

Московский государственный строительный
университет



Кафедра электротехники и электропривода

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. Электрические и магнитные цепи. Электрические измерения

Лекция 7. Электромагнетизм и магнитные цепи

Электронные лекции

Составитель:

профессор И.Г. Забора

Москва – 2014 г.

Лекцию читает

**профессор кафедры «Электротехника и
электропривод» МГСУ**

Забора Игорь Георгиевич

E-mail: izabora@yandex.ru

Электромагнетизм. Магнитные цепи

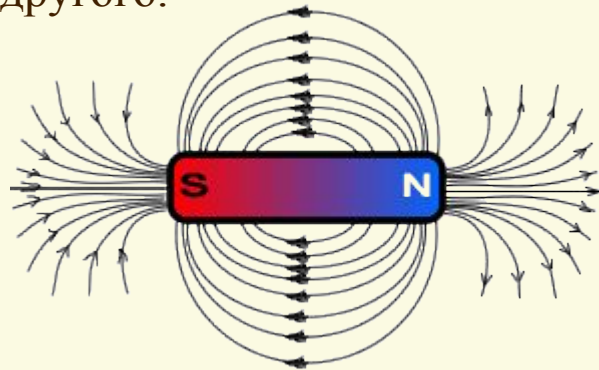


Определения и основные характеристики магнитного поля

Вокруг всякого намагниченного тела возникает магнитное поле, являющееся материальной средой, обладающей определенной энергией и в которой обнаруживается действие магнитных сил.

На рисунках магнитное поле изображается в виде магнитных силовых линий, направленных от северного полюса **N** к южному **S**.

Любая магнитная линия не имеет ни конца, ни начала и представляет собой замкнутую кривую, также как северный и южный полюсы магнита неотделимы один от другого.



В зависимости от принципа действия электротехнического устройства *магнитное поле может возбуждаться либо постоянным магнитом, либо катушкой с током*, расположенной в той или иной части магнитной цепи.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Магнитное поле электрического тока

Вокруг проводника с током I всегда образуется магнитное поле с плотностью магнитного потока Φ , которая называется *магнитной индукцией* B .

Магнитный поток Φ в пространстве, окружающем электрический ток – это поток вектора магнитной индукции B , проходящий через площадь S :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}.$$

В системе СИ магнитный поток измеряется в веберах ($Вб$), а индукция – в теслах ($Тл$), при этом $1 Вб = 1 Тл \cdot м^2$. Для однородного магнитного поля, проходящего перпендикулярно площадке S , магнитный поток $\Phi = BS$, а магнитная индукция $B = \frac{\Phi}{S}$.

Направление силовых линий магнитного поля (вектора индукции B) и направление тока I связаны правилом буравчика (правоходового винта).

Свободно вращающаяся магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника с током, будет стремиться занять положение вдоль силовых линий поля.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Магнитное поле электрического тока

Силовой характеристикой магнитного поля, вызванного током, является *напряженность магнитного поля* \mathbf{H} (А/м). Индукция \mathbf{B} определяется через напряженность магнитного поля $\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}$,

где $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ – *абсолютная магнитная проницаемость среды*, Гн/м. Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м) – *магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума)*, μ_r – *относительная магнитная проницаемость среды*, являющаяся функцией \mathbf{H} . μ_r показывает, во сколько раз магнитная индукция \mathbf{B} данной среды отличается от индукции поля в вакууме \mathbf{B}_0 :

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{B}_0}.$$

Применение ферромагнитных магнитопроводов, у которых очень высокая относительная магнитная проницаемость ($\mu_r \gg 1$), в сердечниках электромагнитных устройств позволяет в несколько тысяч раз усилить интенсивность магнитного поля – индукцию \mathbf{B} и нужным образом направить основной магнитный поток в этих устройствах. Примеры: трансформаторы, реле, электромагниты, электрические машины, измерительные приборы и др.⁵

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Магнитное поле электрического тока

Изолированный провод намотанный спирально и состоящий из многих витков, расположенных так, что оси их совпадают, образует *катушку намагничивания*, которая в электромагнитных устройствах называется *обмоткой*. Направление силовых линий магнитного поля в катушке и направление тока I в витках также определяются правилом буравчика. При изменении направления тока в проводнике или в катушке также изменится направление магнитных линий поля, возбуждаемого этим током. Катушка намагничивания с числом витков W , по которым протекает ток I создает *магнитодвижущую силу (МДС) $F = WI$* , А.

Для усиления магнитного поля обмотки располагаются на *ферромагнитных сердечниках*, которые в этих устройствах образуют *замкнутые магнитопроводы*.

Совокупность различных ферромагнитных и неферромагнитных частей электротехнических устройств для создания магнитных полей нужной конфигурации и интенсивности называется магнитной цепью (магнитопроводом).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Свойства ферромагнитных материалов

Для ферромагнитных материалов зависимость индукции от напряженности магнитного поля $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ в общем случае нелинейная и неоднозначная, определяемая *петлей гистерезиса 1* и *основной кривой намагничивания 2*.

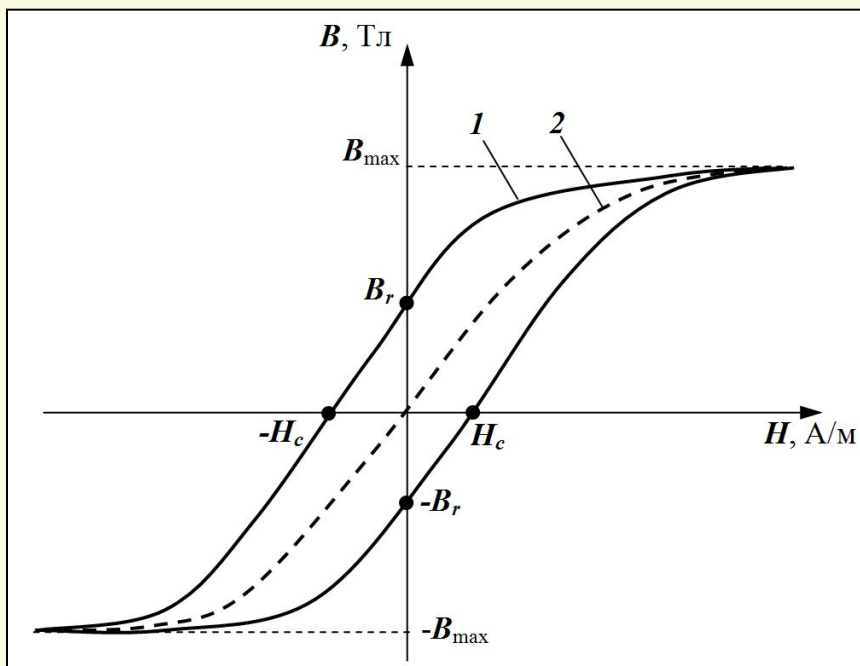


Рис. 1. Петля гистерезиса (1) и основная кривая намагничивания (2)

B_{max} – индукция насыщения;
 B_r – остаточная индукция;
 H_c – коэрцитивная сила

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Свойства ферромагнитных материалов

Петля гистерезиса ферромагнитных материалов характеризуется следующими параметрами (см. рис. 1): H_C – *коэрцитивной силой*, B_r – *остаточной индукцией* и B_{max} – индукцией насыщения.

По значению коэрцитивной силы H_C петли гистерезиса ферромагнитные материалы делятся на *магнито-мягкие материалы* с малыми значениями коэрцитивной силы и с узкой петлей гистерезиса ($H_C < 0,05 \div 0,01$ А/м) (см. рис. 2,а, рис. 2,в), и *магнито-твердые материалы* с большими значениями коэрцитивной силы и с широкой петлей гистерезиса ($H_C > 20 \div 30$ кА/м) (см. рис. 2,б).

Магнито-твердые материалы используются для изготовления *постоянных магнитов*, а магнито-мягкие – для изготовления *магнитопроводов электротехнических устройств*, работающих в режиме перемагничивания с определенной частотой (50 – 400 Гц). Примеры: сердечники двигателей и генераторов переменного тока, трансформаторов, и др.

