

Федеральное агентство по образованию

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И  
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра физики**

**А.М. Кириллов**

**ФИЗИКА  
В КОНСПЕКТАХ И ПРИМЕРАХ**

**Часть 4**

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. КОЛЕБАНИЯ  
И ВОЛНЫ. ОПТИКА. МИКРОФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие для поступающих в ТУСУР**

**2007**

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Электрический ток
  - Основные понятия и определения
  - Электролиз
  - Электрическое сопротивление
    - Последовательное и параллельное соединения проводников
  - Закон Ома
    - Закон Ома для участка цепи
    - Закон Ома для полной (замкнутой) цепи
  - Соединения источников тока
  - Правила Кирхгофа
  - Измерение тока и разности потенциалов (напряжения) в цепи. Шунтирование электроизмерительных приборов
  - Переменный электрический ток (действующие напряжения и сила тока)
  - Закон Джоуля-Ленца
    - Коэффициент полезного действия (КПД) источника
    - Мощность переменного тока
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
2. Электромагнетизм
  - Основные понятия и определения
  - Силовое действие магнитного поля
  - Электромагнитная индукция
  - Самоиндукция
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
3. Колебания и волны
  - Основные понятия и определения
  - Механические колебания
  - Электромагнитные колебания
  - Переменный электрический ток
  - Волны
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
4. Оптика
  - Основные понятия и определения
  - Законы отражения и преломления света
  - Собирающая линза
  - Рассеивающая линза
  - Оптические системы
  - Дифракционная решетка
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
5. Микрофизика
  - Основные понятия и определения
  - Внешний фотоэффект
  - Связь массы и энергии
  - Атомные ядра
  - Основные законы и формулы
  - Примеры решения задач
6. Контрольные работы

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### Основные понятия и определения

**Магнитное поле** – это силовое поле, посредством которого взаимодействуют проводники с электрическим током и/или движущиеся электрические заряды.

Магнитное поле имеет следующие свойства:

- 1) Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами (электрическим током) и переменным во времени электрическим полем.
- 2) Магнитное поле непрерывно в пространстве и обнаруживается по действию на движущиеся электрические заряды (проводники с электрическим током). Оно также действует на намагниченные тела независимо от состояния их движения.
- 3) Силовые линии магнитного поля всегда *замкнуты*, поэтому магнитное поле является *вихревым* или *соленоидальным*.

**Индукция магнитного поля (магнитная индукция)**  $\vec{B}$  - векторная величина, характеризующая магнитное поле и определяющая силу, действующую на движущуюся заряженную частицу (проводник с током) со стороны магнитного поля.

Единица измерения магнитной индукции – тесла:  $1 \text{ Тл}$ .

Графически магнитное поле изображается с помощью *линий магнитной индукции*.

**Линия магнитной индукции** – линия, в любой точке которой вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  направлен по касательной.

#### **Направление линий магнитной индукции.**

Для определения направления вектора  $\vec{B}$  магнитного поля прямолинейного проводника также можно пользоваться *правилом буравчика*: направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением вектора  $\vec{B}$ , если при вращении буравчик перемещается в направлении тока (рис. 2.1).

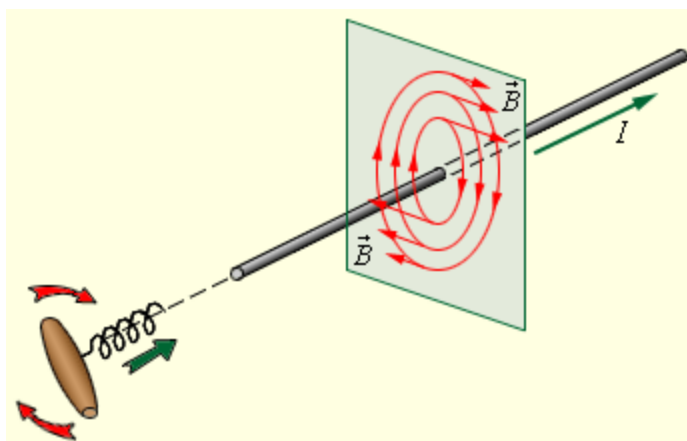


Рисунок 2.1 - Магнитное поле прямолинейного проводника с током

**Однородное магнитное поле** характерно тем, что во всех точках некоторой области пространства вектор магнитной индукции имеет одинаковое значение по модулю и одинаковое направление.

#### **Принцип суперпозиции магнитных полей.**

Для магнитного поля выполняется принцип суперпозиции: поле  $\vec{B}$ , порождаемое системой движущихся зарядов (токов), равно векторной сумме полей  $\vec{B}_i$ , порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i. \quad (2.1)$$

## Силовое действие магнитного поля

### Действие магнитного поля на рамку с током.

При исследовании магнитного поля используется *замкнутый плоский контур с током (рамка с током)*, размерами которой можно пренебречь по сравнению с расстоянием до токов, создающих исследуемое магнитное поле (рис. 2.2). Ориентация контура в пространстве определяется направлением нормали к контуру, положительное направление которой задается правилом правого винта.

