

# Лекция 10

## Модуль II.

# Магнитные цепи и электромагнитные устройства

## Магнитные цепи

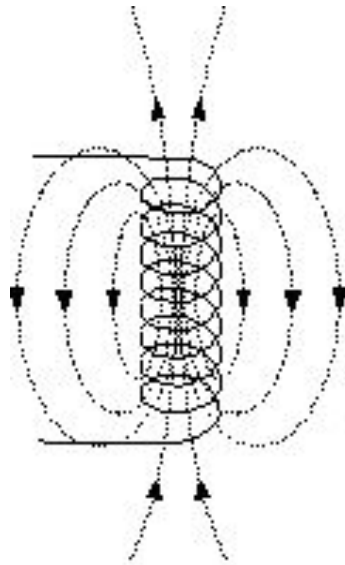
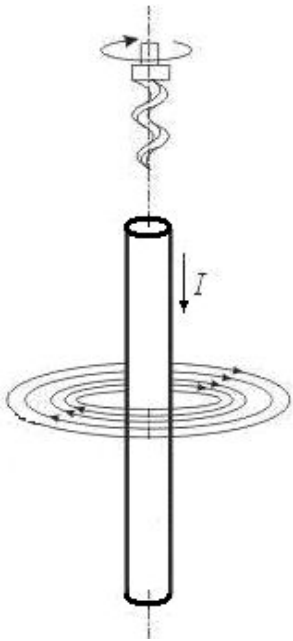


# Содержание

1. Основные понятия
2. Свойства ферромагнитных материалов
3. Закон полного тока и закон Ома  
для магнитных цепей
4. Расчет и анализ магнитных цепей

# 1. Основные понятия.

- В основе принципа действия большинства электромагнитных устройств и электромеханических преобразователей энергии лежит взаимодействие магнитного поля и движущихся электрических зарядов (электрического тока).
- Магнитное поле может быть определенным образом распределено в пространстве и обладать разной интенсивностью.

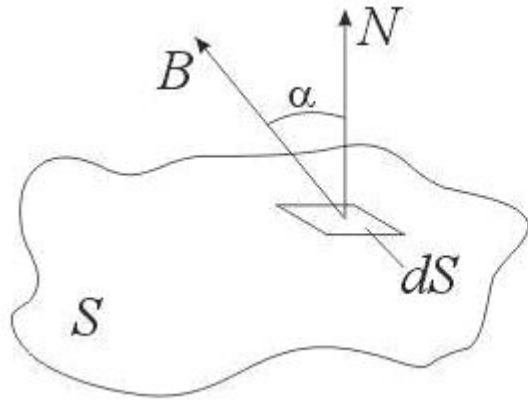


- Графическое изображение магнитного поля силовыми линиями отражает распределение магнитного поля в пространстве и его интенсивность.
- Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правоходового винта (буравчика)

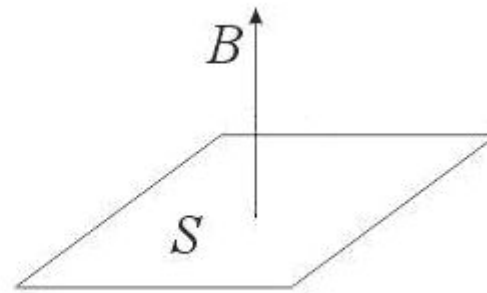


## Характеристики магнитного поля

- Магнитная индукция  $B$  (Тл)
  - Напряженность магнитного поля  $H$  (А/м)
  - Магнитная проницаемость среды  $\mu_a$  (Гн/м)
- }  $B = \mu_a H$
- Магнитный поток  $\Phi$  (Вб)



