

Магнитные цепи постоянного тока

Лекция №2

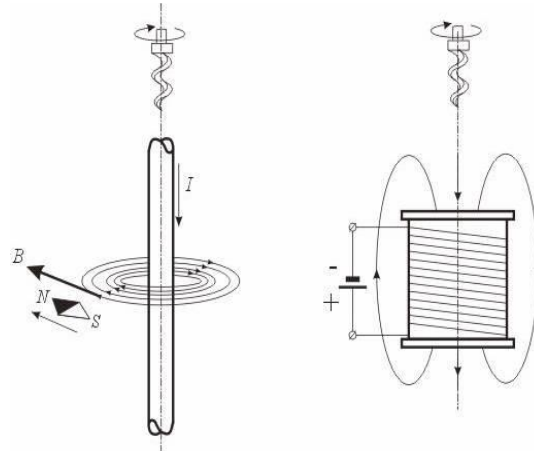
Дисциплина ТОЭ

Михайлова М.Ю.

Векторные величины, характеризующие магнитное поле

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Определение
Вектор магнитной индукции	\vec{B}	Тл (тесла)	Векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу со стороны магнитного поля. $B = F_m / q \cdot v$
Вектор намагниченности	\vec{J}	А/м	Магнитный момент единицы объема вещества
Вектор напряженности магнитного поля	\vec{H}	А/м	$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{J} = \frac{1}{\mu_0 \mu} \vec{B}$ <p>где $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Гн/м- магнитная постоянная</p>

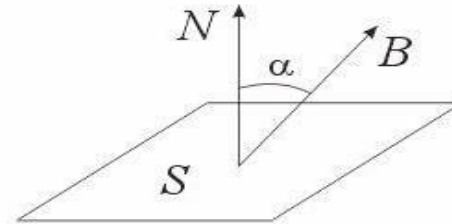
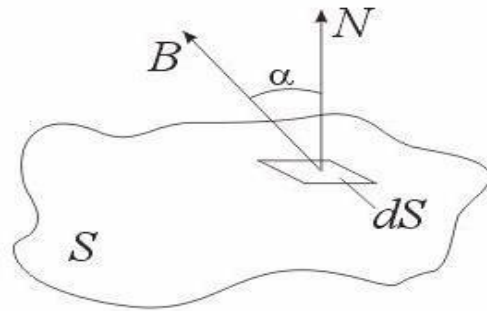
- Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правого винта (буравчика) (рис. 1).



- Рис. 1. Магнитное поле прямолинейного проводника и катушки. Правило Буравчика

- Основной величиной, характеризующей интенсивность и направление магнитного поля является – вектор магнитной индукции , которая измеряется в Теслах [Тл].
- Вектор направлен по касательной к магнитной линии, направление вектора совпадает с осью магнитной стрелки, помещенной в рассматриваемую точку магнитного поля.
- Величина определяется по механической силе, действующей на элемент проводника с током, помещенный в магнитное поле.
- Если во всех точках поля имеет одинаковую величину и направление, то такое поле называется равномерным.
- зависит не только от величины I , но и от магнитных свойств окружающей среды.

- Второй важной величиной, характеризующей магнитное поле является – магнитный поток, который измеряется в Веберах [Вб].
- Элементарным магнитным потоком Φ сквозь бесконечно малую площадку называется величина (рис. 2)
- $d\Phi = B \cos \alpha dS$,
- где α – угол между направлением и нормалью к площадке dS .



- Рис. 2. Определение магнитного потока, пронизывающего: а) произвольную поверхность; б) плоскую поверхность в равномерном магнитном поле
- Сквозь поверхность S [м^2]
- $\Phi = \int_S d\Phi = \int_S B \cos \alpha dS$,
- Если магнитное поле равномерное, а поверхность S представляет собой плоскость
- $\Phi = B S$.