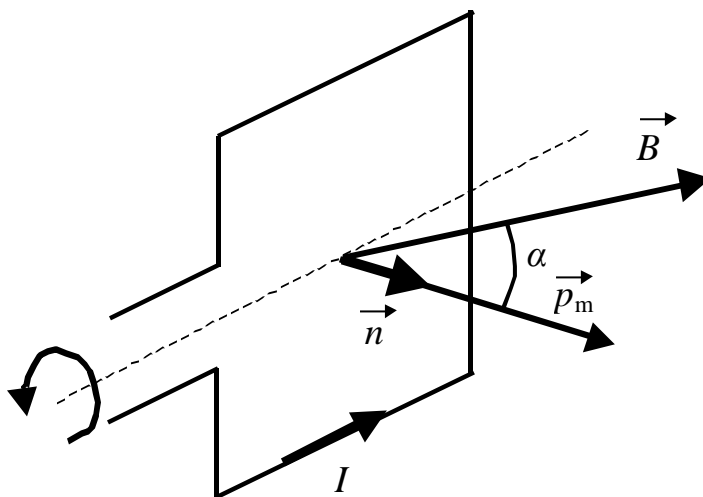


Рисунок 2.2 – Рамка с током в магнитном поле

При помещении такого пробного контура в магнитное поле, происходит его ориентировка относительно поля, а именно так, что положительная нормаль  $\vec{n}$  контура становится сонаправленной вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  ( $\vec{n} \uparrow \vec{B}$  - положение устойчивого равновесия рамки). Т.е. на контур во время его ориентировки действует отличный от нуля результирующий механический момент сил  $\vec{M}$ . Момент сил имеет максимальное значение  $M_{\max}$  при угле между направлением поля и нормалью контура  $\alpha = \pi/2$  и при  $\alpha = 0$  момент равен нулю. Этот вращающий момент сил зависит от свойств поля в данной точке, и от свойств рамки. Если вносить в одну и ту же точку поля разные контуры при фиксированном  $\alpha$ , то оказывается, что момент совершенно не зависит от форму контура и пропорционален его площади  $S$  и протекающему по нему току  $I$ . Таким образом, действие магнитного поля на плоский контур с током определяется величиной

$$p_m = IS, \quad (2.2)$$

называемой *магнитным моментом* контура. Ну а т.к. контур характеризуется еще и ориентацией в пространстве, то магнитный момент следует рассматривать как вектор, совпадающий по направлению с направлением положительной нормали  $\vec{n}$ :

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (2.3)$$

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали. Магнитный момент измеряется в ампер-квадратный метр ( $A \cdot m^2$ ).

На пробные контуры, с различным значением  $p_m$ , действуют в данной точке поля разные по величине вращающие моменты  $M$ . Однако при фиксированном  $\alpha$  отношение  $M / p_m$  оказывается имеет одно и тоже значение. Поэтому в качестве модуля магнитной индукции можно принять величину, равную отношению  $M_{\max} / p_m$ :

$$B = M_{\max} / p_m, \quad (2.4)$$

где  $M_{\max}$  - максимальное значение вращающего момента, имеющее место при  $\alpha = \pi/2$ .

Итак, магнитная индукция есть векторная величина, модуль которой определяется выражением (2.4), а направление задается равновесным положением положительной нормали к контуру с током. Единица измерения величины  $B$  – *тесла* (Тл) – равна магнитной индукции однородного поля, в котором на плоский контур с током, имеющим магнитный момент  $1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ , действует максимальный вращающий момент, равный  $1 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Силовое действие магнитного поля, выражающееся в повороте рамки с током в магнитном поле, описывается формулой, определяющей вращающий момент сил:

$$M = ISB \sin \alpha, \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  - угол между нормалью к контуру  $\vec{n}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

#### **Сила Ампера (закон Ампера).**

Выше, указывалось, что магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее действие. Следовательно, момент силы, действующий на рамку, есть результат действия сил на ее отдельные элементы.

Как показали опыты Ампера, сила, действующая на участок проводника, пропорциональна силе тока  $I$ , длине  $l$  этого участка и синусу угла  $\alpha$  между направлениями тока и вектора магнитной индукции:

$$F \propto I l \sin \alpha.$$

Эта сила называется *силой Ампера*. Она достигает максимального по модулю значения  $F_{\max}$ , когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции.

В общем случае сила Ампера выражается соотношением:

$$F_A = IB l \sin \alpha. \quad (2.6)$$

Соотношение (2.6) принято называть *законом Ампера*.

Для определения направления силы Ампера обычно используют правило левой руки: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 2.3).