Магнитопроводы устройств переменного тока выполняются из отдельных тонких пластин (0,35 ÷ 0,5 мм) специальных электротехнических сталей, которые штампуются, изолируются и собираются (шихтуются) в пакеты.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Свойства ферромагнитных материалов

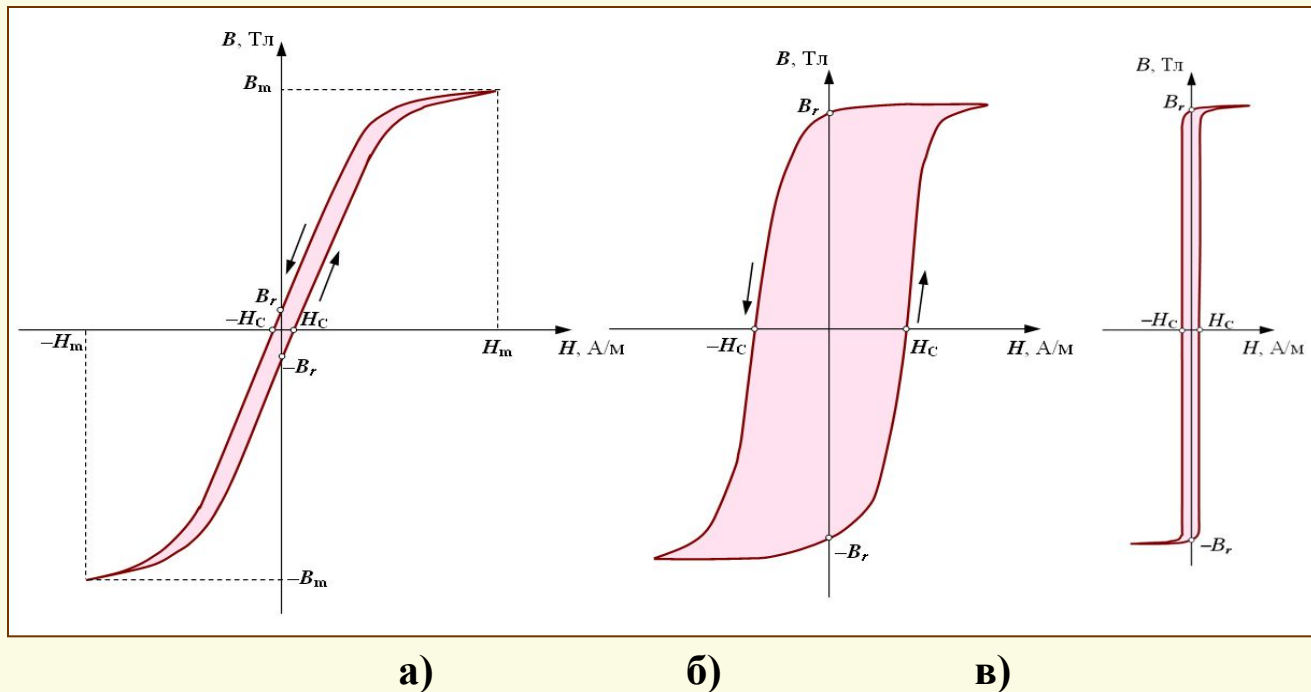


Рис. 2. Петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов

а – магнитомягкие материалы;

б – магнитотвердые материалы;

в – материалы с прямоугольной петлей гистерезиса

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Свойства ферромагнитных материалов

Магнитопроводы из ферромагнитных материалов с *прямоугольной гистерезиса петлей гистерезиса* (см. рис. 2,в) изготавливаются либо из различных ферромагнитных сплавов железа и никеля (*пермаллои*), либо из ферромагнитной керамики (*ферриты*). Ценное свойство ферритов в отличие от ферромагнитных сплавов – их высокое удельное электрическое сопротивление. Магнитопроводы с прямоугольной гистерезиса применяются в магнитных усилителях, в электромагнитных устройствах для обеспечения оперативной памяти цифровых ЭВМ, и в других электромагнитных устройствах автоматики.

Площадь петли гистерезиса и магнитные потери

Площадь петли гистерезиса характеризует энергию, выделяемую в единице объема ферромагнитного материала за один цикл перемагничивания. Эта энергия идёт на нагревание ферромагнитного материала и выделяется, как любые потери энергии, в виде тепла. *Такие потери энергии называются гистерезисными (магнитные потери на гистерезис).*

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Площадь петли гистерезиса и магнитные потери

Для уменьшения потерь на гистерезис (например, в сердечниках трансформаторов, в статорах и роторах электрических машин), применяют *магнитомягкие материалы*, обладающие малой коэрцитивной силой H_c и малой площадью петли гистерезиса.

С ростом частоты переменного магнитного поля (равной частоте переменного тока в намагничивающей катушке) к гистерезисным потерям добавляются *другие потери, связанные с вихревыми токами (магнитные потери от вихревых токов)*. Соответственно площадь петли гистерезиса при высоких частотах увеличивается. Такую петлю называют *динамической петлей 2*, в отличие от *статической петли гистерезиса 1, характеризующей потери на гистерезис (см. рис. 3)*.

Таким образом, площадь статической петли гистерезиса характеризует магнитные потери ферромагнитного материала от гистерезиса (эта площадь отмечена голубым цветом на рис. 3), площадь динамической петли гистерезиса характеризует суммарные магнитные потери от гистерезиса и вихревых токов, а разница этих площадей – только магнитные потери от вихревых токов (эта площадь отмечена розовым цветом на рис. 3).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Площадь петли гистерезиса и магнитные потери

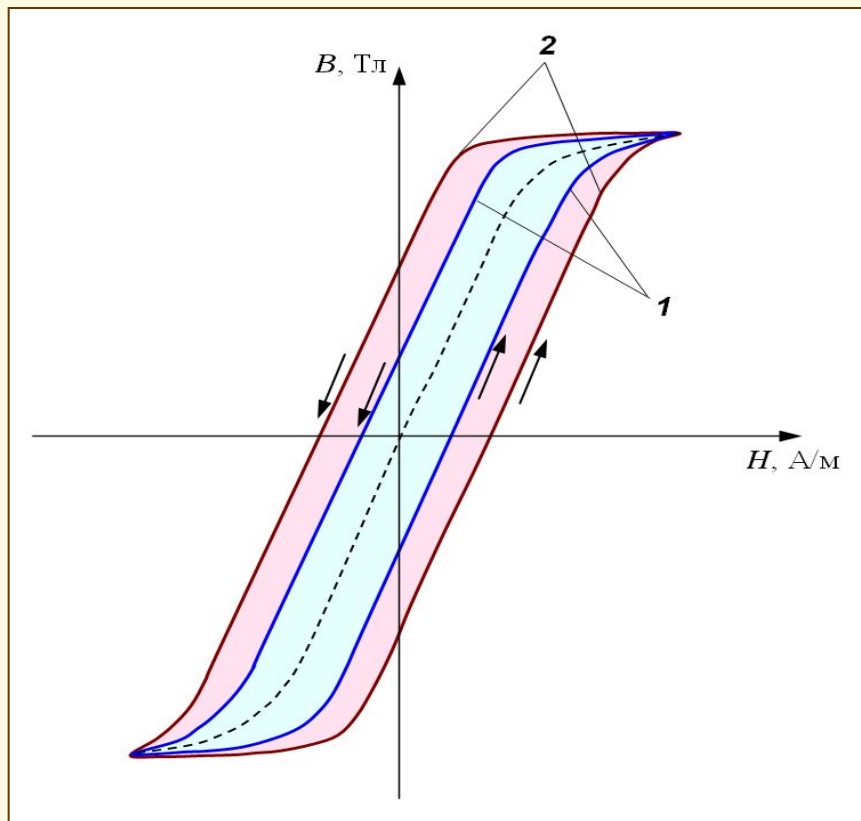


Рис. 3. Петли гистерезиса магнитомягких материалов
1 – статическая петля гистерезиса;
2 – динамическая петля гистерезиса

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

Характеристики основной кривой намагничивания

Основную кривую намагничивания электротехнической стали условно можно разбить на три области (см. рис. 4.):

- 1) **Область недоиспользования** энергии магнитного поля в электротехническом устройстве при малых значениях магнитной индукции B в магнитопроводе ($0 \div 1,4$ Тл) (см. рис. 4.);
- 2) **Область наиболее полного использования** энергии магнитного поля в электротехническом устройстве при высоких значениях магнитной индукции B в магнитопроводе ($1,4 \div 1,8$ Тл) и средних значениях напряженности магнитного поля H ($1000 \div 2000$ А/м). Эта область расположена вблизи «колена» кривой намагничивания (см. рис. 4.);
3. **Область насыщения** при мало изменяемой индукции ($B > 1,8 \div 2,0$ Тл) и высоких значениях напряженности магнитного поля ($H > 2000$ А/м).