$$\Phi = \int_S B_n ds = \int_S B \cos \alpha ds$$



$$\Phi = B S.$$

Магнитная индукция - плотность магнитного потока:  $B = \Phi / S$

## Проявления магнитного поля

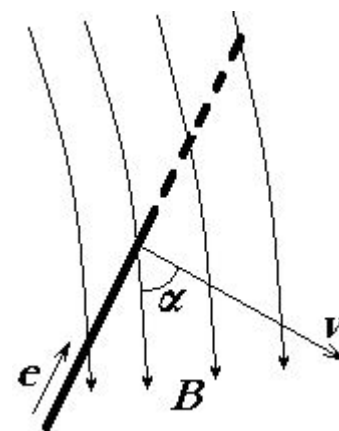
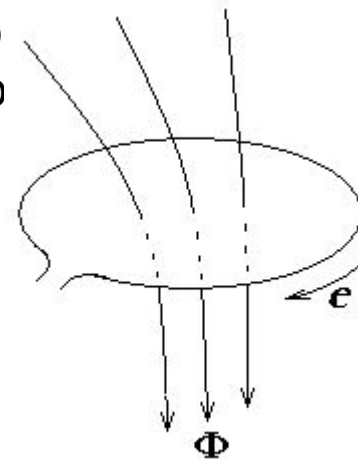
### Индукционное действие - электромагнитная индукция

- При изменении магнитного потока, пронизывающего контур, находящийся в магнитном поле, в этом контуре индуцируется ЭДС

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

- В проводнике, движущемся в магнитном поле, индуцируется ЭДС

$$e = B \cdot l_{\text{пр}} \cdot v \cdot \sin \alpha$$

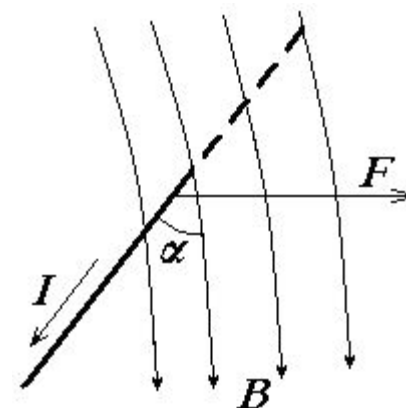


## Проявления магнитного поля (продолжение)

**Силовое действие** магнитного поля:

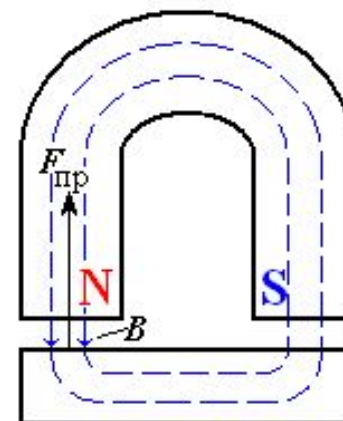
- На электрический проводник с током, помещенный в магнитное поле действует электромагнитная сила