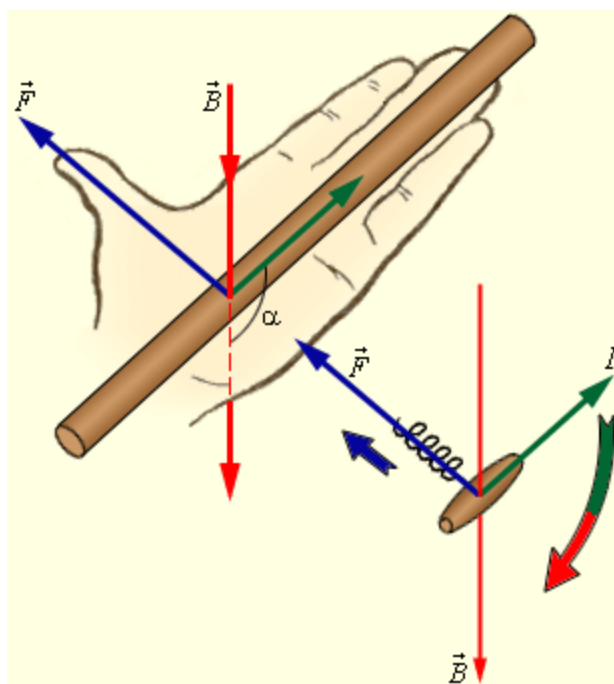


Рисунок 2.3 – Определение направления силы Ампера

Если угол  $\alpha$  между направлениями вектора  $\vec{B}$  и тока в проводнике отличен от  $90^\circ$ , то для определения направления силы Ампера  $\vec{F}_A$  более удобно пользоваться правилом буравчика: воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор  $\vec{B}$  и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора  $\vec{B}$ . Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера  $\vec{F}_A$  (рис. 2.3). Правило буравчика часто называют *правилом правого винта*.

**Сила Лоренца** – сила, которая действует на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Модуль этой силы

$$F_L = |q|Bv\sin\alpha, \quad (2.7)$$

где  $v$  - скорость частицы,  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же, как и направление силы Ампера, может быть найдено по правилу левой руки. Если расположить левую руку так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы указывали направление движения положительного заряда, то отогнутый большой палец укажет направление силы Лоренца. Для отрицательного заряда направление силы Лоренца противоположно, тому, что имело бы место для положительного (для отрицательного заряда можно применять правило правой руки). Взаимное расположение векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_L$  для положительно заряженной частицы показано на рис. 2.4.

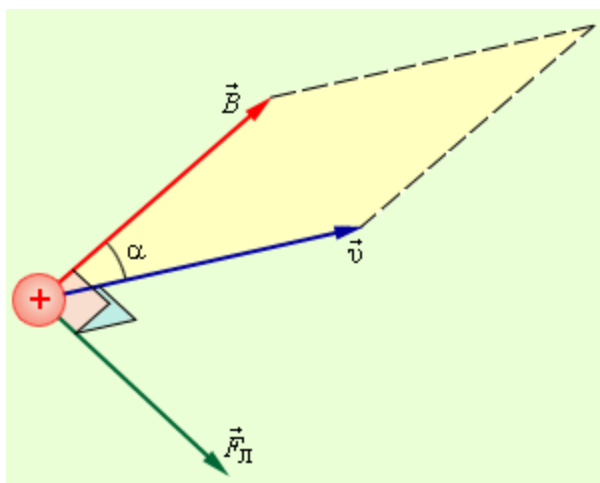


Рисунок 2.4 - Взаимное расположение векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_L$ . Модуль силы Лоренца  $\vec{F}_L$  численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , помноженной на заряд  $q$ . Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Поскольку  $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ , то при движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает. Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется.

**Движение электрического заряда в магнитном поле.**

Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость  $\vec{v}$  лежит в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$  ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ), то частица будет двигаться по окружности. Сила Лоренца  $F_L$  в этом случае играет роль центростремительной силы  $F_{цс}$  (рис. 2.5).

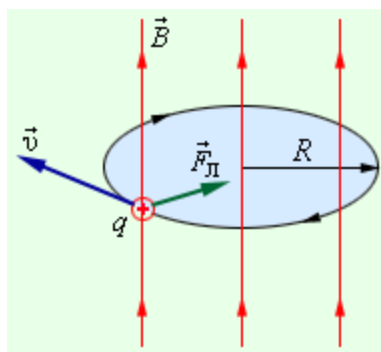


Рисунок 2.5 - Круговое движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

Рассчитаем радиус траектории и период обращения заряда.

$$\begin{aligned}
 F_L &= F_{цс}, \\
 |q|Bv &= m \frac{v^2}{R} \Rightarrow \\
 R &= \frac{mv}{|q|B} = \frac{v}{q'B}.
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

где  $q' = \frac{q}{m}$  - удельный заряд частицы, измеряемый в Кл/кг.

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{|q|B} = \frac{2\pi}{q'B}. \quad (2.9)$$

Рассмотрим общий случай движения заряженной частицы в однородном магнитном поле, когда ее скорость  $\vec{v}$  направлена под произвольным острым углом  $\alpha$  к вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  поля (рис. 2.6). Разложим вектор  $\vec{v}$  на две составляющие: параллельную вектору  $\vec{B}$  ( $\vec{v}_{\parallel}$ ) и перпендикулярную ему ( $\vec{v}_{\perp}$ ):

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha, \quad v_{\perp} = v \sin \alpha. \quad (2.10)$$

