

Электронный архив УГЛТУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра энергетики

О.Б. Пушкарева  
Н.Р. Шабалина  
Н.А. Башко

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Методические указания  
по подготовке к Интернет-экзамену  
по дисциплине «Электротехника и электроника»  
(раздел «Анализ и расчет магнитных цепей»)  
для студентов очного обучения  
по всем направлениям и специальностям

Екатеринбург  
2013

Печатается по рекомендации методической комиссии ИАТиГС.  
Протокол № 1 от 5 октября 2012 г.

Рецензент – Шавнина Е.П., канд. физ.-мат. наук.

Редактор А.Л. Ленская  
Компьютерная верстка Е.В. Карпова

---

Подписано в печать 27.12.13		Поз. 56
Плоская печать	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 1,86	Цена руб. коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ВВЕДЕНИЕ

Федеральный экзамен в сфере высшего профессионального образования (ФЭПО) проводится в виде Интернет-тестирования. Вопросы, выносимые на экзамен, разделены на разделы. В данном методическом указании рассматривается раздел «Анализ и расчет магнитных цепей», в который входят темы:

- 1) основные понятия теории электромагнитного поля и основные магнитные величины;
- 2) свойства ферромагнитных материалов. Определения, классификация, законы магнитных цепей;
- 3) магнитные цепи с постоянными магнитными потоками;
- 4) магнитные цепи с переменными магнитными потоками.

Данные методические указания могут быть использованы для подготовки студентов к Интернет-экзамену, для контроля знаний студентов с помощью ЭВМ и для самостоятельной проработки материала по дисциплине «Электротехника и электроника» при изучении раздела «Магнитные цепи». Перед вопросами, составленными по темам в соответствии с учебной программой, приведена краткая теория, где студент может изучить основные величины и формулы, используемые в вопросах. При решении приведенных в методических указаниях задач математические действия сведены к минимуму и в основном прорабатываются электротехнические вопросы. В задачах помимо условия приводятся необходимые схемы или графики, показано решение, дается правильный ответ на поставленный вопрос. Ответы приводятся в соответствии с формулировками учебника под редакцией В.Г. Герасимова [1], принятого разработчиками тестовых заданий в качестве базового источника.

### **1. Основные понятия теории электромагнитного поля и основные магнитные величины**

Магнитное поле – составляющая электромагнитного поля, появляющаяся при наличии изменяющегося во времени электрического поля. Кроме того, магнитное поле может создаваться током заряженных частиц либо магнитными моментами электронов в атомах (постоянные магниты). Фундаментальными уравнениями, описывающими магнитное поле, являются уравнения Максвелла. Магнитное поле используется во многих электротехнических устройствах и имеет графическое отображение в виде силовых линий.

Физической величиной, определяемой по силе, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся в этом поле заряженную частицу, является вектор **магнитной индукции** -  $\vec{B}$ , Тл (Тесла). Магнитная индукция  $B$  является силовой характеристикой магнитного поля. Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  определяется по силе  $\vec{F}$ , действующей со стороны магнитного поля на движущуюся в нем со скоростью  $\vec{v}$  частицу с зарядом  $q$ .

Вектор магнитной индукции – это основная величина, характеризующая интенсивность и направление магнитного поля. Вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к магнитной линии, направление вектора совпадает с осью магнитной стрелки, помещенной в рассматриваемую точку магнитного поля. Величина  $B$  определяется по механической силе, действующей на элемент проводника с током, помещенный в магнитное поле. Если  $\vec{B}$  во всех точках поля имеет одинаковую величину и направление, то такое поле называется равномерным. Магнитное поле, во всех точках которого векторы магнитной индукции  $\vec{B}$  равны по величине и параллельны, называется однородным.  $B$  зависит не только от величины  $I$ , но и от магнитных свойств окружающей среды. Направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением поля в данной точке.

Второй важной величиной, характеризующей магнитное поле, является – **магнитный поток**  $\Phi$ , который измеряется в веберах [Вб].

**Магнитный поток**  $\Phi$  – это интегральная характеристика магнитного поля, которая является скалярной величиной (рис. 1). Элементарным магнитным потоком  $\Phi$  сквозь бесконечно малую площадку называется величина

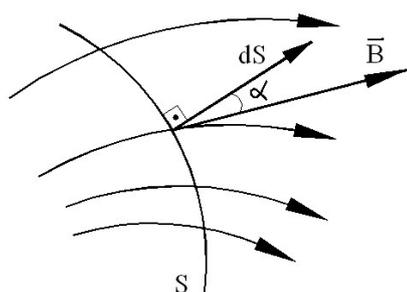


Рис. 1

$$\Phi = \int_S B dS. \quad (1)$$

$$\Phi = \int_S B \cos \alpha dS,$$

где  $S$  – поверхность,  $m^2$ ;

$\alpha$  – угол между направлением и нормалью к площадке  $dS$ .

Если магнитное поле равномерное и поверхность  $S$  представляет собой плоскость, а угол  $\alpha=0$ , то

$$\Phi = BS. \quad (2)$$

Магнитный поток

$$\text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \frac{\text{Вб}}{\text{м}} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб},$$

где  $S$  – площадь поверхности, перпендикулярной к вектору индукции. Магнитный поток характеризуется числом линий, проходящих через пло-

щадь  $S$ . Принцип непрерывности магнитного поля выражает интегральное соотношение  $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$ .

Направление магнитных линий и направление создающего их тока  $I$  связаны между собой известным правилом правоходового винта (буравчика), а также правилом левой руки (рис. 2).

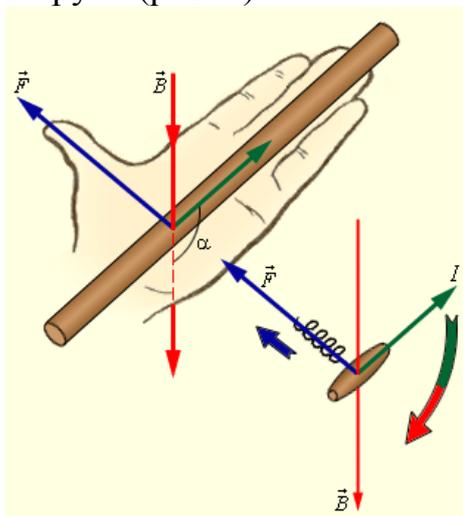


Рис. 2. Магнитное поле. Правило буравчика и правило левой руки

Намагничивающая сила  $F$  создает пропорциональную ей **напряженность** магнитного поля. Напряженность магнитного поля – это векторная величина, ее модуль обозначается  $H$  (измеряется в амперах на метр, А/м). Напряженность  $H$  изменяет магнитное состояние среды, характеризует интенсивность магнитного поля и не зависит от свойств окружающей среды.

$H$  – характеризует намагничивающую способность постоянных магнитов или намагничивающих обмоток. Напряженность связывает намагничивающие токи с самим магнитным полем.

Напряженность магнитного поля  $H$  и магнитную индукцию  $B$  связывает зависимость, которая называется **абсолютной магнитной проницаемостью**

$$\mu_a = \frac{B}{H}. \quad (3)$$

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость (Гн/м) определяет степень участия среды в создании магнитного поля.

$$\mu_a = \mu_0 \mu_r, \quad (4)$$

где  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды (размерности не имеет);

$\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха (проницаемость вакуума), Гн/м.

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}. \quad (5)$$

В природе у большинства веществ –  $\mu_a = \mu_0$ , так как  $\mu_r = 1$ .

В зависимости от величины относительной магнитной проницаемости все вещества делятся на три группы:

- диамагнетики – вещества, у которых  $\mu_r < 1$ ;
- парамагнетики – вещества, у которых  $\mu_r > 1$ ;
- ферромагнетики – вещества, у которых  $\mu_r \gg 1$ .

К ферромагнетикам относятся металлы железо, никель, кобальт, гадолиний и их сплавы, а также пластические и другие композиции с включением порошков ферромагнитных металлов (ферриты). Остальные вещества являются парамагнитными или диамагнитными.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от величины магнитной индукции.

Основным элементом электрических машин и электротехнических устройств является магнитная система. В нее входят источники магнитного поля (обмотка с током, которая возбуждает магнитное поле, постоянный магнит) и магнитопровод из ферромагнитного материала. По магнитопроводу замыкается магнитный поток –  $\Phi$ .

В электротехнических устройствах используется *индукционное* и *силовое действие* магнитного поля.

*Индукционное действие* магнитного поля обнаруживается в виде ЭДС, возникающей в катушке, пронизываемой переменным магнитным полем, или в проводнике, который перемещается относительно магнитного поля. На индукционном действии магнитного поля основаны принципы действия таких устройств, как трансформаторы, генераторы электрической энергии, различного рода индукционные датчики и т.п.

*Силовое действие* магнитного поля проявляется в качестве электромагнитной силы, действующей на проводники с током, детали устройств, выполненных из ферромагнитного материала, или электрические заряды, перемещающиеся в магнитном поле. На силовом действии магнитного поля основаны принципы действия электрических двигателей, различных электрических аппаратов, электромагнитов и др. устройств.

По закону Ампера электромагнитная сила  $F$  (Н), действующая на провод с током, расположенный в магнитном поле

$$F = B\ell I, \quad (6)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$\ell$  – длина средней линии сердечника, м;

$I$  – ток в обмотке катушки, А.

Источниками магнитного поля являются обмотка с током и постоянный магнит. Обмотка с током возбуждает магнитное поле, а по системе

магнитопроводов, выполненных из ферромагнитного материала, магнитный поток замыкается.