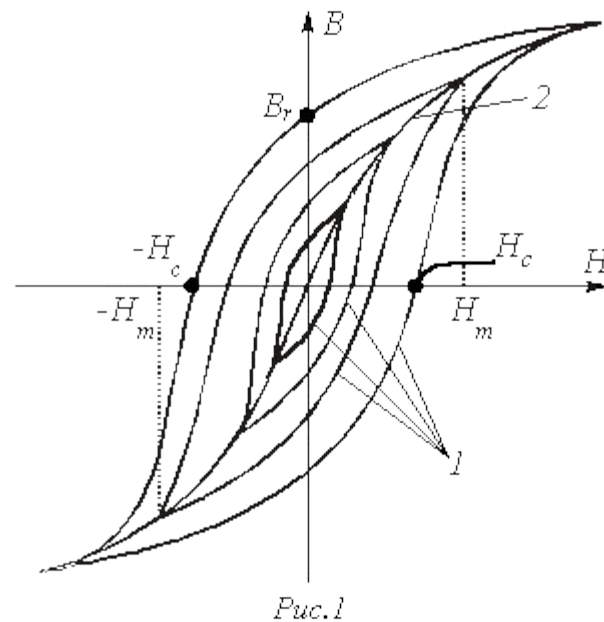
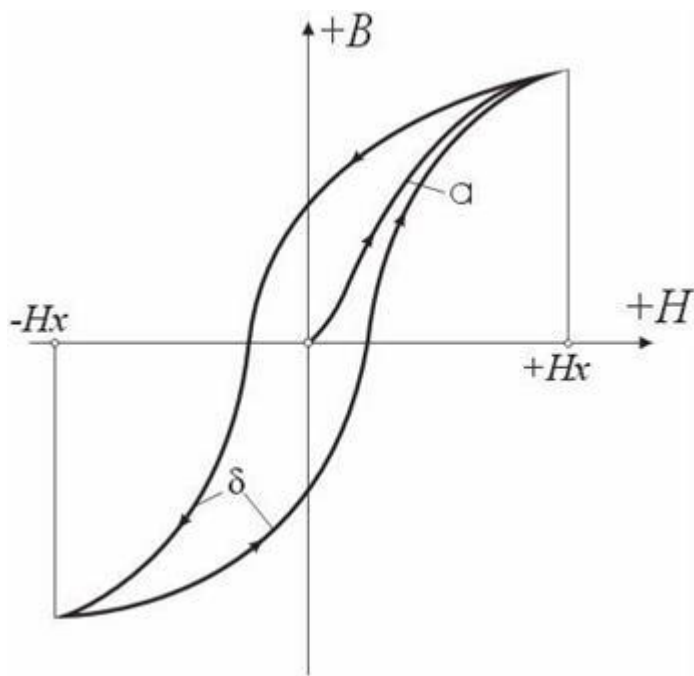
- При исследовании магнитных полей и расчете магнитных устройств пользуются расчетной величиной – напряженностью магнитного поля [А/м]

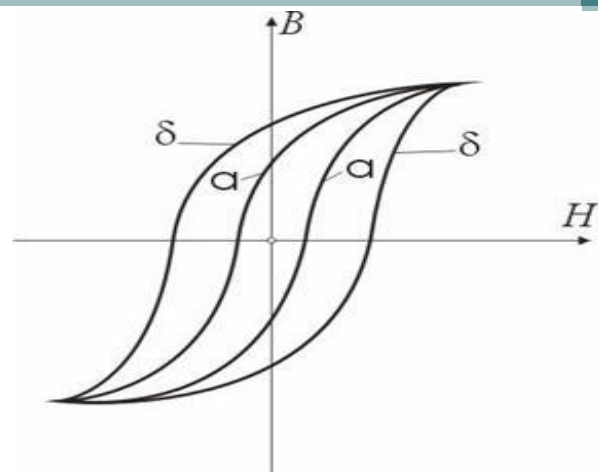
$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}$$

- 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
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, Гн/м (Генри/метр).
- У ферромагнетиков μ_a переменная и зависит от B .

Характеристики ферромагнитных материалов

- Известно, что магнитная проницаемость μ_a 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 (рис. 3).





- 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. 4., 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 б), имеющих большую остаточную индукцию и большую коэрцитивную силу. Такие ферромагнитные материалы называют **магнитотвердыми** (ряд сплавов железа с вольфрамом, хромом и алюминием).