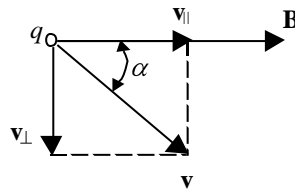


Рисунок 2.6 – Разложение скорости частицы на составляющие

Скорость  $\vec{v}_{\parallel}$  в магнитном поле не изменяется. Частица одновременно участвует в двух движениях: она равномерно вращается со скоростью  $\vec{v}_{\perp}$  по окружности радиуса

$$r = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} = \frac{mv \sin \alpha}{|q|B}, \quad (2.11)$$

и движется поступательно с постоянной скоростью  $\vec{v}_{\parallel}$  в направлении, перпендикулярном плоскости вращения. Поэтому траектория заряженной частицы представляет собой винтовую линию, ось которой совпадает с линией индукции  $\vec{B}$  магнитного поля (рис. 2.7). Радиус  $r$  витков выражается формулой (2.11), а расстояние между соседними витками (шаг винтовой линии) равно  $h = v_{\parallel}T$ .

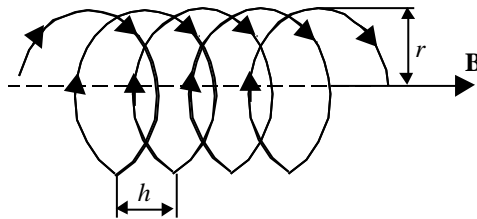


Рисунок 2.7 – Винтовая траектория движения заряженной частицы

Согласно (2.9) и (2.10) имеем

$$h = v_{\parallel}T = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{|q|B} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{|q|B}. \quad (2.12)$$

При движении заряженной частицы в *неоднородном* магнитном поле, индукция  $\vec{B}$  которого возрастает в направлении движения частицы, то по мере перемещения частицы



значения  $r$  и  $h$  (см. (2.11) и (2.12)) уменьшаются. Следовательно, частица движется по скручивающейся спирали, которая навивается на линию магнитной индукции  $\vec{B}$  поля. На этом принципе основана магнитная фокусировка пучков заряженных частиц (магнитные линзы).

**Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ).**

На частицу, движущуюся в скрещенных электрическом и магнитном полях (рис. 2.8), действуют электрическая сила  $\vec{F}_E = q\vec{E}$  и магнитная сила Лоренца. При условии  $E=vB$  эти силы точно уравнивают друг друга и частица будет двигаться равномерно и прямолинейно.

$$\begin{aligned} F_E &= qE, F_L = qBv. \\ F_E &= F_L, qE = qBv \Rightarrow \\ E &= vB. \end{aligned} \tag{2.13}$$

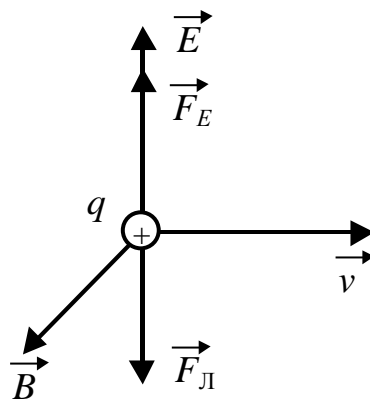


Рисунок 2.8 – Движение заряда в скрещенных электрическом и магнитном полях

Скрещенные однородные магнитные и электрические поля скрещенные используются во многих приборах и, в частности, в *масс-спектрометрах* – устройствах, с помощью которых можно измерять массы заряженных частиц – ионов или ядер различных атомов.

**Электромагнитная индукция**

**Магнитный поток (поток магнитной индукции)**  $\Phi$  через контур, ограничивающий поверхность площадью  $S$  – скалярная физическая величина, равная

$$\Phi = BS \cos \alpha, \tag{2.14}$$

где  $\alpha$  - угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура (рис. 2.9).

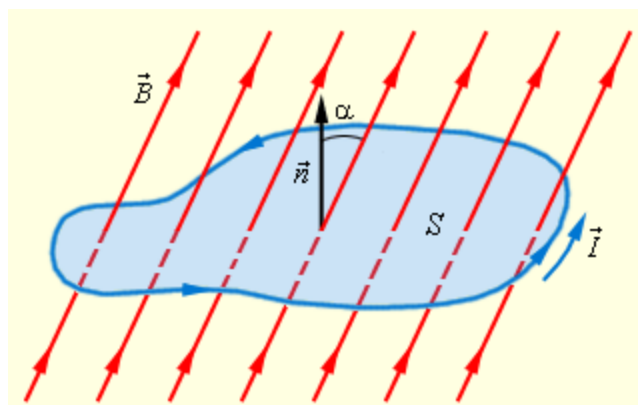


Рисунок 2.9 - Магнитный поток через замкнутый контур. Направление нормали  $\vec{n}$  и выбранное положительное направление обхода контура  $\vec{l}$  связаны правилом правого винта

Единица измерения магнитного потока – вебер:  $[ \Phi ] = \text{Вб}$ .

Магнитный поток  $\Psi$  через поперечное сечение одинаковых витков (катушка):

$$\Psi = N\Phi, \quad (2.15)$$

где  $N$  – число витков в катушке,  $\Phi$  – поток через один виток катушки.

Величину  $\Psi$ , по своему смыслу являющуюся полным магнитным потоком, сцепленным со всеми витками катушки, называют также *потокосцеплением*.