$$F = B \cdot I \cdot l_{\text{пр}} \sin \alpha$$



- Ферромагнитные элементы втягиваются в магнитное поле

$$F_{\text{пр}} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} S$$



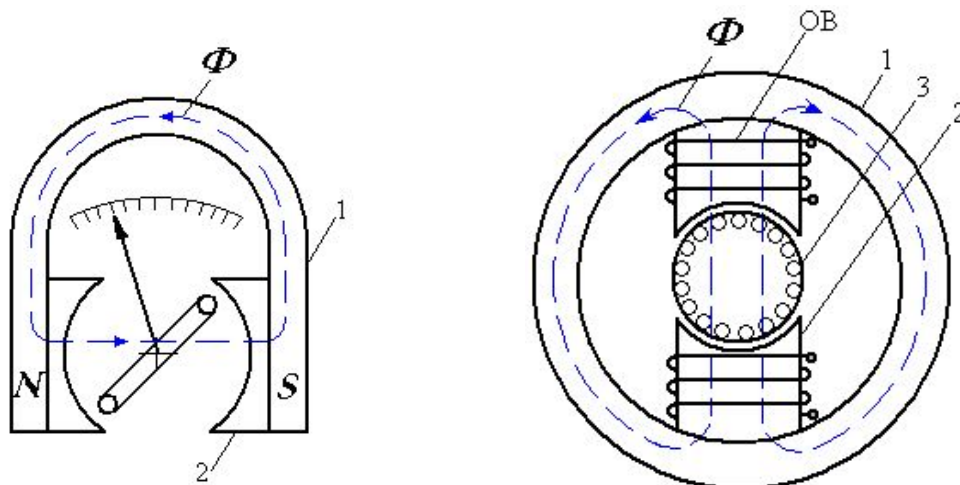
## **Магнитная цепь -**

часть конструкции, предназначенная для создания магнитного поля определенной конфигурации (распределение в пространстве) и необходимой интенсивности.

**Магнитная  
цепь**

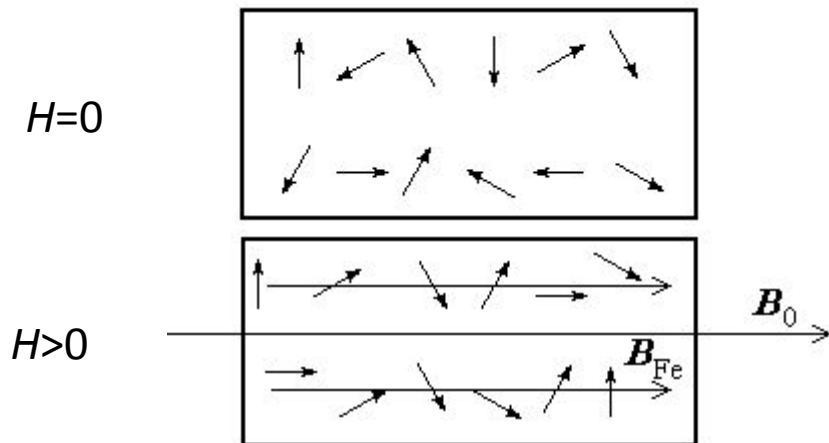
**Источник магнитного поля**  
(электрическая обмотка с током  
или постоянный магнит)

**Магнитопровод**  
(ферромагнитный элемент конструкции магнитной цепи,  
обеспечивающий замыкание магнитного потока)



## 2. Свойства ферромагнитных материалов

- *Способность усиливать магнитное поле*

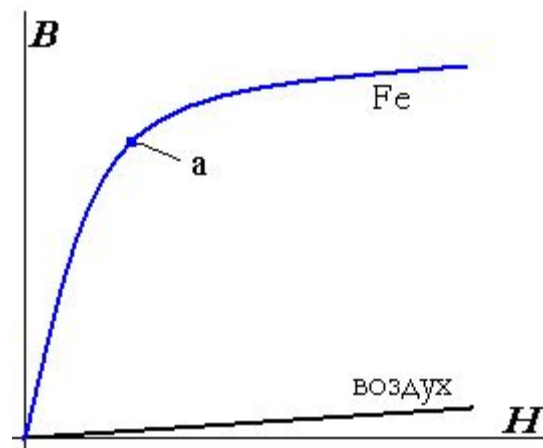
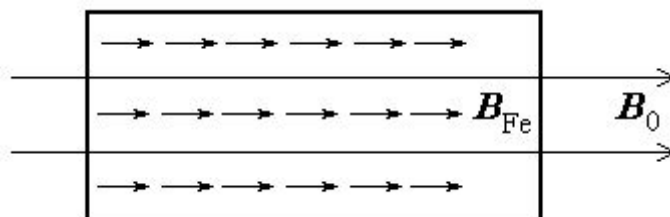


$$B_{Fe} = \mu \cdot B_0 = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$$