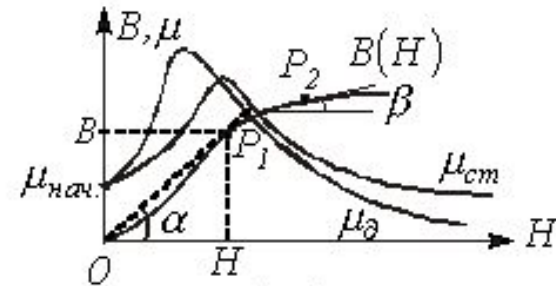
Статическая и дифференциальная магнитные проницаемости

- **Статическая магнитная проницаемость** (в справочниках начальная и максимальная)

$$\mu_{cm} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \Big|_{P_1} = m_\mu \operatorname{tg} \alpha$$

- определяется по основной кривой намагничивания и в силу ее нелинейности не постоянна по величине (см. рис. 5).
- Величина $\mu_{нач}$ определяется тангенсом угла наклона касательной в начале кривой.
- Кроме статической вводится понятие **дифференциальной магнитной проницаемости**, устанавливающей связь между бесконечно малыми приращениями индукции и напряженности

$$\mu_\partial = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \Big|_{P_2} = m_\mu \operatorname{tg} \beta$$



- Кривые $\mu_{cm}(H)$ и $\mu_\partial(H)$ имеют две об- точки, соответствующую максимуму μ_∂
- При учете петли гистерезиса статическая магнитная проницаемость, теряет смысл. При этом значения μ_{cm} определяют по восходящей ветви петли при $dH > 0$ и по нисходящей – при $dH < 0$.

$$dH > 0$$

$$dH < 0$$

Основные законы магнитной цепи

Наименование закона	Аналитическое выражение закона	Формулировка закона
Закон (принцип) непрерывности магнитного потока	$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$	Поток вектора магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю
Закон полного тока	$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum I$	Циркуляция вектора напряженности вдоль произвольного контура равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром

Законы Кирхгофа и Ома для магнитных цепей

Наименование закона	Аналитическое выражение закона	Формулировка закона
Первый закон Кирхгофа	$\sum \Phi = 0$	Алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитопровода равна нулю
Второй закон Кирхгофа	$\sum F = \sum U_M = \sum Hl$	Алгебраическая сумма падений магнитного напряжения вдоль замкнутого контура равна алгебраической сумме МДС, действующих в контуре
Закон Ома	$U_M = \Phi R_M,$ где $R_M = l / \mu_0 \mu S$	Падение магнитного напряжения на участке магнитопровода длиной l равно произведению магнитного потока и магнитного сопротивления R_M участка

Аналогия величин и законов для электрических и магнитных цепей

Электрическая цепь	Магнитная цепь
Ток I, A	Поток $\Phi, Вб$
ЭДС $E, В$	МДС (НС) F, A
Электрическое сопротивление $R, Ом$	Магнитное сопротивление $R_M, Гн^{-1}$
Электрическое напряжение $U, В$	Магнитное напряжение U_M, A
Первый закон Кирхгофа: $\sum I = 0$	Первый закон Кирхгофа: $\sum \Phi = 0$
Второй закон Кирхгофа: $\sum E = \sum U$	Второй закон Кирхгофа: $\sum F = \sum U_M$
Закон Ома: $U = IR$	Закон Ома: $U_M = \Phi R_M$

- В конструкцию многих электротехнических устройств (электрических машин, трансформаторов, электрических аппаратов, измерительных приборов и т.д.) входят магнитные цепи.
- **Магнитной цепью** называется часть электротехнического устройства, содержащая ферромагнитные тела, в которой, при наличии намагничивающей силы возникает магнитный поток и вдоль которой замыкаются линии магнитной индукции.
- Источниками намагничивающей силы могут быть катушки с токами, постоянные магниты.
- В конструктивном отношении магнитные цепи выполняют разветвленными и неразветвленными; применение того или иного вида цепи определяется в основном назначением электромагнитного устройства.