## Электромагнитная индукция

**Явление электромагнитной индукции** заключается в том, что при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в нем возникает сторонняя электродвижущая сила (ЭДС) индукции, вызывающая появление *индукционного тока*.

ЭДС индукции не зависит от причин изменения магнитного потока, а определяется скоростью его изменения. Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по нескольким причинам.

- 1) Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени пространственно неоднородном магнитном поле ( $B$  в формуле (2.14)). Это случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.
- 2) Вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, – изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре ( $B$  в формуле (2.14)). ЭДС индукции в этом случае является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.
- 3) Изменение площади, ограниченной контуром, который пронизывает магнитный поток ( $S$  в формуле (2.14)).
- 4) Изменение взаимной ориентации контура и линий магнитной индукции ( $\alpha$  в формуле (2.14)).

**Правило Ленца:** *возникающий в замкнутом контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток (поток магнитной индукции поля, созданного индукционным током) через площадь, ограниченную контуром, стремится компенсировать то изменение магнитного потока, которым вызывается данный ток.*

**Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея):** ЭДС индукции  $\varepsilon_u$  в замкнутом проводящем контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$|\varepsilon_u| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|, \quad (2.16)$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  - изменение магнитного потока,  $\Delta t$  - промежуток времени, в течение которого произошло данное изменение.

ЭДС индукции  $\varepsilon_u$  - алгебраическая величина: ее знак определяется относительно заранее выбранного положительного направления обхода контура. Поэтому с учетом правила Ленца закон электромагнитной индукции записывается следующим образом:

$$\varepsilon_u = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2.17)$$

Рисунок 2.10 иллюстрирует правило Ленца и поясняет закон электромагнитной индукции (2.17) на примере неподвижного проводящего контура, который находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого увеличивается во времени.

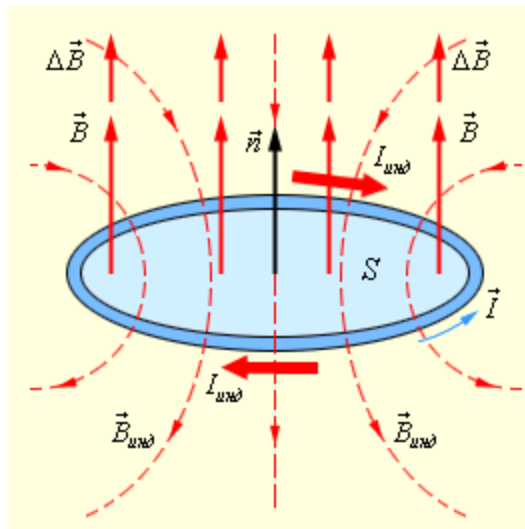


Рисунок 2.10 - Иллюстрация правила Ленца. В этом примере  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ , а  $\varepsilon_u < 0$ .

Индукционный ток  $I_{инд}$  течет навстречу выбранному положительному направлению  $\vec{l}$  обхода контура

Правило Ленца отражает тот экспериментальный факт, что  $\varepsilon_u$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  всегда имеют противоположные знаки (знак «минус» в формуле Фарадея (2.17)). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл – оно выражает закон сохранения энергии.

### ЭДС индукции в катушке

Если в последовательно соединенных контурах происходят одинаковые изменения магнитного потока, то ЭДС индукции в них равна сумме ЭДС индукции в каждом из

контуров. Поэтому при изменении магнитного потока в катушке, состоящей из  $N$  одинаковых витков провода, общая ЭДС индукции в  $N$  раз больше ЭДС индукции в одиночном контуре:

$$\varepsilon_u = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t}. \quad (2.18)$$

### ЭДС индукции в движущихся проводниках.

Если в неизменяющемся магнитном поле движется прямолинейный проводник (рис. 2.11), то возникающую в нем ЭДС индукции  $\varepsilon_u$  (разность потенциалов между концами проводника  $\Delta\varphi$ ) можно также рассчитать по формуле (2.17). В этом случае, под  $\Delta\Phi$  следует понимать магнитный поток через площадь, “прочерченную” проводником при своем движении. В рассматриваемой ситуации “прочерченная” площадь – это площадь параллелограмма

$$S = l \cdot \langle \mathbf{v} \cdot \Delta t \rangle \sin \alpha, \quad (*)$$

где  $\alpha$  - угол между прямолинейным проводником длиной  $l$  и вектором скорости  $\vec{v}$  (рис. 2.11).