По основной кривой намагничивания электротехнической стали определяют зависимость абсолютной магнитной проницаемости μ_a от напряженности магнитного поля H : $\mu_a = \mu_r \mu_r = B / H$.

Из рис. 4 видно, что эта зависимость имеет *максимум* вблизи «колена» кривой намагничивания

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Определения и основные характеристики магнитного поля

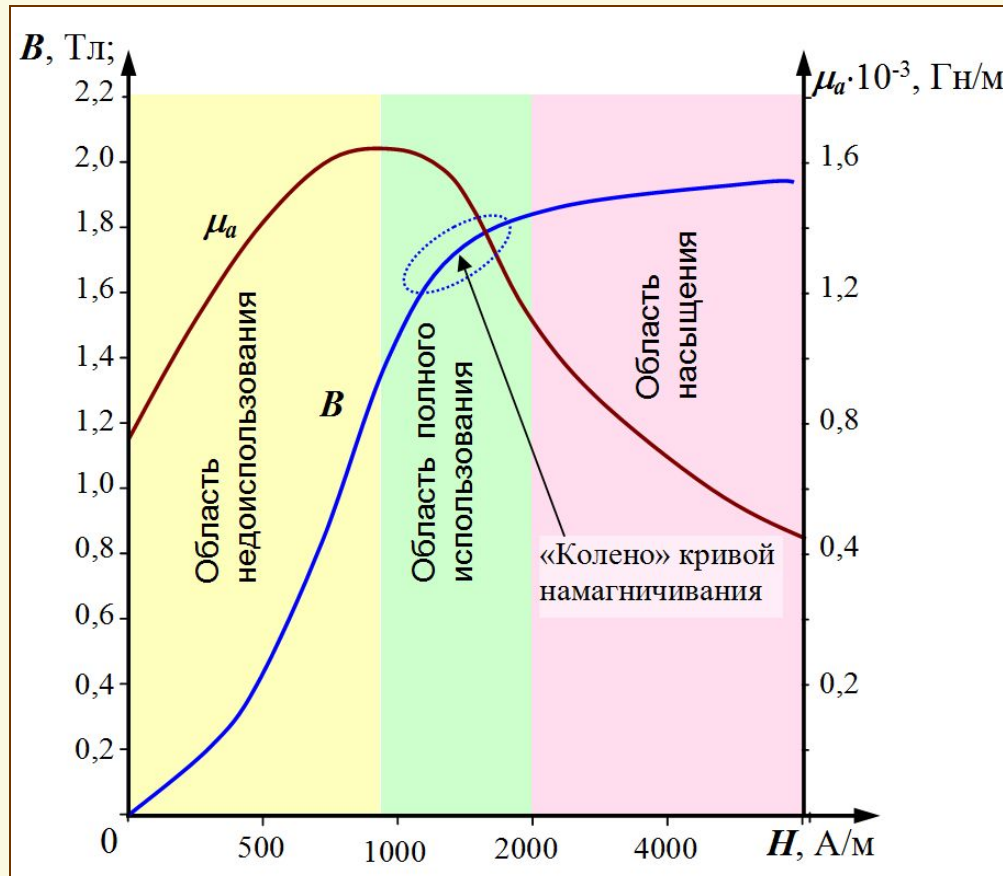


Рис. 4. Основная кривая намагничивания $B(H)$ и зависимость μ_a / H для ферромагнитного материала

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон полного тока

Закон полного тока устанавливает, что интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру (циркуляция вектора напряженности) равен алгебраической сумме токов, сцепленных с этим контуром:

$$\oint_l \mathbf{H} dl = \sum_{j=1}^n I_j.$$

Магнитную цепь большинства электротехнических устройств можно представить в виде отдельных участков, в пределах каждого из которых магнитное поле однородно, т. е. с постоянной напряженностью, равной напряженности магнитного поля \mathbf{H}_k вдоль средней линии участка длиной l_k . Для таких магнитных цепей интегрирование можно заменить суммированием.

Закон полного тока для магнитной цепи, состоящей из n участков длиной l_k каждый с напряженностью на участке \mathbf{H}_k и с W_j витками m катушек, по каждой из которых протекает ток I_j в общем виде записывается:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{j=1}^m W_j I_j = F,$$

где F – результирующая МДС.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон полного тока

Для определения направления МДС пользуются следующим *мнемоническим правилом*: если сердечник мысленно обхватить правой рукой, расположив её пальцы по направлению тока в витках обмотки, то отогнутый большой палец укажет направление МДС. Для катушек, намотанных на тороидальный сердечник, МДС считаются положительными, если они направлены по часовой стрелке, МДС противоположного направления в уравнение закона полного тока записываются со знаком минус.

Например, для ферромагнитного тороида со средней длиной сердечника $l_0 = \pi D_0$ с четырьмя намагничивающими катушками (см. рис. 5) уравнение по закону полного тока

$$F = H \cdot l_0 = H \cdot \pi D_0 = W_1 I_1 - W_2 I_2 + W_3 I_3 - W_4 I_4.$$

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон полного тока

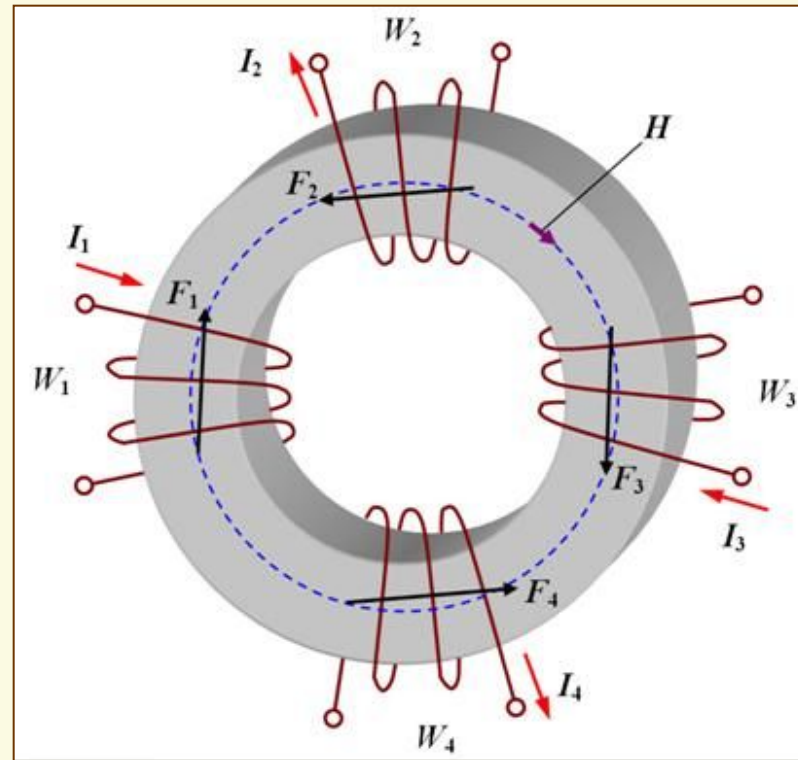


Рис. 5. Ферромагнитный тороидальный сердечник с четырьмя намагничивающими катушками

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон полного тока

Закон полного тока для ферромагнитного тороида с одной намагничивающей катушкой (рис. 6):

$$F = H \cdot l_0 = H \cdot \pi D_0 = WI,$$

где $l_0 = \pi D_0$ – средняя длина тороидального сердечника.