относительная магнитная проницаемость

$$\mu = 10 \div 10000$$

- *Нелинейность (насыщение)*

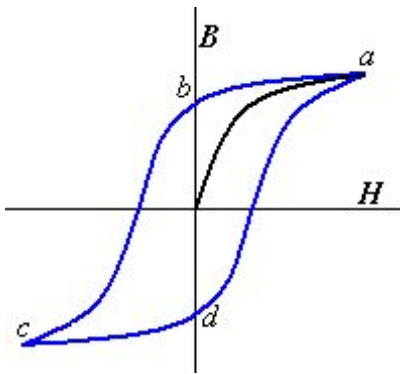


*Кривая намагничивания ферромагнитного материала*

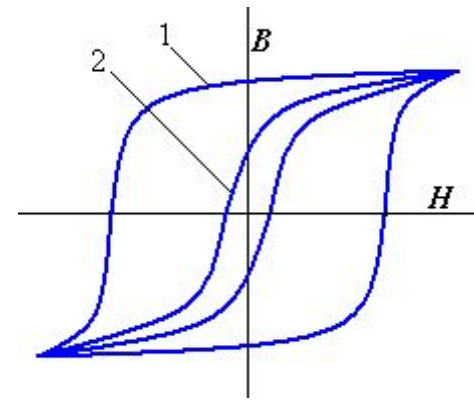


## 2. Свойства ферромагнитных материалов (продолжение)

- *гистерезис*



**Петля гистерезиса  
ферромагнитного материала**

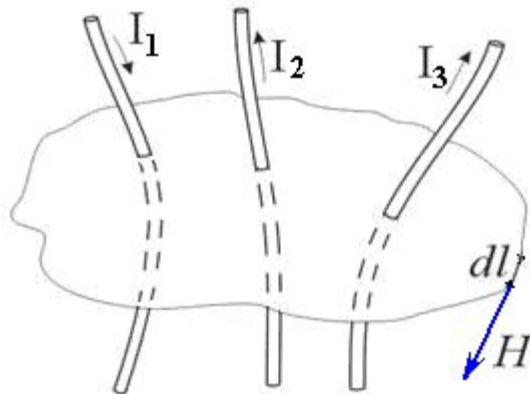


**Петля гистерезиса магнито жесткого (1) и  
магнитомягкого (2) материалов**

### 3. Закон полного тока

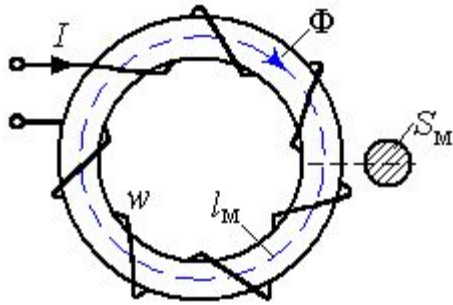
Интеграл вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов (полному току), охватываемых этим контуром

$$\oint_l H dl = \sum I$$



$$\oint_l H dl = I_1 - I_2 - I_3$$

## Соотношение тока в обмотке $I$ и магнитного потока в магнитопроводе $\Phi$



$$H \cdot l_M = I \cdot w \quad \longrightarrow \quad H = \frac{Iw}{l_M}$$

$$\Phi = BS_M = \mu_0 \mu H S_M = \mu_0 \mu \frac{Iw}{l_M} S_M$$

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{\left( \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_M}{S_M} \right)}$$