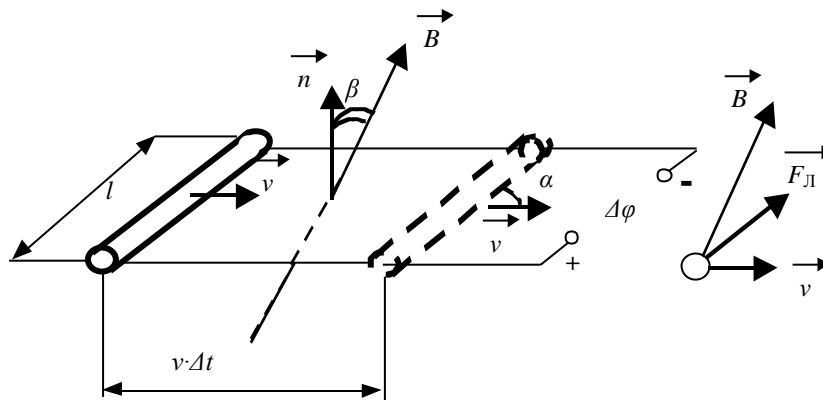


Рисунок 2.11 – Проводник, движущийся в магнитном поле

С учетом вышесказанного

$$\Delta\Phi = \Phi = BS \cos \beta = B \cdot [ \langle \mathbf{v} \cdot \Delta t \rangle \sin \alpha ] \cos \beta, \quad (**)$$

где  $\beta$  - угол между нормалью  $\vec{n}$  к плоскости параллелограмма и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ .

С учетом равенства (\*\*) формула (2.17) приобретает вид:

$$\Delta\varphi = \varepsilon_u = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot [ \langle \mathbf{v} \cdot \Delta t \rangle \sin \alpha ] \cos \beta}{\Delta t} = Blv \sin \alpha \cos \beta. \quad (2.19)$$

Отметим, что роль сторонней силы в рассмотренном случае выполняет сила Лоренца (рис. 2.11), которая приводит к разделению заряда в проводнике и возникновению разности потенциалов  $\Delta\varphi$ .

## **Вихревое электрическое поле**

*Всякое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты (рис. 2.12).*

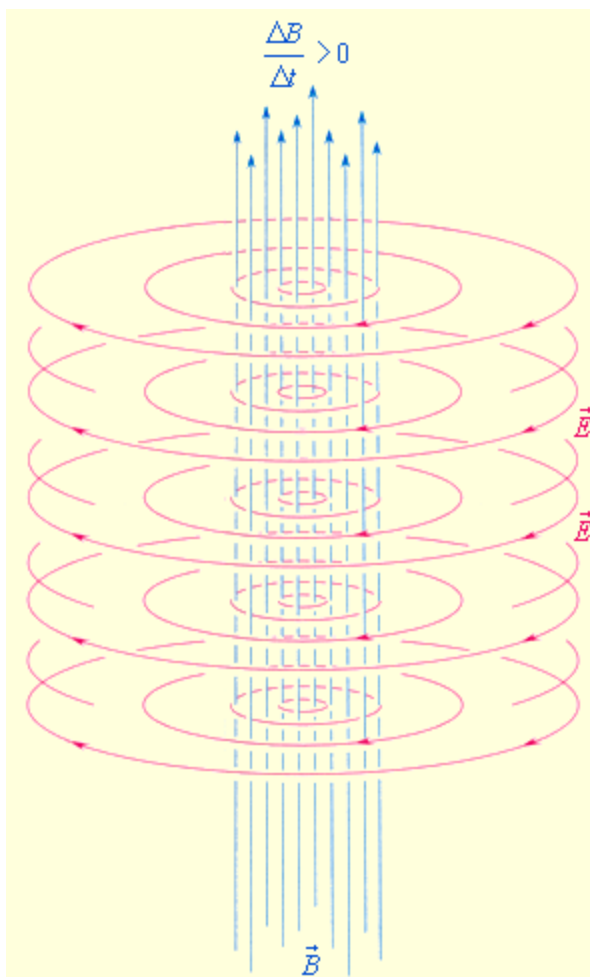


Рисунок 2.12 – Возникновение вихревого электрического тока

Именно вихревое электрическое поле вызывает индукционный ток в замкнутом проводнике, помещенном в переменное магнитное поле.

Направление вектора напряженности вихревого электрического поля устанавливается в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея и правилом Ленца и совпадает с направлением индукционного тока. При возрастании магнитной индукции ( $\frac{dB}{dt} > 0$ ) направление вектора напряженности электрического поля

$\vec{E}_B$  таково, что создаваемый им индукционный ток приводит к появлению магнитного поля, противоположного по направлению изменяющемуся магнитному полю (рис. 2.12) (индекс “B” в  $\vec{E}_B$  говорит о том, что электрическое поле порождено изменяющимся магнитным полем  $\vec{B}$ ). Это препятствует, таким образом, изменению магнитного потока.

Электродвижущая сила в случае осевой симметрии вихревого электрического поля и равномерном изменении магнитного поля может быть рассчитана как

$$|\mathcal{E}_u| = E_B \cdot l = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = S \cdot \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right|, \quad (2.20)$$

где  $l = 2\pi R$  - длина силовой линии поля  $\vec{E}_B$  ( $R$  - радиус силовой линии);  $S = \pi R^2$  - площадь поверхности, охватываемой силовой линией  $\vec{E}_B$ ;  $\Delta B$  - изменение магнитной индукции, произошедшее за время  $\Delta t$ ;  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$  - скорость изменения магнитной индукции. Из

соотношения (2.20) следует, что напряженность вихревого электрического поля в рассматриваемом случае равна

$$E_B = \frac{\left(\frac{\Delta B}{\Delta t}\right) \cdot R}{2}. \quad (2.21)$$

## Самоиндукция

### Индуктивность.

Электрический ток  $I$ , протекая по замкнутому контуру, создает магнитное поле  $B \propto I$ , силовые линии которого пронизывают площадь, охватываемую этим контуром. Магнитный поток  $\Phi \propto B$  сквозь этот виток пропорционален силе текущего по нему тока  $I$ :

$$\Phi = LI, \quad (2.22)$$

где коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура.