**Закон электромагнитной индукции**,  $B$ , описывается формулой

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} \quad (7)$$

$$\text{или } e = B\ell v, \quad (8)$$

где  $e$  – мгновенная ЭДС;

$W$  – число витков катушки;

$\Phi$  – переменный магнитный поток, Вб;

$\psi$  – потокосцепление, Вб;

$t$  – время, с;

$\ell$  – длина проводника, м;

$v$  – скорость, с которой движется провод в однородном поле, м/с.

**Явление самоиндукции** описывается формулой

$$e_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (9)$$

где  $e_L$  – ЭДС самоиндукции, В;

$L$  – индуктивность контура, Гн;

$i$  – переменный ток катушки, А;

$t$  – время, с.

Для того чтобы получить в том или ином устройстве необходимое значение ЭДС, или электромагнитной силы, следует в определенном пространстве этого устройства сконцентрировать магнитное поле требуемой интенсивности и направления действия. Эту функцию в электротехнических устройствах выполняют магнитные цепи.

**Магнитная цепь** состоит из магнитопровода и намагничивающих обмоток. Магнитопровод выполняется в основном из **ферромагнитного** материала. Довольно часто в магнитопроводах предусматривают воздушные промежутки, необходимые для выполнения тех или иных технологических функций электромагнитного устройства. Например, в электродвигателях магнитная цепь является общей для динамических и неподвижных цепей. Там магнитная цепь разделяется воздушным зазором. Также в магнитных цепях вместо намагничивающих обмоток (или вместе с ними) используются постоянные магниты. **Магнитопровод** служит для усиления магнитного поля, возбуждаемого токами, протекающими по намагничивающим обмоткам или постоянным магнитам. Благодаря способности магнитопровода усиливать магнитное поле, придавая ему ту или иную форму, получают возможность сконцентрировать магнитное поле в нужном объеме электромагнитного устройства (ЭМУ). Магнитное поле, во всех точках которого векторы магнитной индукции  $\vec{B}$  равны по величине и параллельны, называется **однородным**.

Магнитные цепи бывают неразветвленные и разветвленные, однородные и неоднородные.

**Неразветвленной** магнитной цепью называется цепь, через элементы которой замыкается один и тот же магнитный поток.

В **разветвленной** магнитной цепи содержатся ветви, в каждой из которых замыкаются свои магнитные потоки.

В **однородной** магнитной цепи, образованной замкнутым магнитопроводом, магнитный поток находится в однородной среде.

**Неоднородной** называется магнитная цепь, состоящая из участков, имеющих разные сечения, воздушные зазоры, ферромагнитные тела с различными магнитными свойствами.

#### Примеры магнитных цепей

1. Магнитная цепь однофазного трансформатора (рис. 3, а) – **неразветвленная, однородная**. Магнитная цепь в виде тороида (рис. 3, б) с постоянным поперечным сечением  $S$  характеризуется как неразветвленная, однородная.

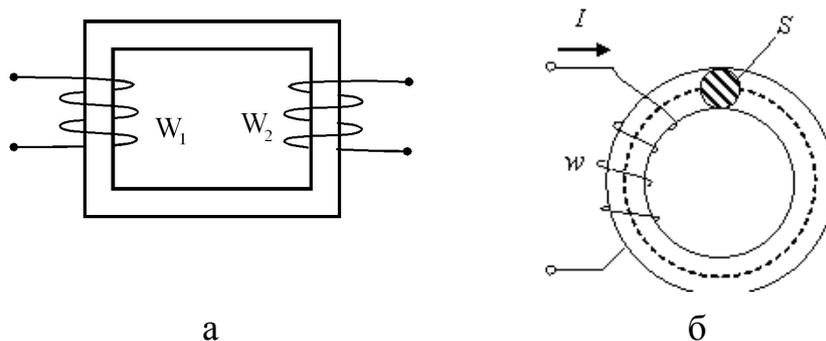


Рис. 3

2. Магнитная цепь электромагнитного реле (рис. 4) – **неразветвленная, неоднородная**. При подаче тока начинает действовать сила, и зазор уменьшается – происходит срабатывание электромагнитного реле.

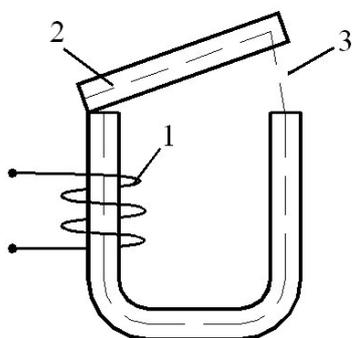


Рис. 4:

- 1 – намагничивающая обмотка,
- 2 – часть магнитопровода, выполненная из ферромагнитного материала,
- 3 – воздушный зазор в магнитопроводе.

3. Магнитная цепь, приведенная на рис. 5, содержит воздушный зазор  $\delta$ , четыре различных сечения магнитопровода  $S_1, S_2, S_3, S_4$  и классифицируется как **разветвленная неоднородная**.

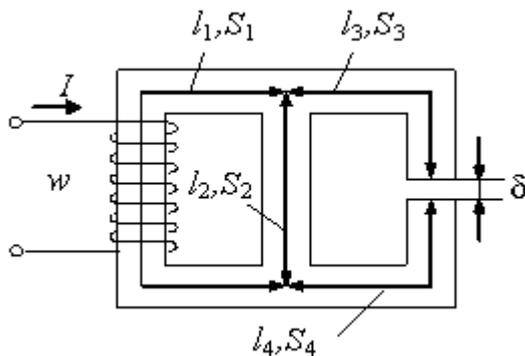


Рис. 5

В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока

$$\oint_{\ell} \vec{H} d\vec{\ell} = \sum I. \quad (10)$$

Формулировка закона полного тока: *Линейный интеграл от вектора напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура равен алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром* (рис. 6).

Ток \$I\_k\$, пронизывающий контур \$\ell\$, считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом буравчика. Тогда

$$\oint H d\ell = -I_1 + I_2 - I_k.$$

Если контур интегрирования охватывает катушку с числом витков \$W\$, через которую протекает ток \$I\$, то алгебраическая сумма токов

$$\sum I = IW = F, \quad (11)$$

где \$F\$ – магнитодвижущая сила, А.

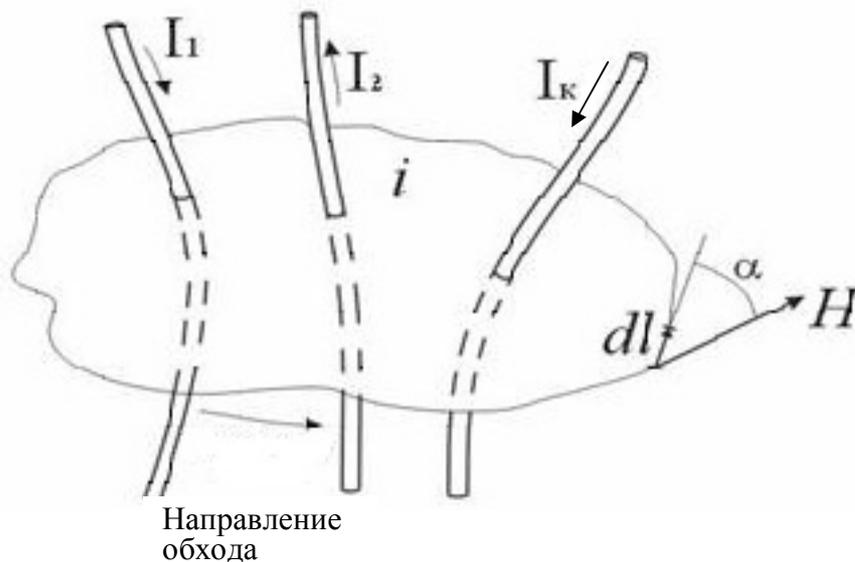


Рис. 6

Рассмотрим применение закона полного тока для расчета магнитных цепей. Предположим, что имеется магнитопровод, имеющий сечение в виде кольца (рис. 7).

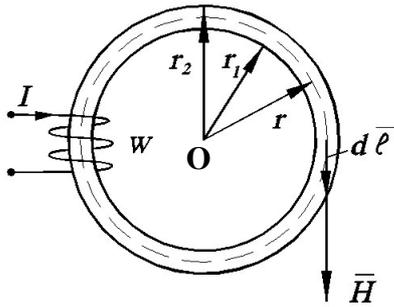
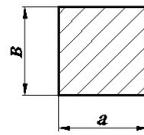


Рис. 7:



- поперечное сечение кольца;

----- силовая линия

Обмотка имеет  $W$  витков и обтекается током  $I$ . Магнитные линии внутри кольца представляют собой concentric окружности с центром в точке  $O$ .

Выделим элемент  $d\ell$ , на котором напряженность  $H$  будет одинакова, поэтому ее можно вывести за знак интеграла.

$$\oint \bar{H} d\ell = \oint H \cos \alpha d\ell = \oint H d\ell = H \oint d\ell = H\ell, \text{ тогда закон полного}$$

$$\text{тока можно записать } H\ell = \sum I. \quad (12)$$

Токов будет столько, сколько витков  $W$  в катушке, значит, для тороида

$$H 2\pi r = WI. \quad (13)$$

В практических расчетах интеграл  $\oint H d\ell$  заменяют суммой  $\sum H_k \ell_k$  и выбирают участки магнитной цепи таким образом, чтобы напряженности  $H_1, H_2$  и т.д. можно было считать примерно одинаковыми. Тогда уравнение (10) запишется в следующем виде:

$$H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + \dots + H_n \ell_n = \sum IW = F, \quad (14)$$

где  $\ell_1, \ell_2, \ell_n$  - длины средних линий участков магнитной цепи;

$H_1 \ell_1, H_2 \ell_2, H_n \ell_n$  - магнитные напряжения участков цепи.