**Закон Ома  
для магнитной цепи :**

$$\Phi = \frac{F}{R_M}$$

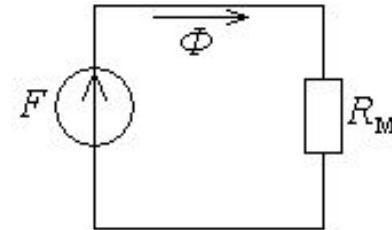
**магнитодвижущая сила (МДС)  $F$  :**

$$F = I \cdot w$$

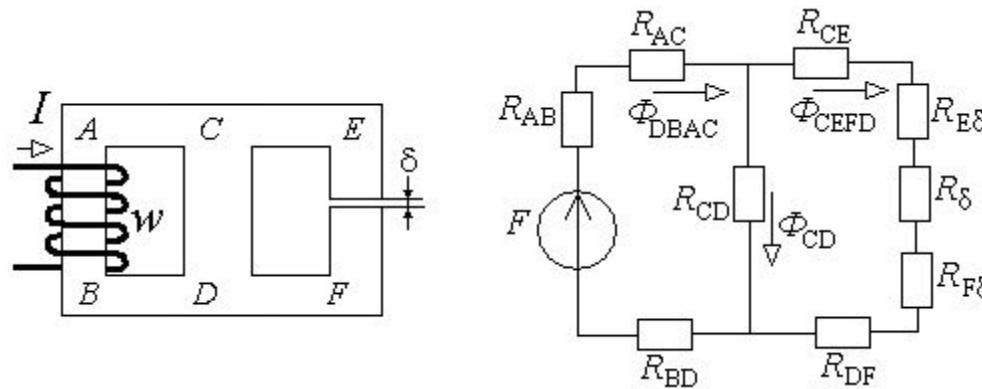
**магнитное сопротивление  $R_M$  :**

$$R_M = \frac{l_M}{\mu_0 \mu S_M}$$

**Магнитная схема замещения :**



## Схема замещения разветвленной неоднородной магнитной цепи



Магнитное напряжение  $U_M$  :  $U_M = \Phi \cdot R_M$

Законы Кирхгофа в магнитной цепи :  $\sum \Phi = 0$   
 $\sum U_M = \sum F$

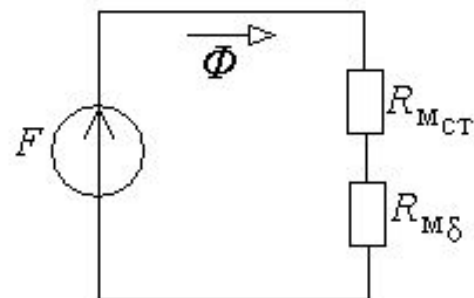
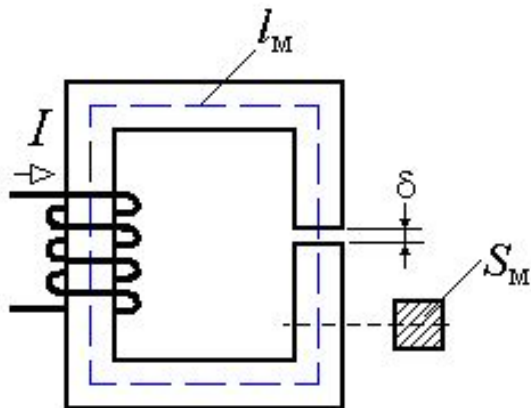
## 4. Расчет и анализ магнитных цепей

**Прямая задача** – по заданному значению магнитного потока определить МДС и ток в электрической обмотке ( $\Phi \rightarrow Iw$ )

**Обратная задача** – по заданной МДС необходимо рассчитать магнитный поток ( $Iw \rightarrow \Phi$ )

**Расчет магнитной цепи может выполняться с использованием магнитной схемы замещения, либо непосредственным применением закона полного тока**

#### 4. Расчет и анализ магнитных цепей (продолжение)



$$l_M = 0,4 \text{ м}$$

$$S_M = 0,0004 \text{ м}^2$$

$$\delta = 0,001 \text{ м}$$

$$\mu = 500$$

$$w = 900$$

$$B = 0,8 \text{ Тл}$$

---


$$I = ?$$

$$R_{M_{ст}} = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_M}{S_M} = \frac{1}{500 \cdot 4\pi 10^{-7}} \cdot \frac{0,4}{0,0004} = 1592 \cdot 10^3 \text{ Сименс}$$

$$R_{M_{\delta}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{S_M} = \frac{1}{4\pi 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{0,0004} = 1990 \cdot 10^3 \text{ Сименс}$$