Магнитная цепь

Неразветвленная

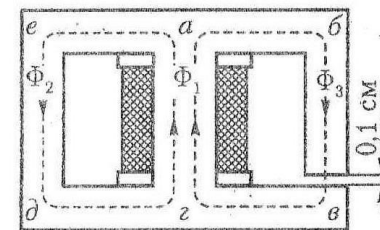
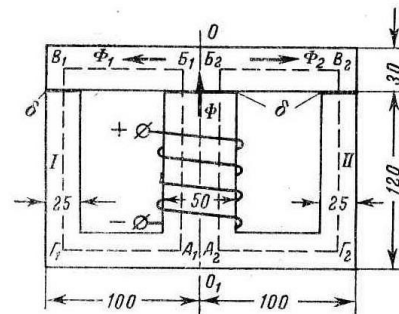
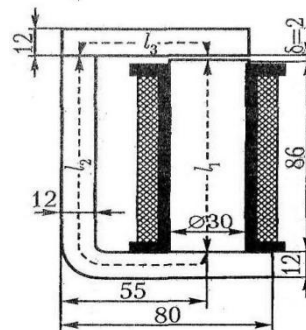
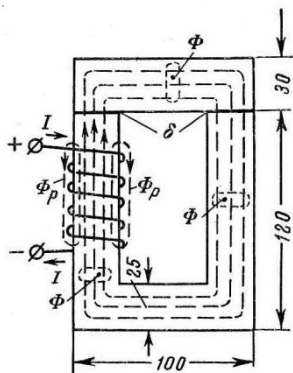
Разветвленная

Однородная

Неоднородная

Симметричная

Несимметричная



Прямая задача

- Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристика $B = f(H)$ (кривая намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь; 3) магнитный поток Φ , который надо создать в магнитной цепи. Требуется найти намагничивающую силу обмотки $F = IW$.

1. Магнитная цепь разбивается на ряд участков с одинаковым поперечным сечением S , выполненном из однородного материала.

2. Намечается путь прохождения средней магнитной линии (на рис. 5 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. Это позволяет сравнительно просто определить значение $\oint H dL$ для контура, образованного средней магнитной линией, а следовательно, найти искомую величину намагничивающей силы, поскольку $F = \oint H dL$.

Запишем интеграл $\oint H dL$ в виде суммы интегралов с границами интегрирования, совпадающими с началом и концом каждого участка цепи. Тогда

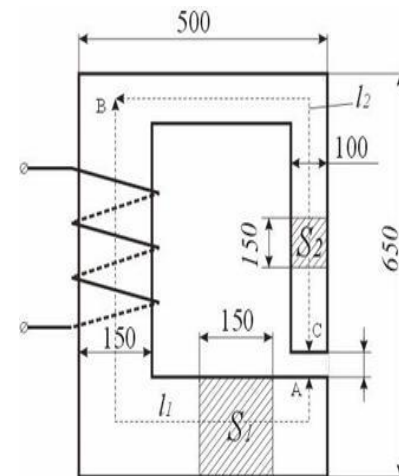
$$\oint H dL = \int_a^b H_1 dL + \int_b^c H_2 dL + \int_c^a H_3 dL = H_1 L_1 + H_2 L_2 + H_{\text{воз}} \delta = IW$$

где: L_1 и L_2 – длины ферромагнитных участков цепи [м],
 δ – ширина воздушного зазора, [м].

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

$$H_{\text{воз}} = \frac{B_{\text{воз}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{воз}}}{4\pi \times 10^{-7}} = 8 \times 10^5 B_{\text{воз}} \text{ А/м.}$$



Обратная задача

- Задано:
- Геометрические размеры магнитной цепи;
- Характеристики ферромагнитных материалов;
- Намагничивающая сила обмотки F .
- Требуется определить магнитный поток Φ .
- .

Требуется определить магнитный поток Φ .

$$\Phi = \mu_s S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_s S}} = \frac{F}{R_m}$$

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.

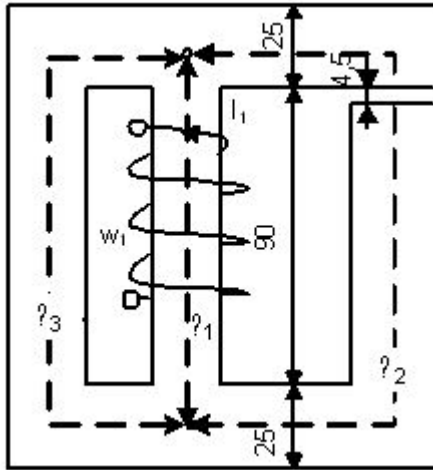
По полученным данным строят кривую $\Phi(F)$ – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничивающей силы найти величину магнитного потока.