Тогда напряженность можно определить по формуле

$$H = \frac{IW}{2\pi r} = \frac{F}{2\pi r} = \frac{F}{\ell}. \quad (15)$$

Зная значение напряженности (15), можно найти индукцию магнитного поля:

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_r \mu_0 \frac{F}{2\pi r} = \mu_a \frac{F}{2\pi r}. \quad (16)$$

Как видно из формулы (16), величина магнитной индукции различная в магнитопроводе:

$$B_{\max} = \mu_r \mu_0 \frac{F}{2\pi r_2}, \quad B_{\min} = \mu_r \mu_0 \frac{F}{2\pi r_1}, \text{ чем меньше ширина кольца, тем}$$

меньше различие между индукциями. Когда  $a \ll r_{cp} = \frac{r_1 + r_2}{2}$ , можно

полагать, что индукция на всех сечениях кольца будет одинакова:

$$B = \mu_r \mu_0 \frac{F}{\ell_{cp}} = \mu_a \frac{F}{\ell_{cp}}. \quad (17)$$

Расчет магнитных цепей проводится по среднему значению.

Учитывая уравнение (2), магнитный поток можно рассчитать:

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{F}{\ell_{cp}} S, \quad (18)$$

где  $S$  – площадь сечения магнитопровода,  $m^2$ .

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца. Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой по **закону Ома для магнитных цепей**:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{IW}{R_m}, \quad (19)$$

где  $R_m = \frac{\ell_{cp}}{\mu_a S}$  – магнитное сопротивление,  $A/Вб=1/Гн$ .

Здесь  $\ell_{cp}$  – длина средней силовой линий магнитного поля, м;

$\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Энергия магнитного поля  $W_L = \frac{LI^2}{2}$ , Дж.

Подъемная сила электромагнита, Н

$$F = \frac{B_0 H_0}{2} S = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S, \quad (20)$$

где  $B_0$  и  $H_0$  – магнитная индукция и напряженность магнитного поля.

Для магнитных цепей так же, как и для электрических цепей, можно использовать 1-й и 2-й законы Кирхгофа:

**1-й закон Кирхгофа** - алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в одном узле (поток через замкнутую поверхность), равна 0:

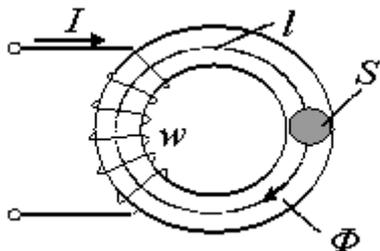
$$\sum \Phi = 0. \quad (21)$$

**2-й закон Кирхгофа** - алгебраическая сумма падений магнитных напряжений в любом замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС в контуре:

$$\sum U_\mu = \sum WI. \quad (22).$$

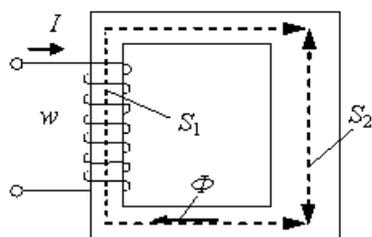
Тестовые задания

1. Если при неизменной магнитной индукции  $B$  уменьшить площадь поперечного сечения  $S$  магнитопровода, то магнитный поток ...



Ответ: уменьшится, так как  $\downarrow \Phi = BS \downarrow$ .

2. Если при неизменном магнитном потоке  $\Phi$  площадь поперечного сечения  $S_1 < S_2$ , то для магнитных индукций  $B_1$  и  $B_2$  выполняется соотношение...



Ответ:  $B_1 > B_2$

*Решение:* учитывая формулу (2):

$$\Phi = BS, \Rightarrow B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; B_2 = \frac{\Phi}{S_2}.$$

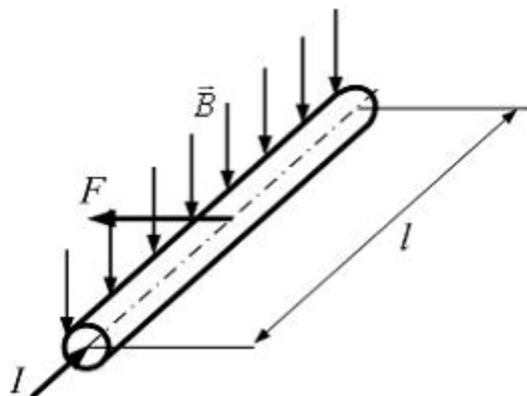
3. Если при неизменных числе витков  $W$  и площади поперечного сечения  $S$  уменьшить длину  $\ell$  магнитопровода (сердечник не насыщен) и увеличить ток  $I$  в обмотке, то магнитный поток  $\Phi$ ...

Ответ: увеличится

*Решение:*

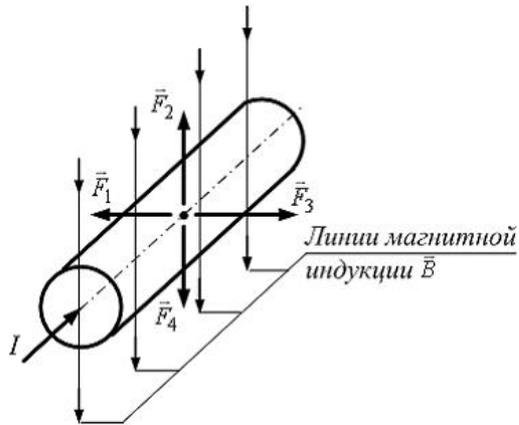
$$\Phi = \frac{F}{R_\mu} = \frac{IW}{R_\mu} \Rightarrow IW = \Phi R_\mu = \Phi \frac{\ell_{\text{фер}}}{\mu_a \cdot S} \Rightarrow \uparrow \Phi = \frac{\uparrow IW \mu_a \cdot S}{\downarrow \ell_{\text{фер}}}$$

4. Сила  $\vec{F}$ , действующая на помещенный в однородное магнитное поле с магнитной индукцией  $\vec{B}$  прямолинейный проводник длиной  $l$  с током  $I$ , равна ...



*Решение:* Действующая на помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  прямолинейный проводник длиной  $l$  с током  $I$  сила  $\vec{F} = I[\vec{l}\vec{B}]$ . Направление вектора  $\vec{l}$  совпадает с направлением тока  $I$  (см. рис. 2).

5. Сила  $\vec{F}$ , действующая на помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  проводник с током  $I$ , направлена по ...



Ответ:  $\vec{F}_1$

Решение: Направление силы  $\vec{F}$ , действующей на помещенный в однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  проводник с током  $I$ , можно определить по правилу левой руки (см. рис. 2).

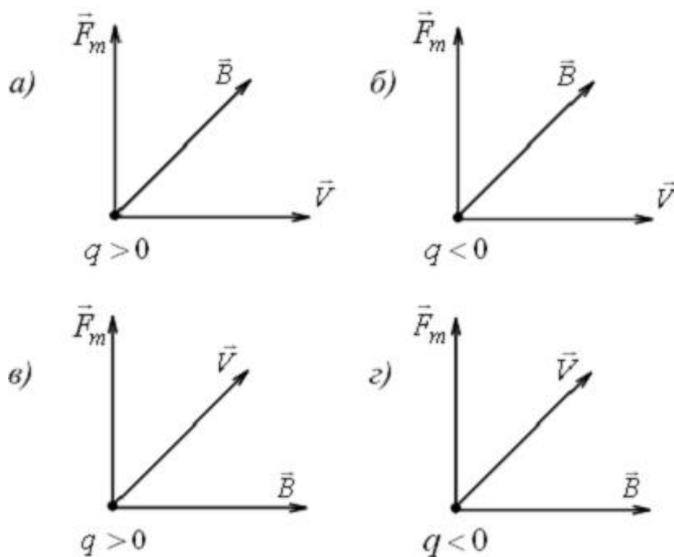
Сила  $\vec{F}$  направлена по  $\vec{F}_1$ .

6. Сила  $\vec{F}_m$ , действующая со стороны магнитного поля на движущуюся в нем со скоростью  $\vec{V}$  частицу с зарядом  $q$ , равна ...

Ответ:  $\vec{F}_m = q[\vec{V}\vec{B}]$

Решение: Действующая со стороны магнитного поля на движущуюся в нем со скоростью  $\vec{V}$  частицу с зарядом  $q$  сила  $\vec{F}_m = q[\vec{V}\vec{B}]$ .

7. На рисунках представлены взаимные положения векторов скорости  $\vec{V}$

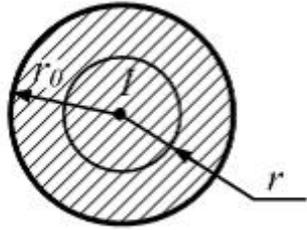


частиц с зарядами  $q > 0$  и  $q < 0$ , магнитной индукции  $\vec{B}$  и силы  $\vec{F}_m$ , действующей со сторон магнитного поля на движущиеся в нем заряженные частицы. Верным является взаимное положение векторов  $\vec{V}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_m$  на рисунке ...

Ответ: а)

Решение: Действующая со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу сила  $\vec{F}_m = q[\vec{V}\vec{B}]$ . Верным является взаимное расположение векторов  $\vec{V}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_m$  на рисунке а.