Из этой формулы следует, что напряженность однородного магнитного поля равна магнитодвижущей силе, приходящейся на единицу длины магнитной силовой линии:

$$H = \frac{WI}{\pi D_0} = \frac{F}{l_0}.$$

Здесь $F = IW$, A – магнитодвижущая сила (МДС) намагничивающей катушки.

Таким образом, *согласно закону полного тока результирующая МДС F равна сумме произведений напряженностей магнитного поля на длины соответствующих участков для контура магнитной цепи.*

Произведение $H_k l_k = U_{mk}$ называют *магнитным напряжением* U_{mk} k -ГО участка магнитной цепи.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон полного тока

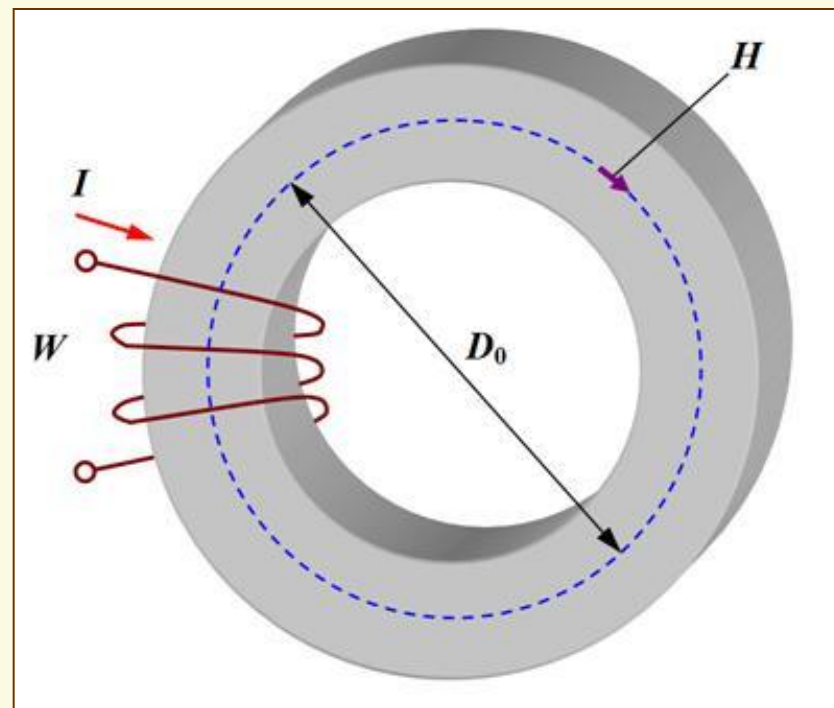


Рис. 6. Ферромагнитный тороидальный сердечник с одной намагничивающей катушкой

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Закон Ома для участка магнитной цепи устанавливает соотношение между величиной магнитного потока Φ , проходящего через участок магнитопровода постоянного сечения, магнитным напряжением U_M этого участка и его магнитным сопротивлением R_M :

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M}.$$

Таким образом, *по закону Ома для участка магнитной цепи магнитный поток прямо пропорционален магнитному напряжению и обратно пропорционален магнитному сопротивлению этого участка:*

Магнитное напряжение U_M , А можно выразить через напряженность магнитного поля H и длину участка l :

$$U_M = H_M = Hl.$$

Из формулы закона Ома магнитное сопротивление участка магнитной цепи

$$R_M = \frac{U_M}{\Phi} = \frac{Hl}{\Phi}.$$

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи прямо пропорционально длине l этого участка и обратно пропорционально площади его сечения S и абсолютной магнитной проницаемости μ_a материала магнитопровода:

$$R_M = \frac{l}{\mu_a \cdot S}.$$

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи устанавливает соотношение между магнитными потоками в разветвленных магнитных цепях:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0.$$

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи устанавливает соотношение между магнитодвижущими силами и магнитными напряжениями в замкнутых магнитных контурах магнитных цепей:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i R_i = \sum_{j=1}^m U_{Mj} = \sum_{j=1}^m H_j l_j = \sum_{j=1}^m j M_j$$

Законы Кирхгофа для магнитных цепей аналогичны этим законам для электрических цепей (см. лекцию 1).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

Расчет неразветвленной магнитной цепи

На рис. 7, в качестве примера, показана *неразветвленная магнитная цепь* – магнитопровод постоянного поперечного сечения S , со средней длиной l_c магнитной линии в ферромагнитном сердечнике с воздушным зазором l_δ . На сердечнике расположена катушка с числом витков W , через которую проходит намагничивающий ток I .

В задачах по расчету магнитной цепи часто требуется определить МДС $F = IW$, для создания заданного магнитного потока Φ в магнитопроводе или индукции B в воздушном зазоре. В расчете используются вышеприведенные выражения законов полного тока, Ома и Кирхгофа для магнитной цепи.

В частности, для расчета магнитной цепи с двумя участками l_c и l_δ (рис. 7) по закону полного тока результирующая МДС катушки

$$F = WI = H_1 \cdot l_c + H_2 \cdot l_\delta,$$

где H_1 и H_2 – напряженности магнитного поля в сердечнике и воздушном зазоре.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Основные законы для расчета магнитной цепи

В воздушном зазоре значения магнитной индукции \mathbf{B}_2 и напряженности \mathbf{H}_2 связаны соотношением $\mathbf{B}_2 = \mu_0 \mathbf{H}_2$, а для сердечника из ферромагнитного материала $\mathbf{B}_1 = \mu_{al} \mathbf{H}_1$.

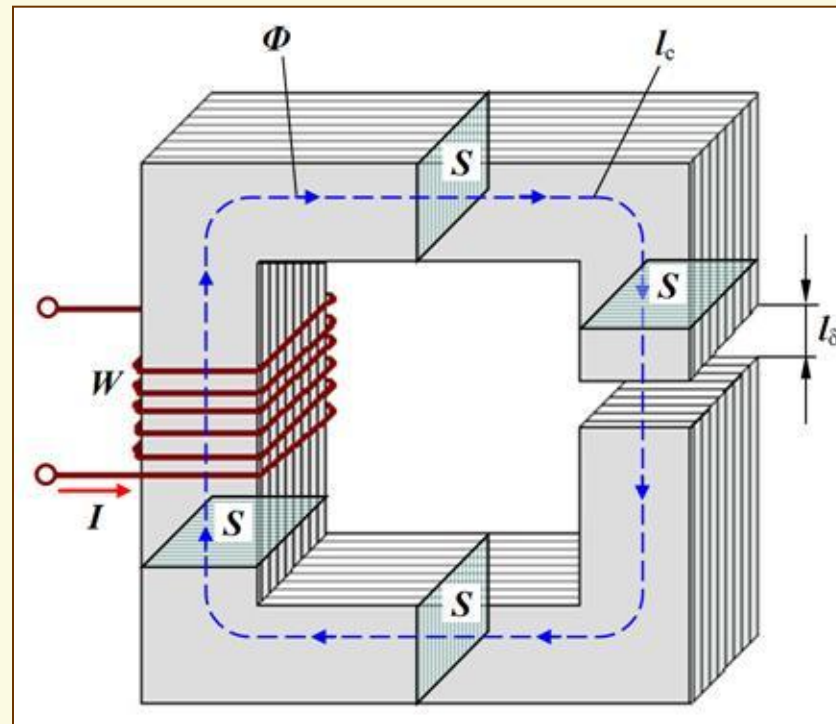


Рис. 7. Ферромагнитный сердечник с воздушным зазором l_δ

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Действие магнитного поля на проводник с током (Закон Ампера)

Если проводник, по которому проходит электрический ток, внести в магнитное поле, то на него будет действовать *электромагнитная сила*, которая называется *силой Ампера*, определяемая *правилом левой руки*:

Если расположить ладонь левой руки так, чтобы линии индукции B магнитного поля перпендикулярно входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока I в проводнике, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы F_A , действующей на проводник (см. рис. 8).