Единица измерения индуктивности – генри:  $\text{Гн}$ .

Если рассматривать катушку, то потокосцепление равно

$$\Psi = LI. \quad (2.23)$$

Т.к. магнитный поток *зависит от формы, размеров и формы проводника и магнитных свойств среды*, в которой он находится, то и *индуктивность проводника* зависит от этих факторов.

Таким образом, индуктивность проводника определяется как

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad \text{или} \quad L = \frac{\Psi}{I}, \quad (2.24)$$

и численно равна магнитному потоку, создаваемому проводником при протекании в нем электрического тока силой 1 А.

**Явление самоиндукции** – это явление возникновения ЭДС индукции в контуре при изменении силы электрического тока, текущему по этому контуру (самоиндукция является частным случаем электромагнитной индукции). Если индуктивность проводника неизменна ( $L = \text{const}$ ), то, согласно закону Фарадея и выражению (2.23), ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы электрического тока:

$$\varepsilon_{cu} = -\frac{\Delta \Psi}{\Delta t} = -\frac{\Delta LI}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2.25)$$

где  $\Delta I = I_2 - I_1$  – изменение силы тока в проводнике, произошедшее за время  $\Delta t$ ;  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  – скорость изменения силы тока.

Самоиндукция подобна явлению инерции в механике. Индуктивность контура является мерой его «инертности» по отношению к изменению тока в контуре. *Благодаря явлению самоиндукции электрические токи при замыкании и размыкании электрических цепей (коммутации) изменяются не мгновенно, а постепенно.* Такие процессы в электротехнике называют *переходными*.

## Работа магнитного поля

(Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле)

На проводник с током в магнитном поле действуют силы, определяемые законом Ампера. Если проводник не закреплен (например, одна из сторон контура изготовлена в виде подвижной перемычки, (рис. 2.13), то под действием силы Ампера он будет в магнитном поле перемещаться. Следовательно, магнитное поле совершает работу по перемещению проводника с током.

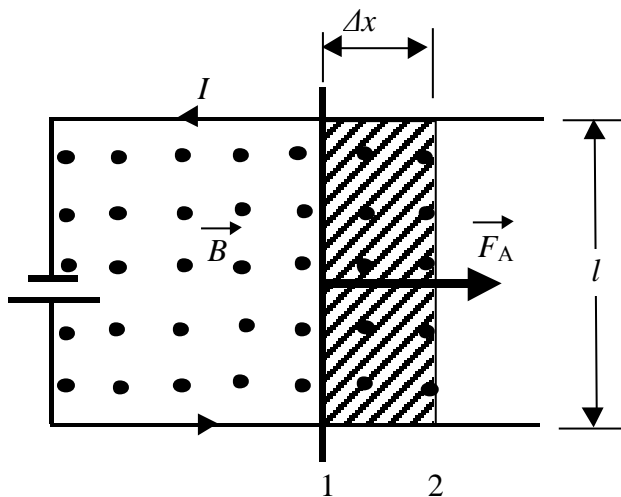


Рисунок 2.13 – Перемещение проводника с током в магнитном поле

Для определения этой работы рассмотрим проводник длиной  $l$  с током  $I$  (он может свободно перемещаться), помещенный в однородное внешнее магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура. Сила, направление которой определяется по правилу левой руки, а значение - по закону Ампера (2.6), равна

$$F = IBl.$$

Под действием этой силы проводник переместится параллельно самому себе на отрезок  $\Delta x$  из положения 1 в положение 2. Работа, совершаемая магнитным полем, равна

$$A = F_A \cdot \Delta x = IBl \cdot \Delta x = IB \cdot \Delta S = I \cdot \Delta \Phi. \quad (2.26)$$

Таким образом, работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока  $I$  на магнитный поток  $\Delta \Phi$ , *пересеченный движущимся проводником*. Полученная формула справедлива и для произвольного направления вектора  $\vec{B}$ .

Вычислим работу по перемещению замкнутого контура с постоянным током  $I$  в магнитном поле. Предположим, что контур  $M$  перемещается в плоскости чертежа и в результате перемещения займет положение  $M'$ , изображенное на рисунке 10 штриховой линией. Направление тока в контуре (по часовой стрелке) и магнитного поля (перпендикулярно плоскости чертежа – за чертеж) указано на рисунке. Контур  $M$  мысленно разобьем на два соединенных своими концами проводника:  $ABC$  и  $CDA$ .