8. На окружности радиуса  $r$  (см. рис.) внутри круглого провода с током  $I$   $\oint \vec{H} \cdot \vec{dl}$  равен \_\_\_\_\_ А  
( $r$ )

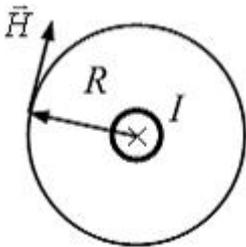


Ответ:  $I \left( \frac{r}{r_0} \right)^2$

*Решение:* Ток через поверхность, ограниченную окружностью радиуса  $r$ ,  $I_r = I \left( \frac{r}{r_0} \right)^2$ .

По закону полного тока  $\oint_{(r)} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I \left( \frac{r}{r_0} \right)^2$ .

9. При  $I=314,3$  А на расстоянии  $R=1$  м от оси бесконечно длинного круглого провода (см. рис.) величина напряженности магнитного поля  $H$  равна \_\_\_\_\_ А/м.



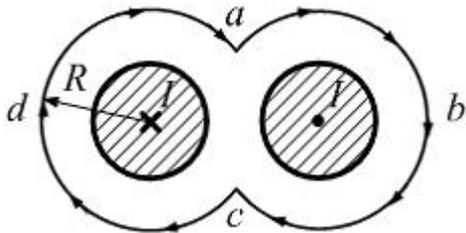
Ответ: 50 А/м

*Решение:* По закону полного тока

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = 2\pi R H = I$ . Напряженность магнитного поля

$H = \frac{I}{2\pi R} = \frac{314,2}{2\pi \cdot 1} = 50 \frac{A}{m}$ .

10. На рисунке изображены два провода с противоположно направленными токами  $I$ . При  $I=314,2$  А,  $R=1$  м интеграл  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$   $abcd$  равен \_\_\_\_ А.



Ответ: 0 А

*Решение:*

По закону полного тока при противоположно направленных токах  $\oint_{abcd} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = 0$ .

11. Связь между электрическим током и напряженностью магнитного поля устанавливается законом полного тока и записывается в виде:

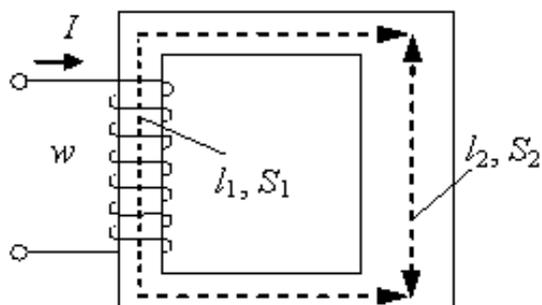
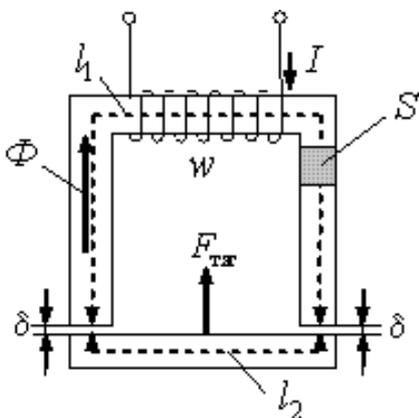
Ответ:  $\oint_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I$

12. Закон полного тока для контура магнитной цепи, состоящего из  $n$  участков и сцепленного с катушкой числом витков  $W$ , по которой протекает ток  $I$ , записывается в виде...

Ответ:  $\sum_{k=1}^n H_k \ell_k = IW$

13. Уравнение 
$$e = \oint_{\ell} \bar{E} d\bar{\ell} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$
 описывает закон электромагнитной индукции.

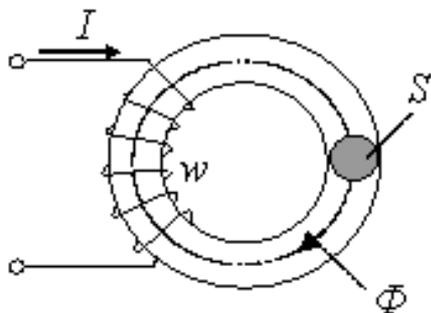
14. Магнитодвижущую силу (МДС) вдоль магнитной цепи можно представить в виде:



а)  $IW = H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_\delta \delta$

б)  $IW = H_1 l_1 + H_2 l_2$

15. Чтобы при неизменных токе  $I$ , площади поперечного сечения  $S$  и длине  $\ell$  магнитопровода магнитный поток  $\Phi$  стал больше, число витков  $W$  в намагничивающей катушке должно быть ...



Ответ: увеличено, учитывая уравнение (16)

$$\uparrow \Phi = BS = \mu_a \frac{F}{\ell_{cp}} S = \mu_a \frac{IW \uparrow}{\ell_{cp}} S.$$

## 2. Свойства ферромагнитных материалов.

### Определения, классификация, законы магнитных цепей

В 1972 г. профессор Столетов А.Г., исследуя изменение магнитных свойств стали от напряженности, получил кривую начального намагничивания (рис. 8).

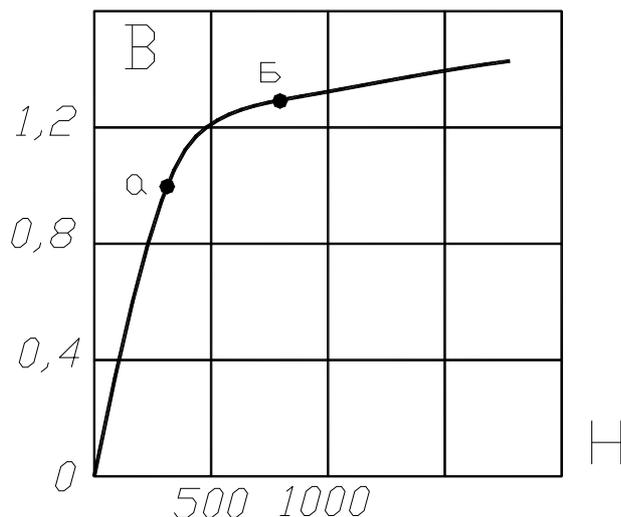


Рис. 8. 0а – магнитная индукция  $B$  быстро растет почти пропорционально  $H$ ; аб – замедление роста  $B$ ; выше точки б – участок магнитного насыщения

Если элемент магнитной цепи, например цилиндр из ферромагнитного материала, поместить в однородное магнитное поле, он намагнитится. Если намагнитить его до насыщения, а затем внешнее поле убрать, то цилиндр явится источником магнитного поля за счет намагниченности материала – **остаточной намагниченности**. Задерживающая сила, которая стремится сохранить намагниченность, называется **коэрцитивной силой  $H_c$** .

При увеличении намагничивающего тока  $I$ , а следовательно, и напряженности  $H$  – магнитная индукция  $B$  достигает максимального значения (рис. 9). Затем при уменьшении напряженности ( $H$ ) поля будет уменьшаться и магнитная индукция ( $B$ ), но при одних и тех же напряженностях магнитная индукция будет большей. При  $H=0$  магнитная индукция будет иметь значение  $B_r$ , называемое **остаточной индукцией**.

При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля она достигнет значения  $H_c$ , при котором  $B=0$ . При дальнейшем увеличении тока обратного направления индуктивность достигнет точки 2 -  $B_{min}$ , и при уменьшении тока до 0 будет получена остаточная индукция. Затем при следующем изменении направления тока и напряженности поля и ее увеличении будет получена  $B_{max}$ . Явление отставания или запаздывания изменений магнитной индукции от соответствующих изменений напряженности поля называется **магнитным гистерезисом**. Кривая зависимости  $B(H)$ , получающаяся при циклическом перемагничивании ферромагнитного материала, называется **петлей гистерезиса**.

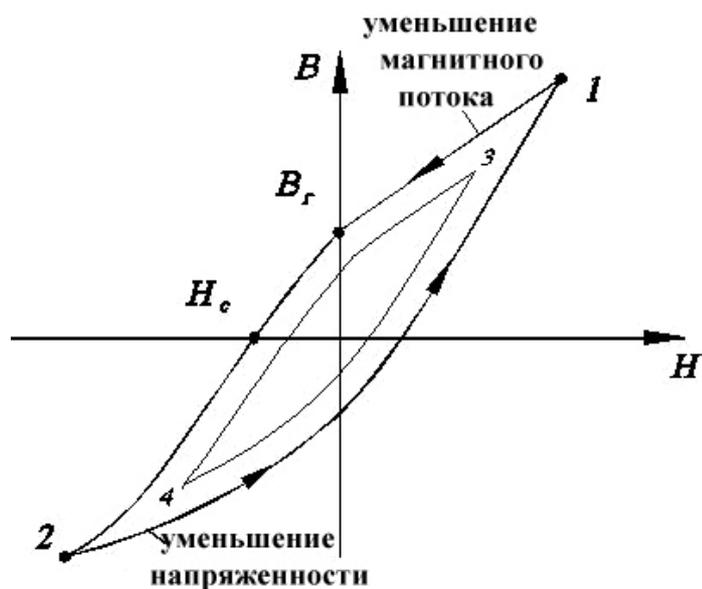


Рис. 9.  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – коэрцитивная сила; 1, 2, 3, 4 – точки насыщения

Если объединить точки 1, 2, 3, 4, то получим *основную кривую намагничивания* (рис. 10), которая похожа на кривую начального намагничивания.

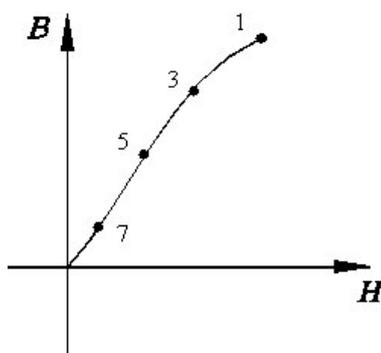


Рис. 10

Из рисунка видно, что зависимость  $B(H)$  нелинейная.