Электромагнитная сила Ампера лежит в основе действия всех электромеханических устройств с движущимися частями (электродвигатели, электрогенераторы, магнитоэлектрические измерительные приборы и др.)

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электроmechanическое действие магнитного поля

Действие магнитного поля на проводник с током (Закон Ампера)

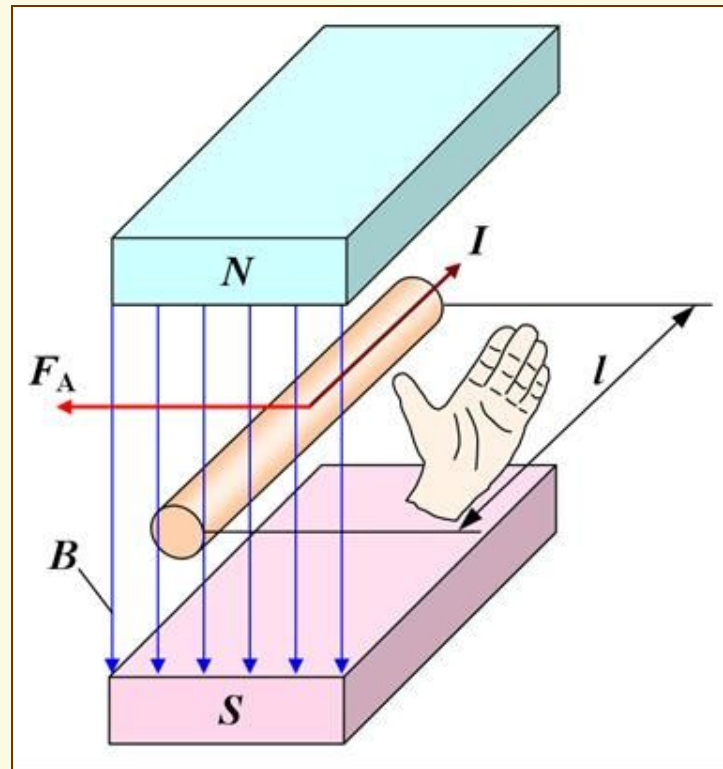


Рис. 8. Возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник с током в магнитном поле.

Правило левой руки

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Действие магнитного поля на проводник с током (Закон Ампера)

Возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник с током, находящийся в магнитном поле поясняет рис. 9. На рис. 9,а показано отдельное распределение силовых линий магнитного поля постоянного магнита NS и линий поля проводника с током. Силовые линии поля постоянного магнита равномерно распределены и направлены от северного полюса N к южному S . Силовые линии проводника с током имеют вид концентрично распределенных окружностей, направленных по часовой стрелке, если направление тока отходит от нас в плоскость рисунка (в этом случае в сечении проводника, как показано на рисунке, ставится крестик).

На рис. 9,б показана картина магнитного поля, полученного в результате наложения полей тока и постоянного магнита. Слева от проводника произошло ослабление магнитного поля вследствие того, что силовые линии поля тока и постоянного магнита направлены навстречу друг другу. Справа от проводника силовые линии поля тока и постоянного магнита совпадают по направлению, что усиливает результирующее поле.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электроmechanическое действие магнитного поля

Возникновение электромагнитной силы, действующей на проводник с током, можно объяснить боковым распором сгущенных силовых линий справа от проводника и их стремлением сократить свою длину, что приводит к выталкиванию проводника влево. Это вполне согласуется с вышеописанным правилом левой руки.

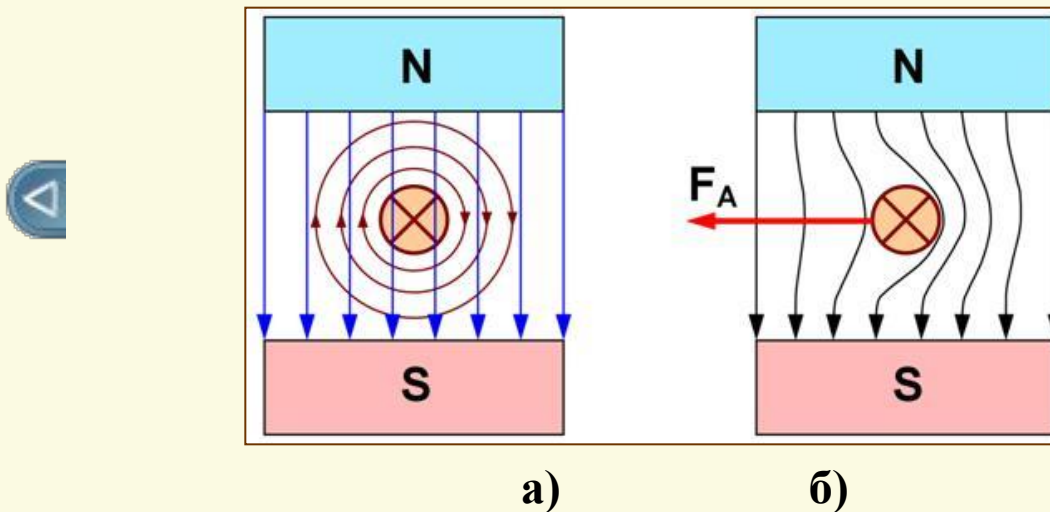


Рис. 9. Проводник с током в магнитном поле

а – магнитные поля постоянного магнита **NS** и проводника с током;

б – результирующее магнитное поле постоянного магнита и проводника с током 27

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Действие магнитного поля на проводник с током (Закон Ампера)

Величина электромагнитной силы F_A , действующей на прямолинейный проводник длиной l с током в магнитном поле определяется *закона Ампера*: *сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле, прямо пропорциональна магнитной индукции B , току I в проводнике и длине l той части проводника, которая находится в магнитном поле*

$$F_A = B \cdot I \cdot l$$

Если проводник с током находится в магнитном поле под углом α по отношению к направлению вектора индукции B , то сила равна:

$$F_A = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

Если проводник с током расположить вдоль магнитных линий, то сила F_A станет равной нулю, так как угол $\alpha = 0$ и $\sin \alpha = 0$.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Действие магнитного поля на проводник с током (Закон Ампера)

Величина электромагнитной силы F_A , действующей на прямолинейный проводник длиной l с током в магнитном поле определяется *закона Ампера*: *сила, действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле прямо пропорциональна магнитной индукции B , току I в проводнике и длине l той части проводника, которая находится в магнитном поле*

$$F_A = B \cdot I \cdot l$$

Если проводник с током находится в магнитном поле под углом α по отношению к направлению вектора индукции B , то сила равна:

$$F_A = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

Если проводник с током расположить вдоль магнитных линий, то сила F_A станет равной нулю, так как угол $\alpha = 0$ и $\sin \alpha = 0$.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Взаимодействие проводников с токами

Взаимодействие магнитных полей двух рядом расположенных проводников с токами I_1 и I_2 также вызывает создание электромагнитных сил F , действующих на проводники (см. рис. 10). Когда токи имеют одинаковые направление, провода притягиваются друг к другу (рис. 10,а). Это можно объяснить боковым распором сгущенных силовых линий по внешним сторонам проводников и их разряжением между проводниками, а также стремлением силовых линий сократить свою длину, что приводит к появлению электромагнитных сил, стремящихся сблизить проводники. Когда токи имеют противоположные направления (рис. 10,б), то провода испытывают силы взаимного отталкивания. Это объясняется боковым распором сгущенных силовых линий в промежутке между проводами.

