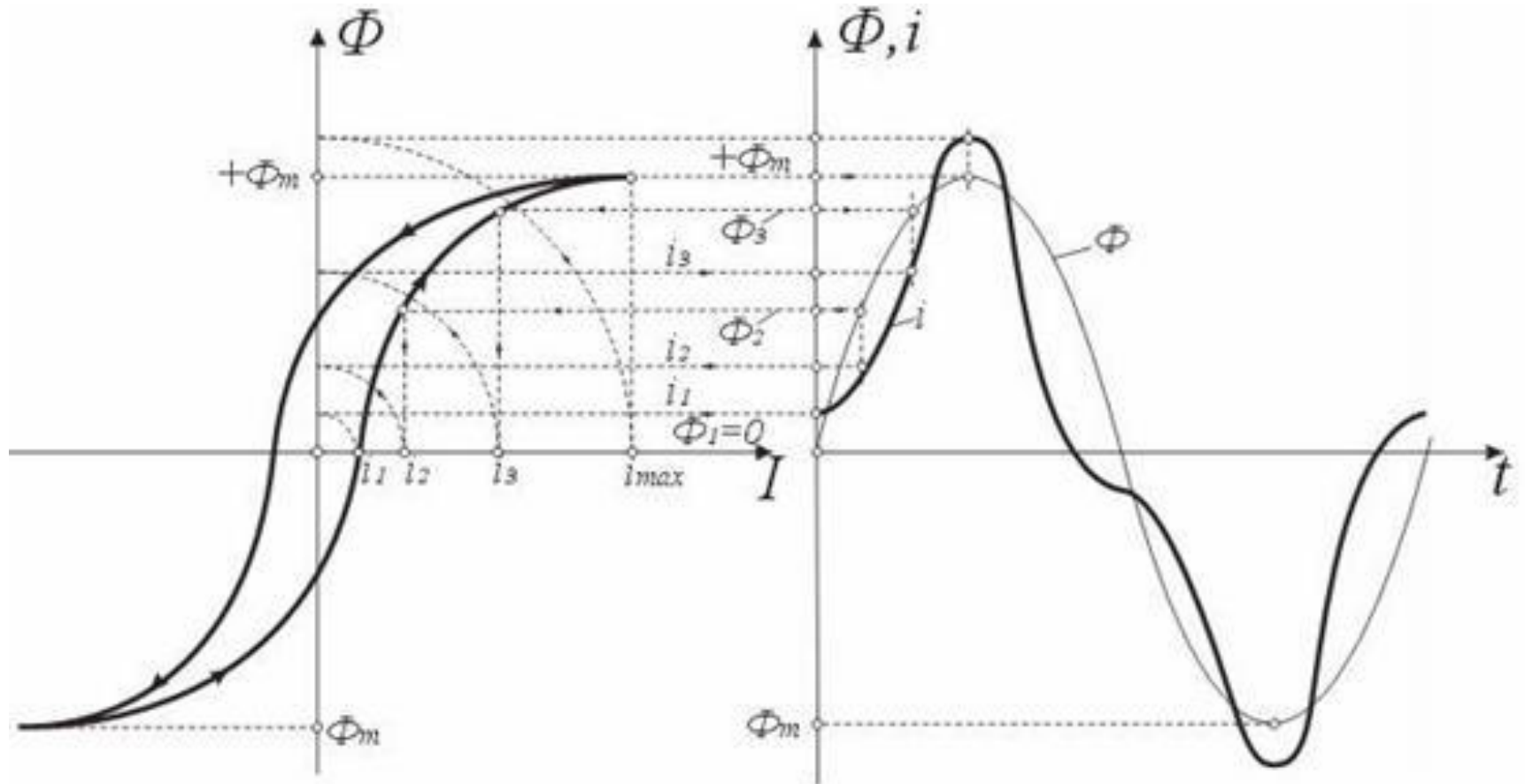
Трансформаторная ЭДС.

Кривая перемагничивания и кривые $\Phi(t)$ и $\Phi(i)$

для катушки со стальным сердечником.