Электрические токи индуцируются в любых проводящих материалах, находящихся в переменном магнитном поле. Они называются *вихревыми токами*. Эти токи замыкаются непосредственно в проводящей массе и образуют в ней вихреобразные контуры, сцепляющиеся с индуктирующими эти токи магнитными потоками. Согласно *правилу Ленца* магнитное поле вихревых токов противодействует изменению магнитного потока. Поэтому при переменном намагничивающем токе вихревые токи обладают сильным размагничивающим действием и вызывают значительные потери энергии на нагревание сердечника. Если изменение тока происходит медленно, то петлю называют *статической петлей гистерезиса* (рис. 11).

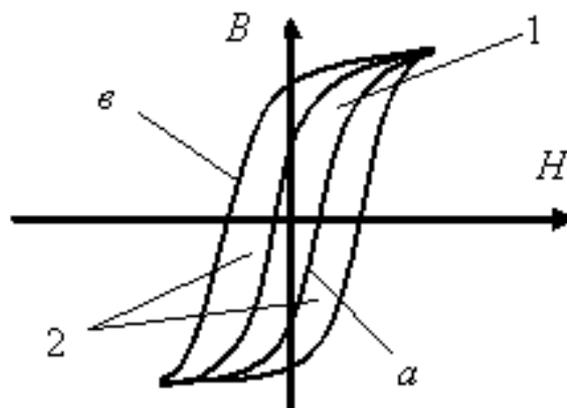


Рис. 11. Площадь 1 – потери на гистерезис за один цикл перемагничивания; площадь 2 – потери на вихревые токи за один цикл перемагничивания;  
 $a$  – статическая петля гистерезиса;  $в$  – динамическая петля гистерезиса

Работа, затраченная на перемагничивание ферромагнитного материала, пропорциональна площади, ограниченной статической петлей гистерезиса. Чем больше площадь петли, тем больше потери на перемагничивание, нагревающее металл.

Бывают частные, или локальные, петли гистерезиса. Таких петель можно получить много. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля  $H$ , описываемая замкнутой кривой  $a$ - $б$ - $в$ - $г$ - $a$  (рис. 12), называется **частной петлей гистерезиса**.

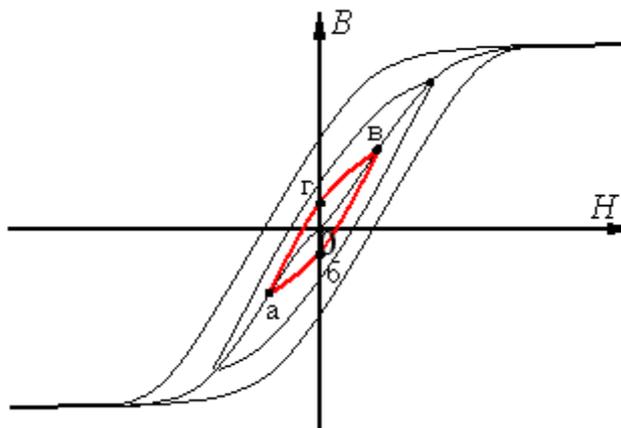


Рис. 12

В зависимости от значения коэрцитивной силы  $H_c$  все магнитные материалы делятся на магнитомягкие и магнитотвердые. Магнитомягкие материалы имеют небольшую коэрцитивную силу (круто поднимающаяся основная кривая намагничивания и относительно малая площадь петли гистерезиса). К этой группе относят электротехническую сталь, технически

чистое железо, сплавы железа и никеля (пермаллои). Применяют эти материалы при изготовлении сердечников трансформаторов, электрических машин и т.п.

Магнитотвердые материалы отличаются большой коэрцитивной силой и имеют широкую петлю гистерезиса. Из них изготавливают постоянные магниты, которые используют в качестве источников магнитного поля в магнитных системах различных электротехнических устройств.

В инженерной практике основные кривые намагничивания различных материалов (рис. 13) используются для расчета магнитных цепей.

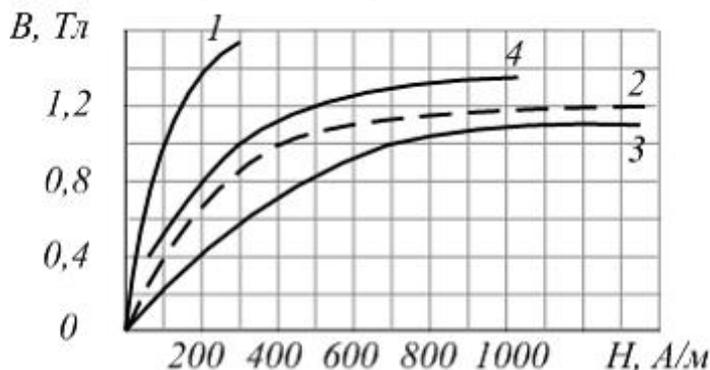


Рис. 13: 1 – сталь 3411 (холоднокатаная); 2 – 1512 (горячекатаная); 3 – литая сталь; 4 – 1410 (горячекатаная)

Тестовые задания

1. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка плотно навита на кольцевой сердечник сечением  $S=10 \text{ см}^2$  из горячекатаной (1512) стали. При  $\Phi=10^{-3} \text{ Вб}$  напряженность магнитного поля  $H$  в сердечнике равна \_\_\_\_ А/м.

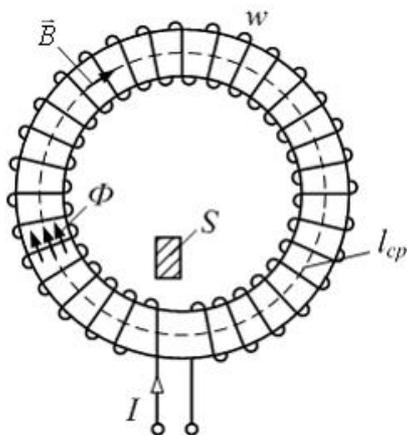


Рис. 14

Ответ: 400 А/м

*Решение:* Магнитная индукция в сердечнике  $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 1 \text{ Вб}$ . По кривой намагничивания горячекатаной стали марки 1512 (рис. 13) находим напряженность магнитного поля в сердечнике:  $H = 400 \text{ А/м}$ .

2. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка с числом витков  $W=245$  плотно навита на кольцевой сердечник из литой стали сечением  $S=10 \text{ см}^2$ . Средняя длина сердечника  $\ell=0,7 \text{ м}$ . При магнитной индукции  $B=1 \text{ Тл}$  магнитное сопротивление сердечника  $R_M$  \_\_\_\_\_ 1/Гн.

Ответ:  $490 \cdot 10^3 \text{ 1/Гн}$

*Решение:* При  $B=1$  Тл по кривой намагничивания литой стали (рис. 13) напряженность магнитного поля  $H=700$  А/м. Намагничивающая сила (МДС)  $F=H\ell_{cp}=700\cdot 0,7=490$  А. По закону Ома для магнитной цепи магнитное сопротивление  $R_M = \frac{F}{BS} = \frac{490}{1\cdot 10\cdot 10^{-4}} = 490\cdot 10^3 \frac{1}{Гн}$ .

3. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) обмотка с числом витков  $W=245$  плотно навита на кольцевой сердечник сечением  $S=10$  см<sup>2</sup> из литой стали. Средняя длина сердечника  $\ell=0,7$  м. При  $\Phi=10^{-3}$  Вб абсолютная магнитная проницаемость сердечника  $\mu_a$  равна \_\_\_\_\_ Гн/м.

Ответ: 0,0014 Гн/м

*Решение:* Магнитная индукция в сердечнике  $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{10^{-3}}{10\cdot 10^{-4}} = 1$ Тл.

По кривой намагничивания литой стали (рис. 13) напряженность магнитного поля  $H=700$  А/м. Абсолютная магнитная проницаемость сердечника -  $\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{1}{700} = 0,0014$  Гн/м.

$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{1}{700} = 0,0014 \text{ Гн/м.}$$

4. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка с числом витков  $W=245$  плотно навита на кольцевой сердечник из литой стали. Средняя длина сердечника  $\ell_{cp}=0,7$  м. При магнитной индукции  $B=1$  Тл ток в намагничивающей обмотке  $I$  равен \_\_\_\_\_ А

Ответ: 2 А

*Решение:* При  $B=1$  Тл по кривой намагничивания литой стали (рис. 13)  $H=700$  А/м. Ток в намагничивающей обмотке

$$I = \frac{H\ell_{cp}}{W} = \frac{700\cdot 0,7}{245} = 2 \text{ А.}$$

5. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) кольцевой сердечник сечением  $S=10$  см<sup>2</sup> из литой стали имеет разрез (воздушный зазор)  $\delta=0,5$  мм. Средняя длина сердечника  $\ell_{cp}=0,7$  м. При  $B=1$  Тл магнитное напряжение на воздушном зазоре  $U_{M\delta}$  равно \_\_\_\_\_ А.

Ответ: 398 А

*Решение:* При магнитной индукции в сердечнике  $B=1$  Тл магнитное напряжение на воздушном зазоре  $U_{M\delta} = \frac{B}{\mu_0} \delta = \frac{0,5\cdot 10^{-3}}{4\pi\cdot 10^{-7}} = 398$  А.

6. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) магнитодвижущая сила намагничивающей обмотки  $F=608$  А. При  $\Phi=10^{-3}$  Вб магнитное сопротивление цепи  $R_M$  равно \_\_\_\_\_ 1/Гн.