Сила взаимодействия двух достаточно длинных проводников ($l = l_1 = l_2$), расположенных параллельно на расстоянии d по которым протекают токи I_1 и I_2 :

$$F = \frac{\mu_r \mu_0}{2d} I_1 I_2 l.$$

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Электромеханическое действие магнитного поля

Взаимодействие проводников с токами

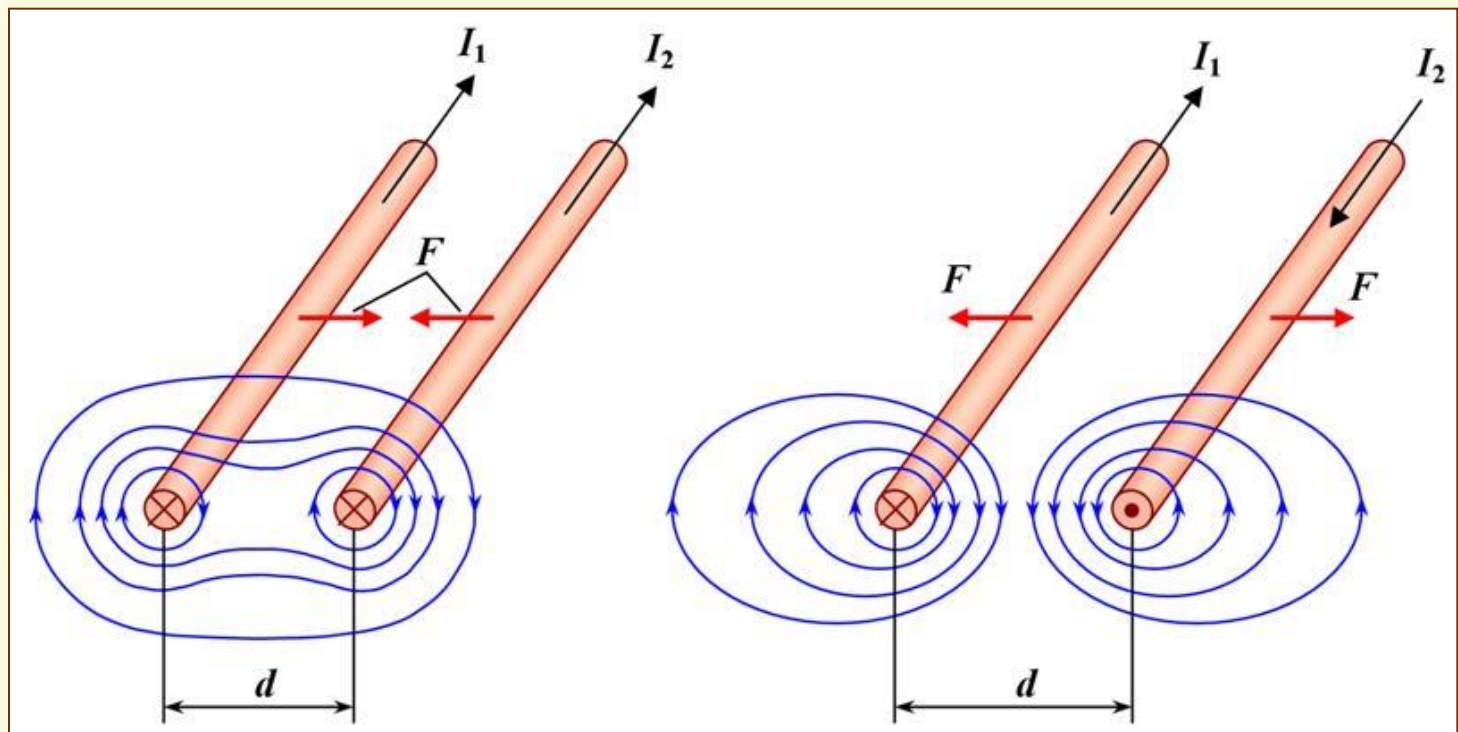


Рис. 10. Взаимодействие двух проводников с током

а – токи одного направления;

б – токи противоположных направлений

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Электромагнитная индукция

Явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем в 1831 г., заключается в следующем:

Всякое изменение магнитного поля, в котором помещен проводник произвольной формы, индуцирует (наводит) в проводнике электродвижущую силу (ЭДС) электромагнитной индукции.

Если проводник образует замкнутый контур, то при всяком изменении магнитного поля, сцепленного с этим контуром в нем наводится ЭДС \mathcal{E} и в контуре возникает *индукционный ток i* .

Закон электромагнитной индукции (Закон-Фарадея)

Величина электродвижущей силы \mathcal{E} наводимой в проводнике или контуре прямо пропорциональна скорости изменения во времени потокосцепления Ψ контура:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Электромагнитная индукция

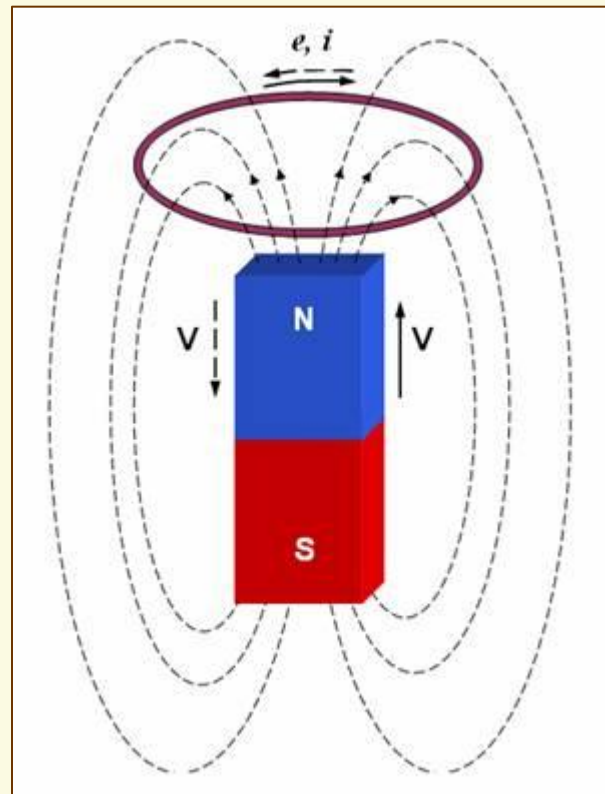


Рис. 11. Возникновение ЭДС и тока электромагнитной индукции

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Электромагнитная индукция

Потокосцепление катушки (обмотки) равно алгебраической сумме потоков пронизывающих отдельные витки обмотки: $\Psi = \sum W_k \Phi_k$.

Если все витки W_k обмотки W пронизываются одним и тем же потоком Φ , то потокосцепление $\Psi = W\Phi$.

Поэтому ЭДС электромагнитной индукции выражается формулой:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt}.$$

Правило Ленца

Правило Ленца объясняет отрицательный знак в формуле индуктированной ЭДС и заключается в том, что *наведенная в проводящем контуре ЭДС стремится вызвать ток, направленный так, чтобы воспрепятствовать изменению магнитного потока, вызвавшего появление индуктированной ЭДС.*

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Правило Ленца

Если постоянный магнит (см. рис. 11) вводить в проводящий контур (двигать вверх к витку), то в контуре индуцируется ЭДС и ток такого направления, при котором магнитное поле от наведенного тока в витке препятствует нарастанию внешнего магнитного потока магнита. При обратном движении магнита вниз от контура, в нем наводятся ЭДС и ток такого направления, чтобы создать магнитное поле от тока в витке, препятствующего убыванию магнитного потока постоянного магнита.

Электромагнитная индукция и наведение ЭДС при движении проводника в магнитном поле

Направление наведенной ЭДС определяют по *правилу правой руки*: если расположить правую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, отогнутый большой палец показывал направление движения проводника, то остальные четыре пальца покажут направление наведенной в проводнике ЭДС (см. рис. 12).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Наведение ЭДС при движении проводника в магнитном поле

При равномерном движении проводника со скоростью V (м/с) длиной l (м), в магнитном поле с индукцией B (Тл), в нем вследствие электромагнитной индукции наводится ЭДС (В), определяемая формулой: $\mathcal{E} = B \cdot l \cdot V$.

