

**Группа 19. Физика**

**Дата: 29.01.2022**

**Уроки № 85, 86**

Тип урока: комбинированный спаренный урок

**Темы уроков:**

**Направление индукционного тока. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции.**  
**Вихревое электрическое поле. ЭДС индукции в движущихся проводниках.**

**Цели урока:**

**Предметные:**

- научиться определять направление индукционного тока по правилу Ленца;
- знакомство с понятием «вихревое электрическое поле».

**Развивающая:**

- развитие логического мышления, смекалки; формирование интереса к физическому эксперименту;
- активизация творческого мышления учащихся; умение анализировать, делать выводы.

**Воспитывающая:**

- воспитать интерес к физике для познаваемости мира и объективности наших знаний о нем.

**Деятельностная:**

- формирование у студентов способностей к самостоятельному построению новых способов действия на основе метода рефлексивной самоорганизации.

**Образовательная:**

- расширение понятийной базы по учебному предмету за счет включения в нее новых элементов.

**Задание:**

***Ознакомиться с текстом по теме урока. Написать в тетради краткий конспект. Ответить на контрольные вопросы.***

---

**План конспекта:**

1. Взаимодействие индукционного тока с магнитом
  2. Правило Ленца
  3. Закон электромагнитной индукции
  4. Электродвижущая сила
  5. Вихревое электрическое поле
  6. Индукционные токи в массивных проводниках
  7. Применение ферритов
  8. ЭДС индукции в движущихся проводниках
-

## Направление индукционного тока. Правило Ленца

Присоединив катушку, в которой возникает индукционный ток, к гальванометру, можно обнаружить, что направление этого тока зависит от того, приближается ли магнит к катушке (например, северным полюсом) или удаляется от нее (см. рис. 2.2, б).

Возникающий индукционный ток того или иного направления как-то взаимодействует с магнитом (притягивает или отталкивает его). Катушка с проходящим по ней током подобна магниту с двумя полюсами — северным и южным. Направление индукционного тока определяет, какой конец катушки выполняет роль северного полюса (линии магнитной индукции выходят из него). На основе закона сохранения энергии можно предсказать, в каких случаях катушка будет притягивать магнит, а в каких отталкивать его.

### Взаимодействие индукционного тока с магнитом

Если магнит приближать к катушке, то в ней появляется индукционный ток такого направления, что магнит обязательно отталкивается. Для сближения магнита и катушки нужно совершить положительную работу. Катушка становится подобной магниту, обращенному одноименным полюсом к приближающемуся к ней магниту. Одноименные же полюса отталкиваются.

При удалении магнита, наоборот, в катушке возникает ток такого направления, чтобы появилась притягивающая магнит сила.

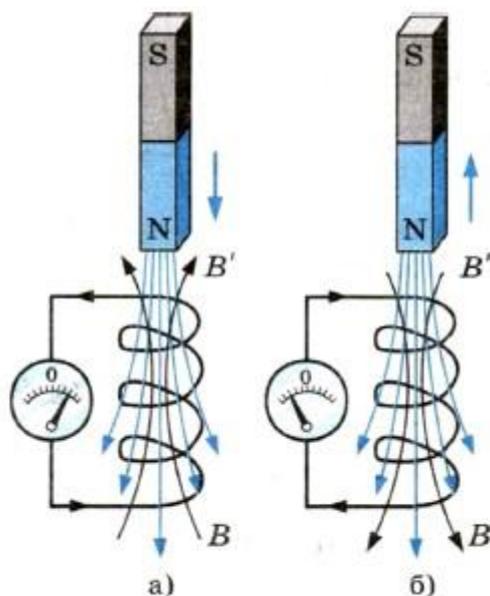


Рис. 2.5

В чем состоит различие двух опытов: приближение магнита к катушке и его удаление? В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих витки катушки, или, что то же самое, магнитный поток, увеличивается (рис. 2.5, а), а во втором случае уменьшается (рис. 2.5, б). Причем в первом случае линии индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля, созданного возникшим в катушке индукционным током, выходят из верхнего конца катушки, так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Эти линии магнитной индукции на рисунке 2.5 изображены черным цветом. В

случае а катушка с током аналогична магниту, северный полюс которого находится сверху, а в случае б — снизу.

Аналогичные выводы можно сделать с помощью опыта, показанного на рисунке 2.6. На концах стержня, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, закреплены два проводящих алюминиевых кольца. Одно из них с разрезом.

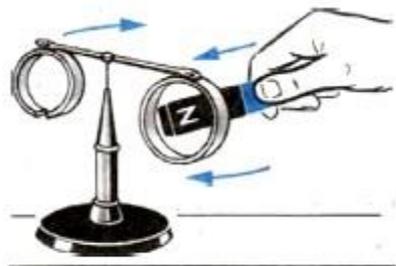


Рис. 2.6

С разрезанным кольцом магнит не взаимодействует, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока. Отталкивает или притягивает катушка магнит, это зависит от направления индукционного тока в ней. Поэтому закон сохранения энергии позволяет сформулировать правило, определяющее направление индукционного тока.

### Правило Ленца

Теперь мы подошли к главному: при увеличении магнитного потока через витки катушки индукционный ток имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует усилению магнитного потока через витки катушки. Ведь линии индукции  $\vec{B}'$  этого поля направлены против линий индукции  $\vec{B}$  поля, изменение которого порождает электрический ток. Если же магнитный поток через катушку ослабевает, то индукционный ток создает магнитное поле с индукцией  $\vec{B}'$  увеличивающее магнитный поток через витки катушки.