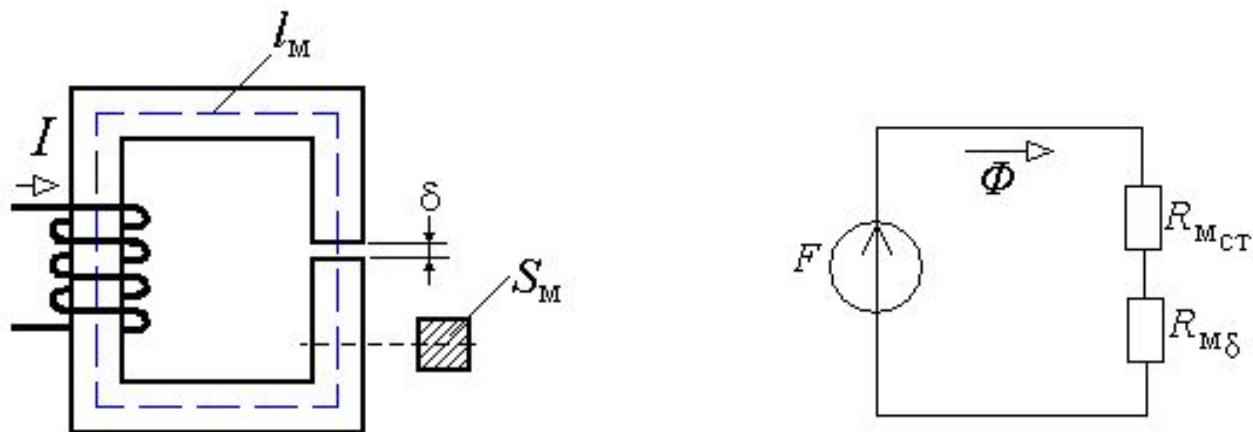
$$\Phi = B \cdot S_M = 0,8 \cdot 0,0004 = 32 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$$

$$F = \Phi \cdot (R_{M_{ст}} + R_{M_{\delta}}) = 32 \cdot 10^{-5} \cdot (1592 + 1990) \cdot 10^3 = 1146,2 \text{ А}$$

$$I = \frac{F}{w} = \frac{1146,2}{900} = 1,274 \text{ А}$$

#### 4. Расчет и анализ магнитных цепей (продолжение)

*Влияние воздушного зазора в магнитопроводе на работу магнитных цепей*



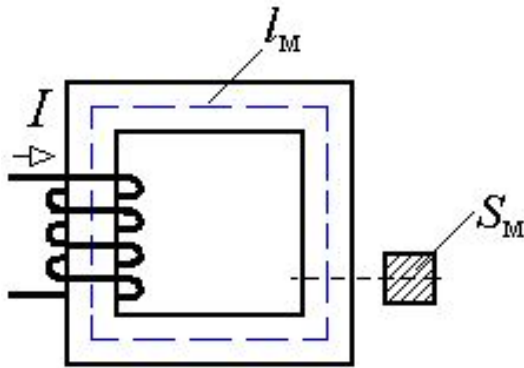
$$R_{MCT} = 1592 \cdot 10^3 \text{ Сименс}$$

$$R_{M\delta} = 1990 \cdot 10^3 \text{ Сименс}$$

**Незначительный воздушный зазор в магнитопроводе существенно увеличивает магнитное сопротивление магнитной цепи. Это уменьшает магнитный поток, либо требует большего тока в обмотке для создания необходимого магнитного потока.**

#### 4. Расчет и анализ магнитных цепей (продолжение)

Использование закона полного тока при учете нелинейных свойств материала магнитопровода