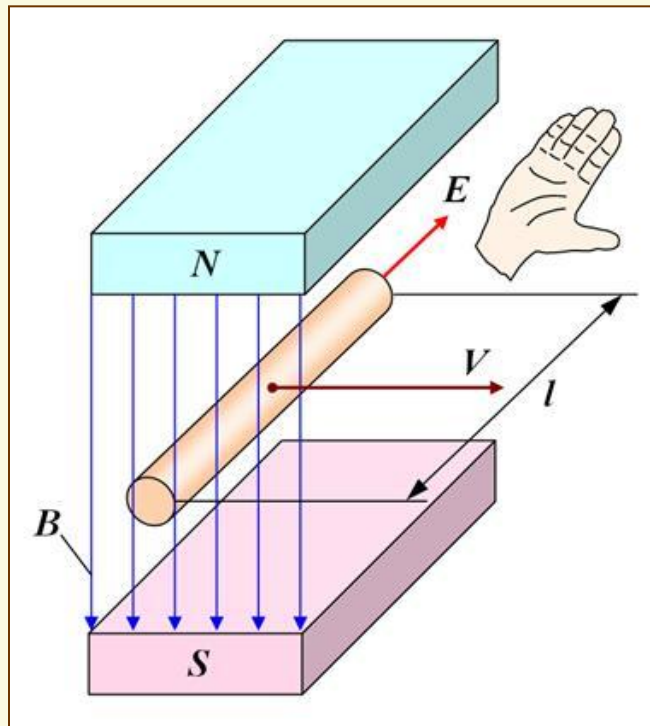


Рис. 12. Возникновение ЭДС при движении проводника в магнитном поле.
Правило правой руки

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Самоиндукция. ЭДС самоиндукции

Явление самоиндукции заключается в появлении ЭДС индукции в катушке из-за изменения протекающего по ней тока и соответствующего изменения магнитного поля, сцепляющегося с витками катушки. Эта электродвижущая сила называется ЭДС самоиндукции.

При замыкании цепи постоянного тока с катушкой индуктивности L ток i в цепи изменяется от нуля до установившегося значения $I = U/R$ (см. рис. 13). Во время возникновения и нарастания тока цепи, в катушке также появляется и нарастает магнитный поток и из-за этого возникает ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции согласно правилу Ленца препятствует нарастанию тока, вследствие чего ток достигает установившегося значения I постепенно, как показано на рис. 13,б.

При размыкании цепи с катушкой, вследствие уменьшения магнитного потока индуктируется ЭДС самоиндукции, которая стремится поддерживать неизменное значение тока. Поэтому исчезновение тока в цепи наступает не мгновенно, а также постепенно (рис. 13,б).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Самоиндукция. ЭДС самоиндукции

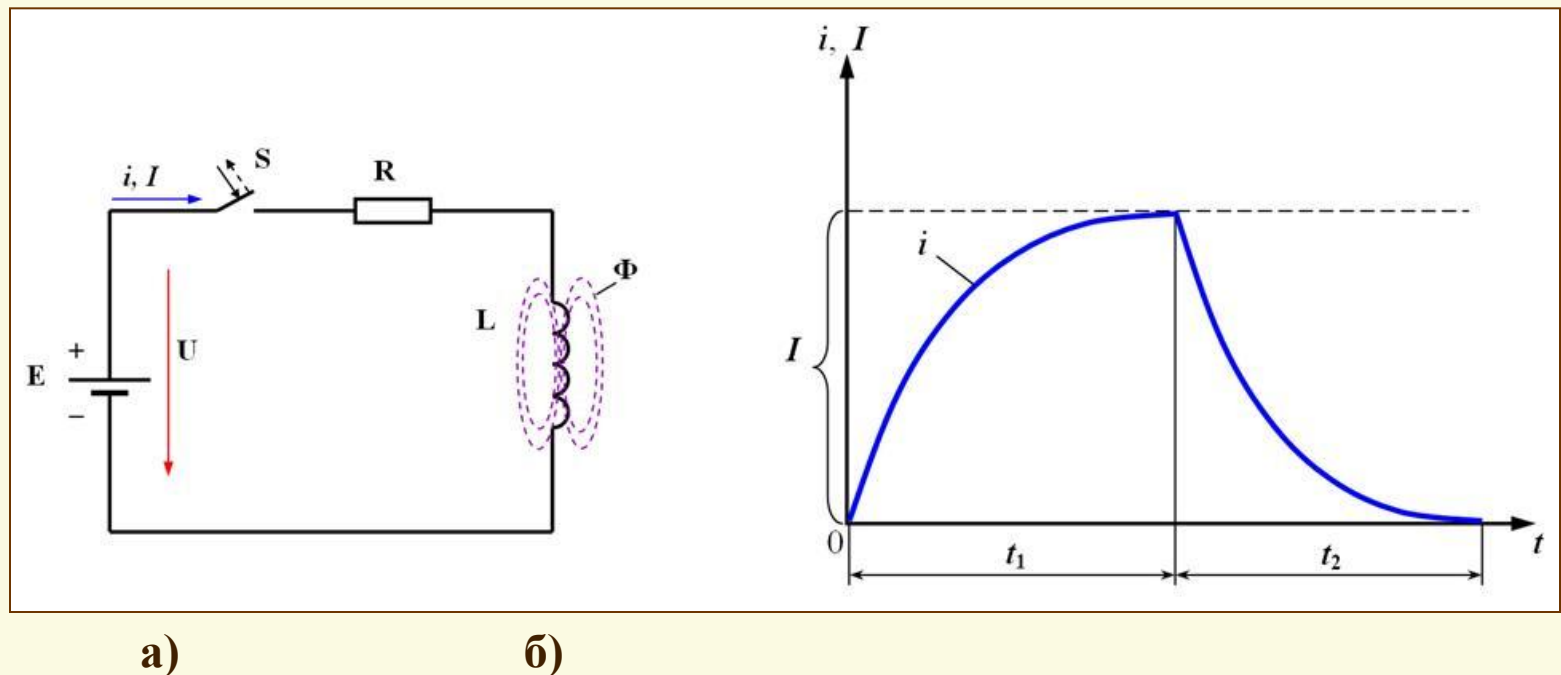


Рис. 13. Явление самоиндукции катушки при коммутации в цепи постоянного тока

а – коммутация в цепи постоянного тока с катушкой индуктивности;
б – нарастание и убывание тока в катушке при замыкании и размыкании цепи

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

Если катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником (см. рис. 14) с числом витков W подключить к источнику синусоидального напряжения u_1 частотой f , то переменный ток i_1 с действующим значением I_1 создает в магнитопроводе катушки *основной переменный магнитный поток* Φ_0 той же частоты: $\Phi_0 = \Phi_{0m} \sin$

где Φ_{0m} , Вб – амплитуда переменного магнитного потока; $\omega = 2\pi f$, рад/с – угловая частота пульсирующего магнитного потока, равная угловой частоте напряжения питания.