Ответ: 608·10<sup>3</sup> 1/Гн

*Решение:* По закону Ома магнитное сопротивление цепи

$$R_M = \frac{F}{\Phi} = \frac{608}{10^{-3}} = 608 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{Гн}}.$$

7. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка с числом витков  $W=245$  плотно навита на кольцевой сердечник сечением  $S=10 \text{ см}^2$  из литой стали. Средняя длина сердечника  $\ell_{cp}=0,7 \text{ м}$ . Кольцо имеет разрез (воздушный зазор)  $\delta=0,5 \text{ мм}$ . При  $B=1 \text{ Тл}$  магнитодвижущая сила (МДС) катушки  $F$  равна \_\_\_\_\_ А.

Ответ: 888 А

*Решение:* При  $B=1 \text{ Тл}$  по кривой намагничивания литой стали (рис. 13) напряженность магнитного поля  $H=700 \text{ А/м}$ . МДС намагничивающей обмотки  $F = H_c \cdot \ell_c + \frac{B}{\mu_0} \delta = 700 \cdot 0,7 + \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} 0,5 \cdot 10^{-3} = 490 + 398 = 888 \text{ А}$ .

8. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка плотно навита на кольцевой сердечник из холоднокатаной стали марки 3411 сечением  $S=10 \text{ см}^2$ . Средняя длина сердечника  $\ell_{cp}=0,7 \text{ м}$ . При магнитной индукции  $B=1 \text{ Тл}$  магнитное сопротивление сердечника  $R_M$  равно \_\_\_\_\_ Гн/м.

Ответ:  $70 \cdot 10^3 \text{ 1/Гн}$

*Решение:* При  $B=1 \text{ Тл}$  напряженность магнитного поля холоднокатаной стали марки 3411 по кривой намагничивания (рис. 13)  $H=700 \text{ А/м}$ . Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{1}{100} = 0,01 \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ . Магнитное сопротивление сердечника  $R_M = \frac{\ell_{cp}}{\mu_a S} = \frac{0,7}{0,01 \cdot 10^{-3}} = 70 \cdot 10^3 \text{ 1/Гн}$ .

9. В изображенной магнитной цепи (рис. 14) намагничивающая обмотка с числом витков  $W=245$  плотно навита на кольцевой сердечник сечением  $S=10 \text{ см}^2$  из литой стали. Кольцо имеет воздушный зазор  $\delta=0,5 \text{ мм}$ . Средняя длина сердечника  $\ell_{cp}=0,7 \text{ м}$ . При  $B=1 \text{ Тл}$  ток в намагничивающей катушке  $I$  равен \_\_\_\_\_ А.

Ответ: 3,62 А

*Решение:* При  $B=1 \text{ Тл}$  по кривой намагничивания литой стали (рис. 13) напряженность магнитного поля в сердечнике  $H_c=700 \text{ А/м}$ . Магнитодвижущая сила намагничивающей обмотки

$$F = H_c \cdot \ell_c + \frac{B}{\mu_0} \delta = 700 \cdot 0,7 + \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} 0,5 \cdot 10^{-3} = 490 + 398 = 888 \text{ А}$$

Ток в намагничивающей катушке  $I = \frac{F}{W} = \frac{888}{245} = 3,62 \text{ А}$ .

### 3. Расчет магнитных цепей

Для магнитных цепей так же, как и для электрических цепей, можно использовать 1-й и 2-й законы Кирхгофа:

$\sum \Phi = 0$  - алгебраическая сумма магнитных потоков сходящихся в одном узле (поток через замкнутую поверхность), всегда равна 0.

$\sum U_\mu = \sum WI$  - алгебраическая сумма падений магнитных напряжений в любом замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС в контуре.

Рассмотрим простейшую однородную неразветвленную магнитную цепь, у которой магнитопровод выполнен с сечением  $S$  (рис. 15).

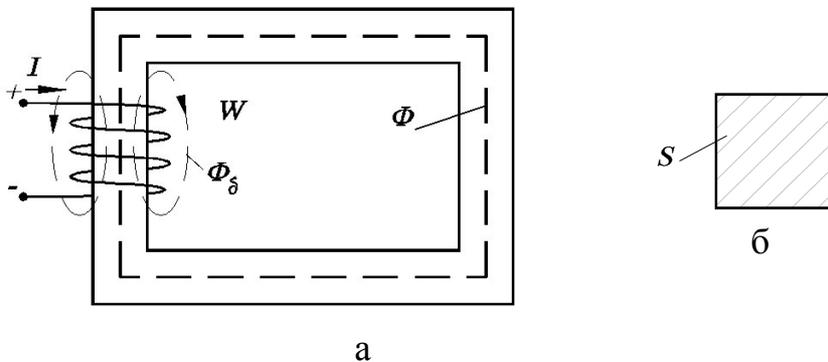


Рис. 15. а – магнитопровод; б – сечение магнитопровода

По обмотке протекает ток  $I$ , который создает постоянную магнитодвижущую силу (МДС) -  $F$ . МДС в свою очередь создает основной магнитный поток  $\Phi$  и магнитный поток рассеивания  $\Phi_\delta$ . Основной магнитный поток полностью сосредоточен в магнитопроводе. Магнитный поток рассеивания  $\Phi_\delta$  частично находится в магнитопроводе и в основном замыкается по воздуху.



Рис. 16.

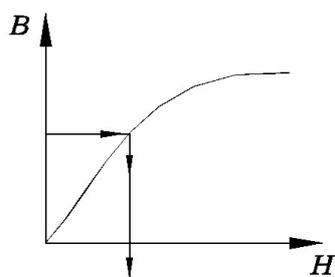
Составим схему замещения магнитной цепи (рис. 16).  
 На схеме замещения:  $U_M$  – магнитное напряжение.  
 $U_M = \Phi R_M = F$  или, учитывая закон полного тока,  
 $U_M = Hl$ .

Свойство силовых магнитных потоков – силовые линии всегда замкнуты. Также и путь магнитного потока всегда замкнут.

При одной и той же  $F$  будет  $\Phi_\delta < \Phi$ , значит,  $R_{\mu_\delta} \ll R_{\mu_{ст}}$ .

Здесь  $R_{\mu_\delta}$  - магнитное сопротивление воздуха, по которому замыкается  $\Phi_\delta$ .

В магнитных цепях с постоянной МДС поток рассеяния практически не участвует в формировании свойств электромагнитного устройства (ЭМУ), поэтому при анализе этих магнитных цепей потоком рассеяния пренебрегают и по закону полного тока проводится анализ магнитных цепей.



$$H\ell_{cp} = IW,$$

где  $\ell_{cp}$  - средняя силовая линия.

При анализе магнитных цепей решают две задачи – прямую и обратную.

1. Постановка и решение прямой задачи: по заданному магнитному потоку и геометрическим размерам магнитопровода определяется требуемое значение магнитодвижущей силы.

Дано:	$\Phi, S, \ell_{cp},$ $B=f(H)$ - основная кривая намагничивания
Найти:	$F-?, I-?$

Решение:

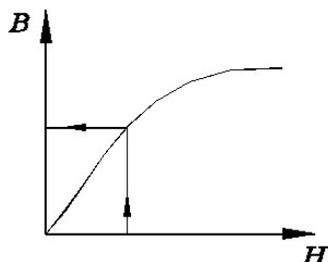
Если известен магнитный поток  $\Phi$ , то можем найти магнитную индукцию  $B = \frac{\Phi}{S}$ . А так как задана основная кривая намагничивания  $B=f(H)$ , то можно найти напряженность магнитного потока  $H$ .

Далее определяем  $H\ell_{cp} = F \Rightarrow ; F=IW$ .

2. Постановка и решение обратной задачи: по заданной магнитодвижущей силе и геометрическим размерам магнитопровода определяется магнитный поток.

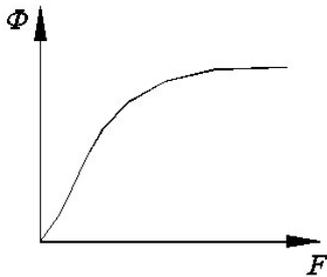
Дано:	$F, S, \ell_{cp},$ $B=f(H)$ - основная кривая намагничивания
Найти:	$\Phi-?, I-?$

Решение: Если известна  $F=IW$ , то  $H = \frac{F}{\ell_{cp}}$ .



Затем определяем по графической характеристике  $B$  и определяем величину магнитного потока:  $\Phi=BS$ .

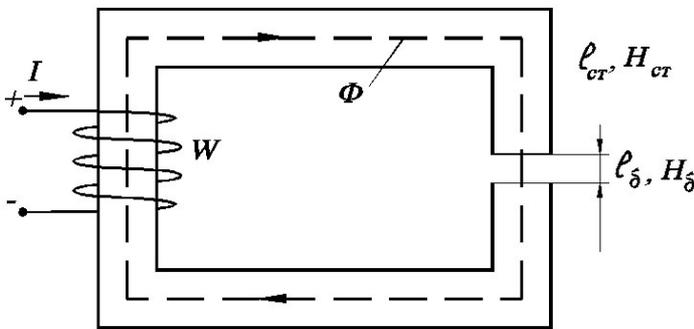
Эти задачи можно решить с помощью закона Ома для магнитных цепей: прямая задача -  $F = \Phi R_\mu$ ; обратная задача -  $\Phi = \frac{F}{R_\mu}$ .



Магнитное сопротивление  $R_\mu$  все время меняется, поэтому можно решать эти задачи с помощью вебер-амперной характеристики -  $\Phi = f(F)$  (рис. 17).