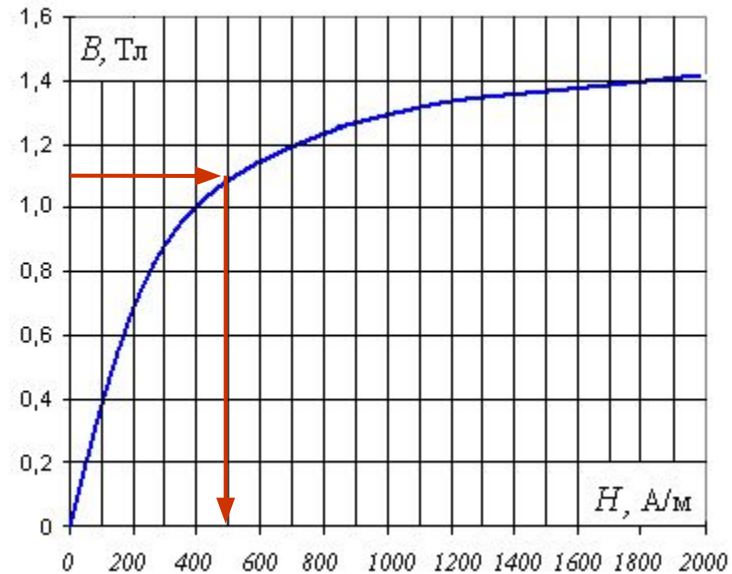
$$l_M = 0,8 \text{ м}$$

$$S_M = 0,0025 \text{ м}^2$$

$$w = 100$$

$$\Phi = 275 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$$

$$I = ?$$



$$B = \frac{\Phi}{S_M} = \frac{275 \cdot 10^{-5}}{0,0025} = 1,1 \text{ Тл} \quad \rightarrow \quad H = 500 \text{ А/м}$$

Из закона полного тока: 
$$I = \frac{H \cdot l_M}{w} = \frac{500 \cdot 0,8}{100} = 4,0 \text{ А}$$



## Заключение

1. В основе работы электромагнитных устройств лежат проявления магнитного поля (*индукционное и силовое действие*). Работа электромагнитных устройств (трансформаторов, электрических машин, электромагнитных и электромеханических преобразователей) основана на проявлениях магнитного поля.
2. *Индукционное действие* (явление электромагнитной индукции) магнитного поля проявляется в том, что в электрическом контуре, находящемся в переменном магнитном поле, или в проводнике, который движется в магнитном поле, наводится электродвижущая сила (ЭДС).
3. *Силовое действие* магнитного поля проявляется в том, что на электрический проводник с током, помещенный в магнитное поле действует электромагнитная сила. Силовое действие магнитного поля проявляется также в создании силы притяжения ферромагнитных материалов к магнитам.

## Заключение (продолжение)

4. *Магнитная цепь* - часть конструкции электромагнитного устройства, предназначенная для создания магнитного поля определенной конфигурации (распределение в пространстве) и необходимой интенсивности.
5. Любая магнитная цепь состоит из двух основных частей: источник магнитного поля и магнитопровод. *Источник магнитного поля* – электрическая обмотка с током или постоянный магнит. *Магнитопровод* – ферромагнитный сердечник, обеспечивающий замыкание магнитного потока.
6. Свойства ферромагнитных материалов, определяющие работу магнитных цепей: *большая относительная магнитная проницаемость* (малое магнитное сопротивление); *нелинейная зависимость* магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ ; *гистерезис* (отставание изменения индукции магнитного поля при изменении напряженности).

## Заключение (продолжение)

7. Основным законом, используемым при расчетах магнитных цепей, является *закон полного тока*. Закон полного тока позволяет сформулировать *закон Ома* для магнитной цепи и использовать аналогию магнитной и электрической цепей для расчета и анализа магнитных цепей.

8. На работу магнитной цепи существенное влияние оказывают воздушные зазоры в магнитопроводе, создающие большое магнитное сопротивление магнитному потоку.