Магнитный поток Φ_0 пронизывает витки катушки (сцепляется с ними) и за счет электромагнитной индукции *наводит (индуктирует)* в них *электродвижущую силу*:

$$e_{\text{т}} = \pi W \frac{d\Phi_0}{dt} = E_{1m} \sin(\quad /$$

Здесь $E_{1m} = 2 \quad 1$ – амплитудное значение наведенной ЭДС.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Самоиндукция. ЭДС самоиндукции

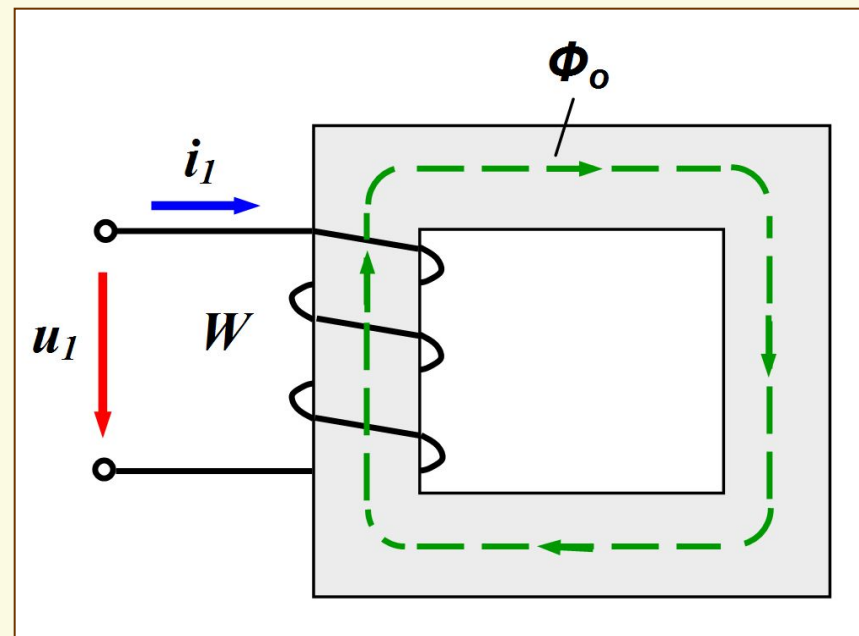


Рис. 14. Катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Катушка индуктивности в цепи синусоидального тока

После проведения дифференцирования и перехода к действующим значениям величина ЭДС самоиндукции, наведенная в катушке будет иметь следующий вид:

$$E_1 = 4,44fW\Phi_{Om}$$

Это выражение показывает, что величина индуцируемой в катушке ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна амплитуде магнитного потока Φ_{Om} , его частоте f (скорости изменения магнитного потока во времени) и числу витков катушки W .

Для линейной катушки индуктивности ($L = \text{const}$) величина ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна скорости изменения тока во времени (di/dt):

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt},$$

где $L = \frac{\psi}{i}$ – индуктивность катушки.

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Взаимная индукция. ЭДС взаимной индукции

Наведение ЭДС в каком либо контуре при изменении тока в другом контуре называется *явлением взаимоиндукции*, а наведенная (индуктированная) ЭДС называется *ЭДС взаимоиндукции*.

На рис.15 схематично представлено явление взаимоиндукции катушек W_1 и W_2 .

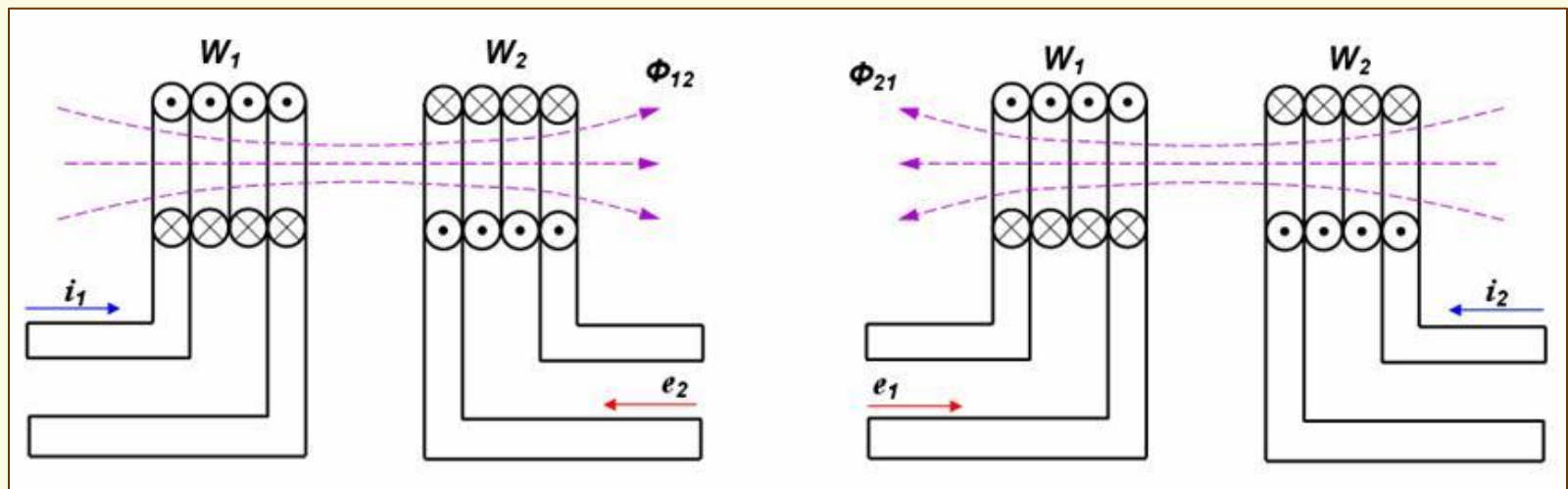


Рис. 15. Явление взаимоиндукции катушек W_1 и W_2

Электромагнетизм. Магнитные цепи



Индукционное действие магнитного поля

Взаимная индукция. ЭДС взаимной индукции

Выражения ЭДС взаимоиндукции двух катушек W_1 и W_2 (см. рис. 15):

$$e_1 = -\frac{d\Psi_{21}}{dt} = -W_1 \frac{di_2}{dt} = -M \frac{di_2}{dt};$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_{12}}{dt} = -W_2 \frac{di_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt},$$

где

$\Psi_{21} = W_1 \Phi_{21} = M i_2$ и $\Psi_{12} = W_2 \Phi_{12} = M i_1$ – соответственно потокосцепление магнитного потока Φ_{21} с обмоткой W_1 , созданного током i_2 в обмотке W_2 и потокосцепление магнитного потока Φ_{12} с обмоткой W_2 , созданного током i_1 в обмотке W_1 . Причем $\Phi_{21} = \Phi_{12}$.

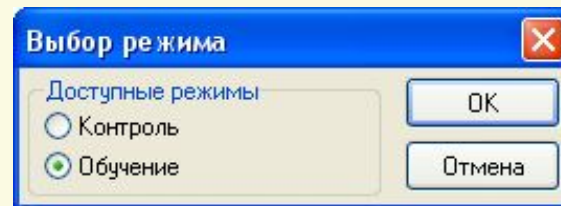
Явление электромагнитной индукции лежит в основе принципа действия и работоспособности всех электрических машин (электродвигателей и генераторов), трансформаторов и разнообразных электротехнических устройств, содержащих катушки индуктивности (обмотки).

Электромагнетизм. Магнитные цепи



ТЕСТ – Электромагнетизм и магнитные цепи

При нажатии на расположенную внизу кнопку-гиперссылку «ТЕСТ» запускается тестирующая программа и предоставляет пользователю выборку пяти вопросов и задач из общего количества 30 по теме раздела. При этом появляется окно *Выбор режима*.



В этом окне следует отметить пункт *Обучение* и после – нажать кнопку *Ок*, так как тестирование в настоящем пособии проводится только в режиме *Обучение*. При ошибочных ответах пользователя на вопросы теста приводятся подсказки в виде правильных ответов (в режиме контроля подсказки отсутствуют).



Электромагнетизм. Магнитные цепи



Литература и электронные средства обучения

Основная литература

1. Касаткин А.С. Электротехника: учеб. для вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 10-е изд. стер. – М.: Изд. Центр «Академия», 2007. – 544с.
2. К.Я. Вильданов, С.Т. Гейдаров, И.Г. Забора и др. Электротехника и электроника. Элементы теории и задания к контрольным работам: Учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей. – М.: МГАКХиС, 2011. – 89 с.

Электронные средства обучения

1. А.С. Касаткин, М.В. Немцов. Электротехника. Электронная версия учебника по электротехнике и электронике, 2009. (формат – веб-страницы).
2. И.Г. Забора. Часть 1. Электрические цепи и измерения. Электронное учебное пособие по лабораторным работам, 2011. (формат – веб-страницы).



ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА

Благодарю за внимание!