Рис. 17

Рассмотрим неоднородную неразветвленную магнитную цепь (рис. 18).



В этом случае потоком рассеяния пренебрегаем.

$$l_{ср} = l_{ст} + l_\delta$$

$S_\delta$  - сечение воздушного зазора.

$S_\delta = S_{ст}$ , считаем, что и равны магнитные индукции воздушного зазора и сердечника:

Рис. 18

$$B_\delta = B_{ст} = \frac{\Phi}{S_\delta} = \frac{\Phi}{S_{ст}}$$

Здесь также применяется закон полного тока для магнитной цепи:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = IW$$

Упростим левую часть уравнения, так как угол  $\alpha=0$ .

Разделим интеграл на две части:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_l \vec{H}_{ст} d\vec{l} + \int_{l_\delta} \vec{H}_\delta d\vec{l} = H_{ст} l_{ст} + H_\delta l_\delta$$

$$H_{ст} l_{ст} + H_\delta l_\delta = IW - \text{закон полного тока для неоднородной магнитной цепи.}$$

Составим схему замещения неразветвленной, неоднородной магнитной цепи (рис. 19).

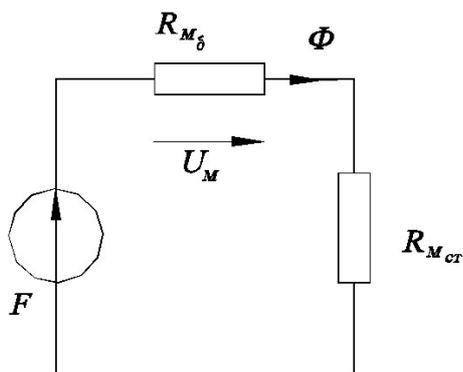


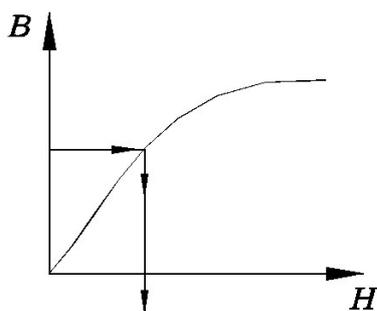
Рис. 19

В этом случае также решаются прямая и обратная задачи.

1. Постановка и решение прямой задачи.

Дано:	$\Phi, \ell_{cp}, \ell_{\delta}, S$ $B=f(H)$ - основная кривая намагничивания
Найти:	$F$ -?

Решение:



Если известен магнитный поток  $\Phi$ , то можно определить магнитную индукцию

$$B \rightarrow B_{ст} = B_{\delta} = \Phi/S \rightarrow H_{ст} \rightarrow H_{ст}\ell_{ст}.$$

Для определения напряженности воздушного зазора  $H_{\delta}$  вспомним:

$\mu_a = \mu_{r\delta} \mu_0 = \mu_0$  - а это величина постоянная, где  $\mu_a$  - абсолютная проницаемость среды,

поэтому  $\mu_{r\delta} = 1$ .

Магнитная индукция определяется по формуле:  $B = \mu_a H$ , тогда напряженность определяем:

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \Rightarrow H_{\delta} \ell_{\delta}.$$

Затем по закону полного тока для неоднородной магнитной цепи находим  $F$ :

$$H_{ст} \ell_{ст} + H_{\delta} \ell_{\delta} = IW = F.$$

2. Постановка и решение обратной задачи.

Дано:	$F, S, \ell_{ст}, \ell_{\delta}$ $B=f(H)$ - основная кривая намагничивания
Найти:	$\Phi$ -?

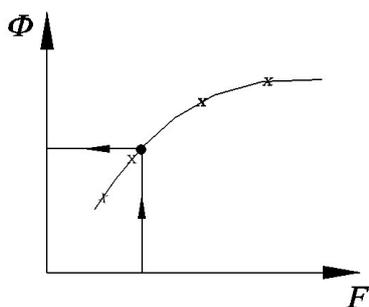


Рис. 20

Решение:

Магнитный поток определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{F}{R_{\mu}}$$

Обратная задача решается с помощью вебер-амперной характеристики магнитной цепи, которая строится путем многократного решения прямой задачи (рис. 20).

На рисунке x – количество решений прямой задачи, по которым определяют точки при различных значениях магнитодвижущей силы (МДС).

Закон Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{F}{R_{M\delta} + R_{MCT}};$$

$$R_{M\delta} \gg R_{MCT}.$$

При решении задач также используют 2-й закон Кирхгофа:  $F = U_{M\delta} + U_{MCT}$  или  $F = \Phi R_{M\delta} + \Phi R_{MCT}$ . Магнитное сопротивление  $R_{MCT}$  все время меняется, поэтому формула может быть использована только для качественной оценки магнитного потока, а не количественной.

$$R_{MCT} = \frac{\ell_{CT}}{\mu_{aCT} S_{CT}}; \quad R_{M\delta} = \frac{\ell_{\delta}}{\mu_0 S_{\delta}}.$$

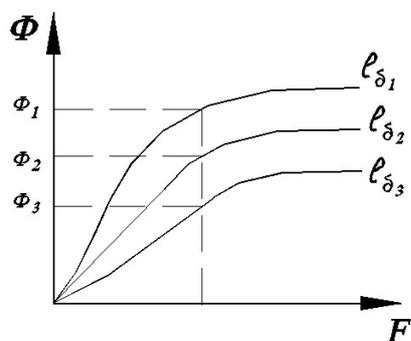
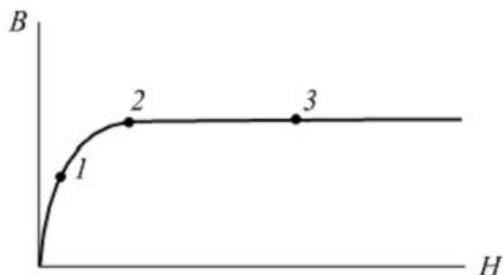


Рис. 21

Приведем ряд вебер-амперных характеристик при различных воздушных зазорах (чем больше зазор, тем кривая ниже, т.е. и магнитный поток меньше):  $\ell_{\delta 3} > \ell_{\delta 2} > \ell_{\delta 1}$ . В зависимости от величины воздушного зазора меняется вебер-амперная характеристика (рис. 21).

### 3.1. Магнитные цепи с постоянными магнитными потоками



Тестовые задания

1. Между абсолютными магнитными проницаемостями в точках 1, 2 и 3 кривой намагничивания магнитопровода (см. рис.) справедливо соотношение ...

Ответ:  $\mu_{a2} > \mu_{a3}$

*Решение:* Абсолютной магнитной проницаемостью называют отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля:  $\mu_a = B/H$ .  
 $\mu_{a2} > \mu_{a3}$ .

2. В воздушном зазоре  $\delta = 0,5 \text{ мм}$  кольцевого магнитопровода ( $\mu_r = \infty$ ) катушки требуется получить индукцию  $B_0 = 1,256 \text{ Тл}$ . При числе витков в катушке  $W=1000$  ток  $I$  в катушке равен \_\_\_\_ А.

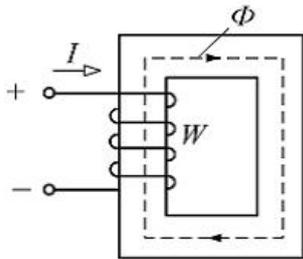
Ответ: 0,5 А

*Решение:* Так как относительная магнитная проницаемость сердечника  $\mu_r = \infty$ , то напряженность магнитного поля в нем  $H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = 0$ . По закону

полного тока  $H_0 \delta = WI$ . В намагничивающей катушке ток

$$I = \frac{H_0 \delta}{W} = \frac{B_0 \delta}{\mu_0 W} = \frac{1,256 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000} = 0,5 \text{ А}.$$

3. Если в катушке с числом витков  $W=200$  ток  $I=2 \text{ А}$  магнитный поток в сердечнике  $\Phi = 10 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ , то индуктивность катушки  $L$  равна \_\_\_\_ Гн.



Ответ: 0,1 Гн

*Решение:* Индуктивность катушки

$$L = W\Phi / I = 200 \cdot 10 \cdot 10^{-4} / 2 = 0,1 \text{ Гн}.$$

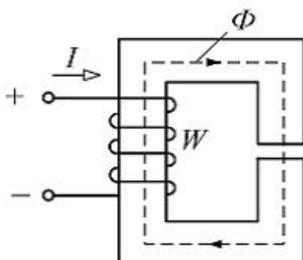
4. Сердечник электромагнитного устройства постоянного тока выполнен из электротехнической стали с заданной зависимостью  $B(H)$ . Если длина средней линии сердечника  $\ell_{cp}$ , а площадь поперечного сечения  $S$ , то магнитное сопротивление  $R_M$  сердечника равно ...

Ответ:  $R_M = \frac{\ell_{cp} H}{BS}$

*Решение:* Магнитное сопротивление  $R_M = \frac{\ell_{cp}}{\mu_0 \mu_r S} = \frac{\ell_{cp}}{\frac{B}{H} S} = \frac{\ell_{cp} H}{BS}$ .

5. Магнитное сопротивление магнитопровода равно магнитному сопротивлению воздушного зазора. Если при неизменной индукции увеличить длину зазора в 2 раза, то ток в обмотке ...