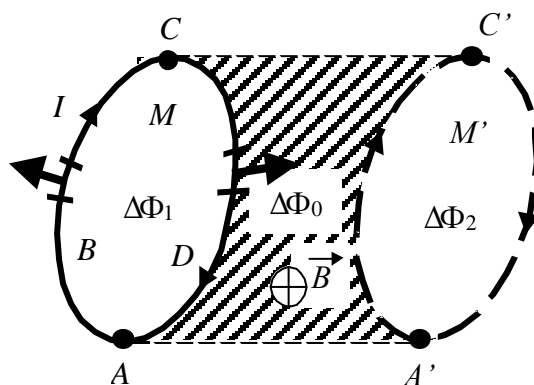


Рисунок 2.14 – Перемещение контура с током в магнитном поле

Работа, совершаемая силами Ампера при рассматриваемом перемещении контура в магнитном поле, равна алгебраической сумме работ по перемещению проводников ABC ( $A_1$ ) и CDA ( $A_2$ ), т.е.

$$A = A_1 + A_2.$$

Силы, приложенные к участку CDA контура, образуют с направлением перемещения острые углы, поэтому совершаемая ими работа  $A_2 > 0$ . Эта работа, как известно, равна произведению силы тока  $I$  в контуре на пересеченный проводником CDA магнитный поток. Проводник CDA пересекает при своем движении поток  $\Delta\Phi_0$  сквозь заштрихованную поверхность, и поток  $\Delta\Phi_2$ , пронизывающий контур в его конечном положении. Следовательно,

$$A_2 = I(\Delta\Phi_0 + \Delta\Phi_2).$$

Силы, действующие на участок ABC контура, образуют с направлением перемещения тупые углы, поэтому совершаемая ими работа  $A_1 < 0$ . Проводник ABC пересекает при своем движении поток  $\Delta\Phi_0$  сквозь заштрихованную поверхность, и поток  $\Delta\Phi_1$ , пронизывающий контур в начальном положении. Следовательно,

$$A_1 = -I(\Delta\Phi_0 + \Delta\Phi_1).$$

Тогда работы получим выражение:

$$A = I(\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1) = I \cdot \Delta\Phi', \quad (2.27)$$

где  $\Delta\Phi' = \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1$  - изменение магнитного потока сквозь площадь, ограниченную контуром с током. Полученная формула справедлива для контура любой формы в произвольном магнитном поле.

### Энергия магнитного поля.

Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии.

Рассмотрим следующую ситуацию. Имеем катушку индуктивности, включенную параллельно лампе накаливания к источнику тока. При отключении катушки от источника тока лампа дает кратковременную вспышку. Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.



Для упрощения расчёта рассмотрим такой случай, когда после отключения катушки от источника ток в цепи убывает со временем по линейному закону. В этом случае ЭДС самоиндукции имеет постоянное значение, равное

$$\varepsilon_{cu} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t},$$

где  $t$  – промежуток времени, за который сила тока в цепи убывает от начального значения  $I$  до 0.

За время  $t$  при линейном убывании силы тока от  $I$  до 0 в цепи проходит электрический заряд:

$$q = I_{cp} t = \frac{I}{2} t,$$

поэтому работа электрического тока равна

$$A = q \varepsilon_{cu} = \frac{It}{2} \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}.$$

Эта работа совершается за счёт энергии магнитного поля катушки. Следовательно, энергия магнитного поля проводника с индуктивностью  $L$  и током  $I$  равна (с учетом выражения (2.24))

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}. \quad (2.28)$$

## Основные законы и формулы

Таблица 2.1 Основные законы и формулы

Название закона (формулы)	Математическая запись закона, формула
Принцип суперпозиции магнитных полей	$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$
Механический (вращающий) момент сил, действующий на рамку с током в магнитном поле	$M = ISB \sin \alpha$
Сила Ампера	$F_A = IBl \sin \alpha$
Сила Лоренца	$F_L =  q Bv \sin \alpha$
Радиус при движении заряда по окружности	$F_L = F_{цс},$ $ q Bv = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow$ $R = \frac{mv}{ q B} = \frac{v}{q'B}.$
Период обращения частицы в магнитном поле	$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{ q B} = \frac{2\pi}{q'B}$
Движение по винтовой траектории	$r = \frac{mv_{\perp}}{ q B} = \frac{mv \sin \alpha}{ q B},$ $h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{ q B} = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{ q B}$
Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ )	$F_E = qE, F_L = qBv.$ $F_E = F_L, qE = qBv \Rightarrow$ $E = vB.$

Магнитный поток	$\Phi = BS \cos \alpha$
Потокоцепление катушки	$\Psi = N\Phi$
Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)	$ \varepsilon_u  = \left  \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right $ или $\varepsilon_u = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
ЭДС индукции в движущемся проводнике	$\Delta\varphi = \varepsilon_u = Blv \sin \alpha \cos \beta$
Напряженность вихревого электрического поля	$ \varepsilon_u  = E_B \cdot l = \left  \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right  = S \cdot \left  \frac{\Delta B}{\Delta t} \right , \Rightarrow E_B = \frac{\left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \cdot R}{2}$ $l = 2\pi R, \quad S = \pi R^2$
Индуктивность проводника	$L = \frac{\Phi}{I}$ или $L = \frac{\Psi}{I}$
ЭДС самоиндукции	$\varepsilon_{cu} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$
Работа по перемещению проводника и контура с током в магнитном поле	$A = I \cdot \Delta\Phi$
Энергия магнитного поля	$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$