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.

$$\Phi = \frac{F}{R_{\text{воз}}} = \frac{F}{\frac{b}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}}$$

Расчет разветвленной магнитной цепи



Магнитная цепь

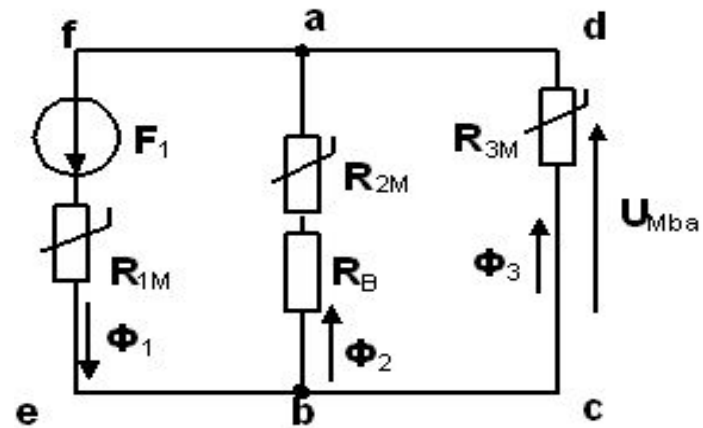


Схема замещения магнитной цепи

- Составляем уравнения.
- Примем, что втекающие магнитные потоки будут записаны со знаком минус, а вытекающие – с плюсом. Тогда для узла **a** по первому закону Кирхгофа для магнитной цепи получаем:

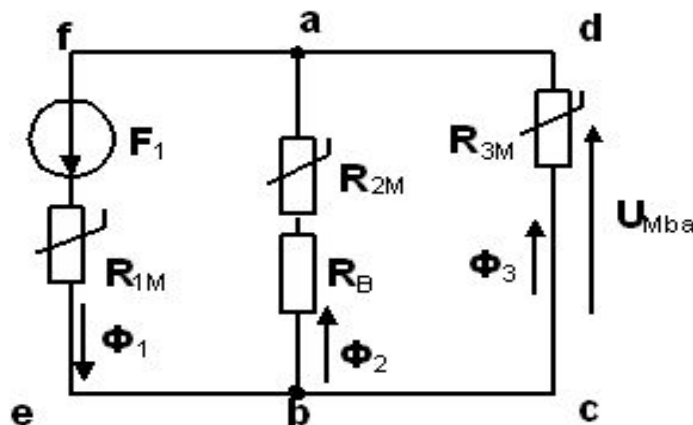
- $\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0.$

- Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров **afebcda** и **abcda**. Обход контура и в том и в другом случае выбираем против обхода часовой стрелки.

- **afebcda:** $F_1 = H_1 \ell_1 + U_{Mba}$

- **abcda:** $0 = -H_2 \ell_2 - H_0 \ell_0 + U_{Mba},$

- $U_{Mba} = H_3 \ell_3.$



- где $H_1, H_2, H_3, H_0, \ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_0$ – напряженности магнитного поля и средние линии участков магнитной цепи, соответственно, первой, второй, третьей ветвей магнитопровода и воздушного зазора,

- $F_1 = I_1 w_1$ – магнитодвижущая сила.

- Полученная в система нелинейных уравнений может быть решена графоаналитическим методом. Для этого необходимо будет построить зависимости магнитных потоков от магнитного напряжения U_{Mba} : $\Phi_1 = f(U_{Mba})$, $\Phi_2 = f(U_{Mba})$, $\Phi_3 = f(U_{Mba})$. Поскольку по первому закону Кирхгофа $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$, то необходимо будет построить и суммарную кривую магнитных потоков Φ_2 и Φ_3 при одних и тех же значениях магнитного напряжения U_{Mba} . Точка пересечения суммарной кривой и $\Phi_1 = f(U_{Mba})$ определит значения магнитного потока Φ_1 и магнитного напряжения U_{Mba} . Зная значения U_{Mba} , по построенным кривым $\Phi_2 = f(U_{Mba})$ и $\Phi_3 = f(U_{Mba})$ можно определить магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Какие цепи называются магнитными?
- 2. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей
- 3. Поясните, почему магнитные цепи являются нелинейными?
- 4. Какие физические величины характеризуют магнитную цепь?
- 5. Какие методы расчета магнитных цепей Вы знаете?