# Контрольные вопросы

## **Магнитная цепь это:**

- Часть электротехнического устройства, предназначенная для создания магнитного поля определенной конфигурации и интенсивности.
- Совокупность электромагнитов, соединенных электрическими проводниками.
- Совокупность устройств, предназначенных для преобразования электрической энергии, соединенных между собой электрическими проводниками.

## **Основные элементы магнитной цепи:**

- Источник магнитного поля (постоянный магнит, электрическая обмотка) и магитопровод.
- Электрические обмотки, соединенные между собой электрическими проводниками.
- Электромагнитные устройства, соединенные между собой электрическими проводниками.

## **Свойство ферромагнитных материалов, определяющее их применение для магнитопроводов в магнитных цепях:**

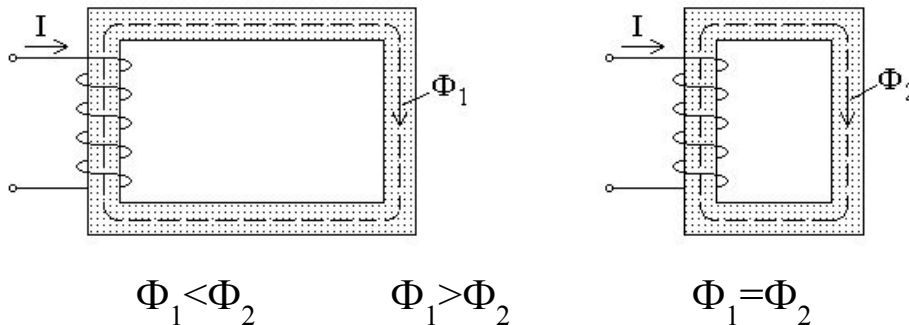
- Высокая магнитная проницаемость.
- Низкая электропроводность.
- Низкая стоимость.

# Контрольные вопросы

## Магнитопровод в магнитной цепи это:

- Сердечник из ферромагнитного материала, предназначенный для замыкания магнитного потока.
- Проводник, соединяющий электрические обмотки в магнитной цепи.
- Устройство, используемое в качестве источника магнитного поля.

## В какой магнитной цепи создается больший магнитный поток при одинаковой МДС обмотки:

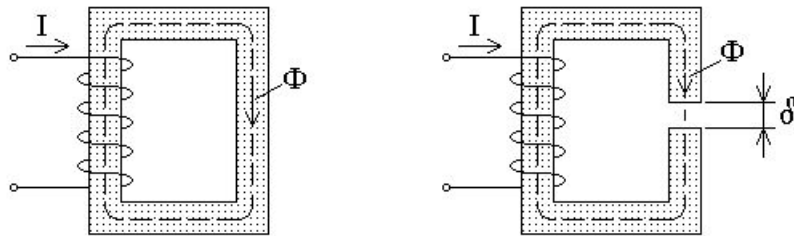


## Закон Ома для магнитной цепи:

- Магнитный поток пропорционален МДС обмотки и обратнопропорционален магнитному сопротивлению магнитопровода.
- Магнитный поток пропорционален МДС обмотки и магнитному сопротивлению магнитопровода.
- Магнитный поток пропорционален магнитному сопротивлению магнитопровода и обратнопропорционален току в обмотке.

## Контрольные вопросы

**Как изменится магнитный поток  $\Phi$  при создании в магнитопроводе воздушного зазора  $\delta$  при неизменной МДС обмотки?**



- 1) Уменьшится    2) Увеличится    3) Не изменится

**Что такое магнитодвижущая сила (МДС) обмотки в магнитной цепи?**

- Произведение тока в обмотке на число витков обмотки:  $F = I * w$ .
- Произведение числа витков обмотки на магнитный поток:  $F = w * \Phi$ .
- Произведение тока в обмотке на магнитный поток:  $F = I * \Phi$ .

**Как изменится магнитное сопротивление магнитопровода при создании в нем воздушного зазора  $\delta$ ?**

- 1) Уменьшится    2) Увеличится    3) Не изменится