Ответ: увеличится в 1,5 раза



*Решение:* Если магнитное сопротивление  $R_{MC}$  магнитопровода равно магнитному сопротивлению  $R_\delta$  воздушного зазора, то магнитное сопротивление всей цепи  $R_M = R_{MC} + R_\delta = 2R_{MC}$ . При увеличении длины зазора в 2 раза его магнитное сопротивление

также увеличится в 2 раза, а  $R_M = R_{MC} + 2R_{MC} = 3R_{MC}$  увеличится в 1,5 раза. Так как  $WI = R_M \Phi = R_M BS$ , то при неизменной индукции  $B$  при увеличении  $R_M$  в 1,5 раза ток  $I$  в обмотке увеличится в 1,5 раза.

6. Если в катушке (см. рис. в 5-м вопросе) с числом витков  $W=200$  ток  $I=2A$  магнитный поток в сердечнике  $\Phi=10 \cdot 10^{-4} Bб$ , то магнитное сопротивление магнитопровода с зазором равно \_\_\_\_\_  $1/Гн$ .

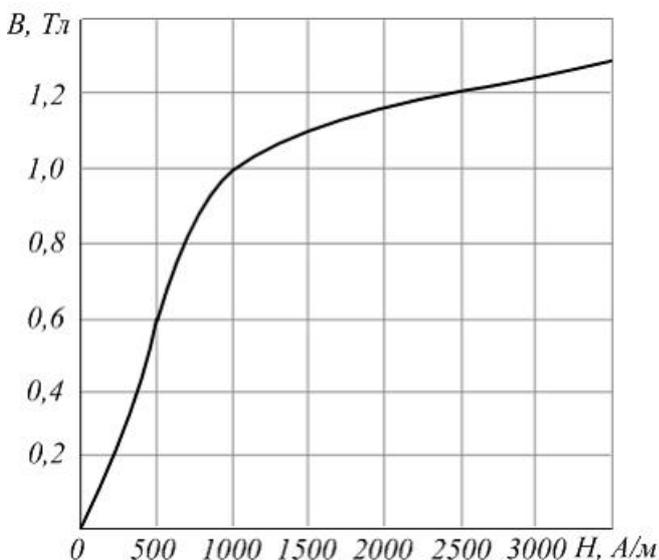
Ответ:  $4 \cdot 10^5 1/Гн$

*Решение:* Магнитное сопротивление магнитопровода с зазором

$$R_M = WI / \Phi = 200 \cdot 2 / 10 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^5 \frac{1}{Гн}$$

7. Кольцевой сердечник из электротехнической стали с заданной кривой намагничивания имеет воздушный зазор. Напряженность магнитного поля в стали  $H_{cm}=1000 A/м$ . Напряженность магнитного поля в зазоре  $H_\delta$  равна \_\_\_\_\_  $A/м$ .

Ответ:  $8 \cdot 10^5 A/м$



*Решение:* По кривой намагничивания находим магнитную индукцию в стали  $B_{cm}=1Тл$ . Считаем, что магнитная индукция в зазоре  $B_\delta = B_{cm} = 1Тл$ . Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = 8 \cdot 10^5 B_\delta = 8 \cdot 10^5 \frac{A}{м}$$

8. Обмотка с числом витков  $W=200$  намотана на ферромагнитный сердечник с заданной кривой намагничивания (см. рис. в вопросе 7). Если длина средней линии  $\ell=40 см$  магнитная индукция в сердечнике  $B=1,2 Тл$ , то ток  $I$  в обмотке равен \_\_\_\_\_  $A$ .

Ответ:  $5 A$

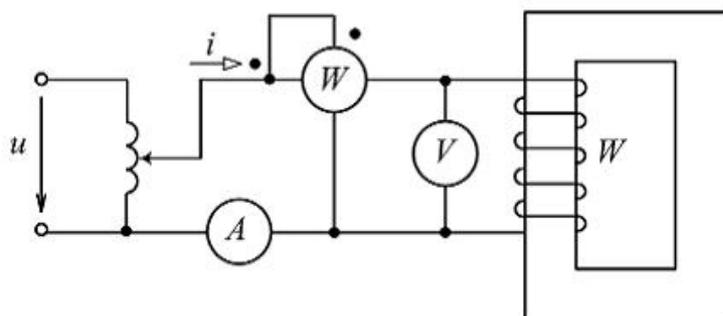
*Решение:* По кривой намагничивания при  $B=1,2 Тл$  находим напряженность магнитного поля  $H=2500 A/м$ . По закону полного тока  $H\ell=WI$ . Отсюда ток в

$$\text{обмотке } I = \frac{H\ell}{W} = \frac{2500 \cdot 40 \cdot 10^{-2}}{200} = 5 A$$

### 3.2. Магнитные цепи с переменными магнитными потоками

#### Тестовые задания

1. Если известны показания приборов  $P_w, I, U$ , а также масса  $G$  сердечника и активное сопротивление  $R_k$  обмотки, то удельные потери  $p_0$  ( $Вт/кг$ ) в сердечнике равны ...



Решение:

Удельные потери в сердечнике  $p_0 = \frac{P_W - R_k I^2}{G}$ .

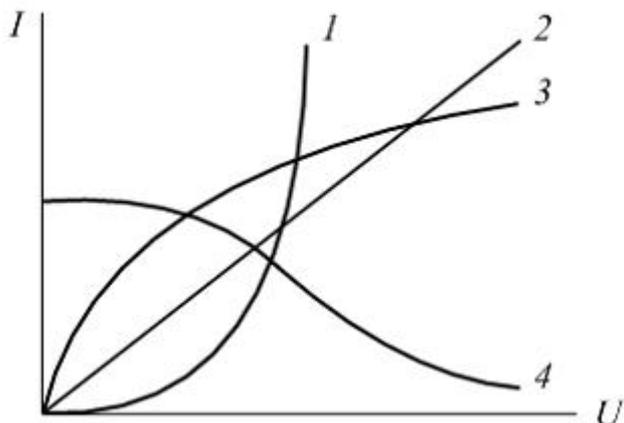
2. Если известны показания приборов  $P_W$ ,  $I$ ,  $U$ , а также активное сопротивление  $R_k$  обмотки, то мощность  $P_0$  магнитных потерь в сердечнике равна ...

Решение: Мощность потерь в сердечнике  $P_0 = P_W - R_k I^2$ .

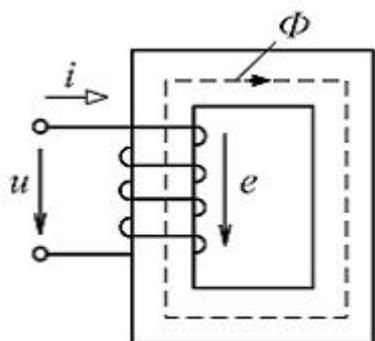
3. При подключении идеализированной катушки с магнитопроводом к источнику синусоидального напряжения **несинусоидальным** оказывается ...

Решение: При синусоидальном напряжении на обмотке **ток** оказывается **несинусоидальным**.

4. Вольт-амперная характеристика обмотки с магнитопроводом изображена под номером ...



Решение: Вольт-амперная характеристика обмотки с магнитопроводом изображена под номером 1.

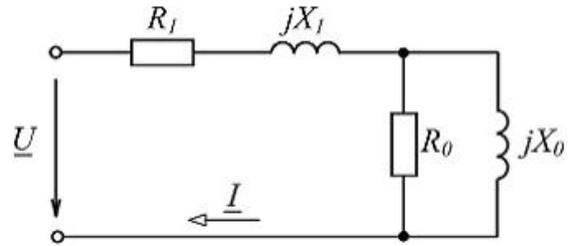


5. В идеализированной магнитной цепи при  $u = 220 \sin \omega t$  В действующее значение ЭДС самоиндукции равно \_\_\_ В.

Решение: Идеализированная магнитная цепь описывается уравнением  $u = -e$ . ЭДС  $e = -220 \sin \omega t$ , ее действующее значение

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{220}{\sqrt{2}} \approx 156 \text{ В.}$$

6. В изображенной на рисунке схеме замещения обмотки с магнитопроводом резистивный элемент учитывает потери мощности в магнитопроводе.



7. Если на обмотке идеализированной катушки с ферромагнитным сердечником напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ , то начальная фаза магнитного потока  $\Phi$  равна...

*Решение:* Магнитный поток  $\Phi$  отстает по фазе от напряжения  $U$  на угол  $\frac{\pi}{2}$  (рад). Следовательно, при начальной фазе напряжения  $\psi_u = 0$  начальная фаза магнитного потока  $\psi_\phi = -\frac{\pi}{2}$  (рад).

8. В идеализированной индуктивной катушке с ферромагнитным магнитопроводом при  $u = U_m \sin \omega t$  амплитуда магнитного потока  $\Phi_m$  **не зависит** от ...

*Решение:* Амплитуда  $\Phi_m$  магнитного потока определяется только амплитудой напряжения, частотой и числом витков обмотки:  $\Phi_m = \frac{U_m}{\omega W}$ .

## Рекомендуемая литература

1. Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова. / Кн. 1. Электрические и магнитные цепи. – М.:Высшая шк. – 1996 г.
2. Электротехника и электроника в 3-х кн. Под ред. В.Г. Герасимова. / Кн. 2. Электромагнитные устройства и электрические машины. – М.: Высшая шк. – 1997 г.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: Учебное пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 440 с., ил.

## Содержание

Введение .....	3
1. Основные понятия теории электромагнитного поля и основные магнитные величины.....	3
2. Свойства ферромагнитных материалов. Определения, классификация, законы магнитных цепей .....	15
3. Расчет магнитных цепей .....	22
3.1. Магнитные цепи с постоянными магнитными потоками .....	26
3.2. Магнитные цепи с переменными магнитными потоками .....	28
Рекомендуемая литература.....	31



О.Б. Пушкарева  
Н.Р. Шабалина  
Н.А. Башко

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Екатеринбург  
2013