- Выражение для действующей индуктированной ЭДС $E = 4,44 f W \Phi_m$ часто используется при анализе работы и в практических расчетах и называется трансформаторной ЭДС.
- Процесс намагничивания и размагничивания стального сердечника протекает по несовпадающим ветвям петли гистерезиса. График зависимости $\Phi(i)$ при циклическом перемагничивании (рис. а) имеет такую же форму, как и петля гистерезиса $B(H)$. На рис. б изображен график синусоидального изменения магнитного потока во времени $\Phi(t)$.
- Располагая кривыми $\Phi(i)$ и $\Phi(t)$, построим кривую намагничивающего тока $i(t)$.

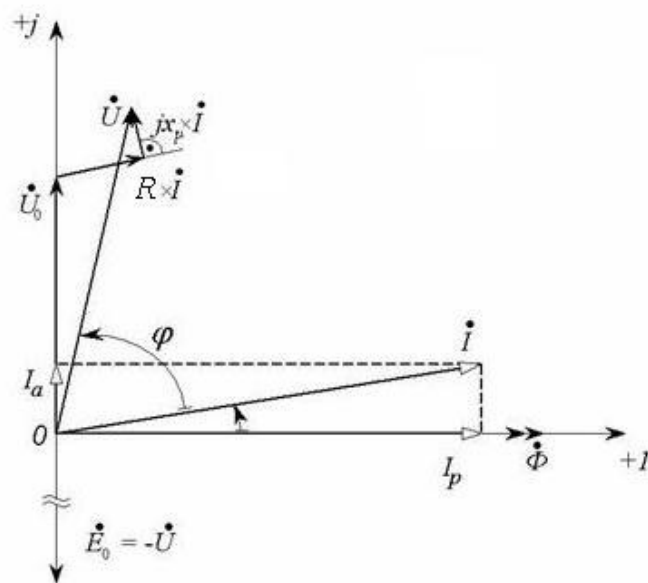
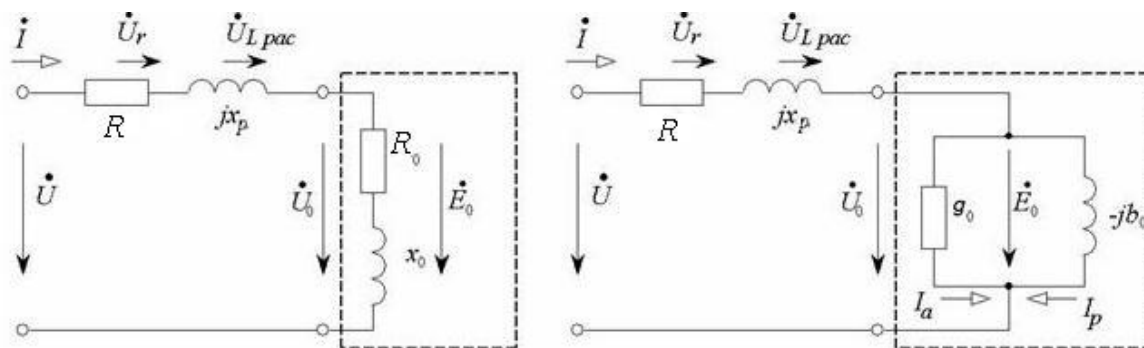
Кривая перемагничивания и кривые $\Phi(t)$ и $\Phi(i)$ для катушки со стальным сердечником



- Полученная кривая намагничивающего тока $i(t)$ является несинусоидальной периодической функцией. Для упрощения анализа и расчета цепей переменного тока, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, несинусоидальный намагничивающий ток заменяют эквивалентным синусоидальным, опираясь на равенство действующих значений. Для построения расчетной схемы замещения катушки с сердечником запишем уравнение
- $u = -e + L_p di / dt + R i$,
- где: R – сопротивление обмотки;
- L_p – индуктивность рассеяния.
- Полное комплексное сопротивление запишется в виде
- $\underline{Z} = R + R_o + j(x_p + x_o)$,
- где: R_o – активное сопротивление, обусловлено потерями на вихревые токи и гистерезис;
- x_o – индуктивное сопротивление, определяет мощность, необходимую на создание основного магнитного потока;
- R – сопротивление обмотки катушки;
- x_p – индуктивное сопротивление, определяет мощность потока рассеяния;
- R_o и x_o – нелинейные сопротивления.

Векторная диаграмма и а) последовательная, б) параллельная

схемы замещения катушки с сердечником



КОНЕЦ