В этом и состоит сущность общего правила определения направления индукционного тока, которое применимо во всех случаях. Это правило было установлено русским физиком Э. Х. Ленцем.

Согласно правилу Ленца возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван. Более кратко это правило можно сформулировать следующим образом: индукционный ток направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызывающей.

Применять правило Ленца для нахождения направления индукционного тока в контуре надо так:

1. Определить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля.
2. Выяснить, увеличивается ли поток вектора магнитной индукции этого поля через поверхность, ограниченную контуром ( $\Delta\Phi > 0$ ), или уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ).

3. Установить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля индукционного тока. Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям магнитной индукции  $\vec{B}$  при  $\Delta\Phi > 0$  и иметь одинаковое с ними направление при  $\Delta\Phi < 0$ .

4. Зная направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$ , найти направление индукционного тока, пользуясь правилом буравчика.

---

Направление индукционного тока определяется с помощью закона сохранения энергии. Индукционный ток во всех случаях направлен так, чтобы своим магнитным полем препятствовать изменению магнитного потока, вызывающего данный индукционный ток.

### Закон электромагнитной индукции

Сформулируем закон электромагнитной индукции количественно. Опыты Фарадея показали, что сила индукционного тока  $I_i$  в проводящем контуре пропорциональна скорости изменения числа линий магнитной индукции  $\vec{B}$ , пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Более точно это утверждение можно сформулировать, используя понятие «магнитный поток».

Магнитный поток можно графически представить как число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность площадью  $S$ . Чем больше индукция магнитного поля, тем большее число линий магнитной индукции пронизывает эту поверхность. Поэтому скорость изменения этого числа есть не что иное, как скорость изменения магнитного потока.

Если за малое время  $\Delta t$  магнитный поток меняется на  $\Delta\Phi$ , то скорость изменения магнитного потока равна  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Поэтому утверждение, которое вытекает непосредственно из опыта, можно сформулировать так: сила индукционного тока пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:

$$I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

### ЭДС индукции

Известно, что в цепи появляется электрический ток в том случае, когда на свободные заряды проводника действуют сторонние силы. Величину, численно равную работе этих сил при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура, называют **электродвижущей силой**.

Следовательно, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в контуре появляются сторонние силы, действие которых характеризует ЭДС, называемая **ЭДС индукции**. Обозначают ее буквой  $\mathcal{E}_i$ .

Согласно закону Ома для замкнутой цепи  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ . Сопротивление проводника не зависит от изменения магнитного потока. Следовательно, соотношение (2.3) справедливо только потому, что ЭДС индукции пропорциональна  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Закон электромагнитной индукции формулируется именно для ЭДС, а не для силы индукционного тока, т. к. сила тока зависит и от свойств проводника, а ЭДС определяется только изменением магнитного потока. Согласно закону электромагнитной индукции **ЭДС индукции в замкнутом контуре равна по модулю скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром:**

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Как в законе электромагнитной индукции учесть направление индукционного тока (или знак ЭДС индукции) в соответствии с правилом Ленца?



Рис. 2.7

На рисунке 2.7 изображен замкнутый контур. Будем считать положительным направление обхода контура против часовой стрелки. Нормаль  $\vec{n}$  к контуру образует правый винт с направлением обхода.

Пусть магнитная индукция  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля направлена вдоль нормали к контуру и возрастает со временем.

Тогда  $\Phi > 0$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ . Согласно правилу Ленца индукционный ток создает магнитный поток  $\Phi' < 0$ . Линии индукции  $B'$  магнитного поля индукционного тока изображены на рисунке 2.7 черным цветом. Следовательно, индукционный ток согласно правилу буравчика направлен по часовой стрелке (против направления положительного обхода) и ЭДС индукции отрицательна. Поэтому в формуле для закона

электромагнитной индукции должен стоять знак «-», указывающий на то, что  $\mathcal{E}_i$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  имеют разные знаки:

$$\boxed{\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} \quad (2.4)$$

ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока.

### Вихревое электрическое поле

Магнитный поток  $\Phi = BS \cos \alpha$ . Изменение магнитного потока через контур может происходить: 1) в случае неподвижного проводящего контура, помещенного в изменяющееся во времени поле; 2) в случае проводника, движущегося в магнитном поле,

которое может и не меняться со временем. Значение ЭДС индукции в обоих случаях определяется законом (2.4), но происхождение этой ЭДС различно.

Рассмотрим сначала первый случай возникновения индукционного тока. Поместим круговой проволочный виток радиусом  $r$  в переменное во времени однородное магнитное поле (рис. 2.8). Пусть индукция магнитного поля увеличивается, тогда будет увеличиваться со временем и магнитный поток через поверхность, ограниченную витком. Согласно закону электромагнитной индукции в витке появится индукционный ток. При изменении индукции магнитного поля по линейному закону индукционный ток будет постоянен.

Какие же силы заставляют заряды в витке двигаться? Само магнитное поле, пронизывающее катушку, этого сделать не может, так как магнитное поле действует исключительно на движущиеся заряды (этим-то оно и отличается от электрического), а проводник с находящимися в нем электронами неподвижен.

Кроме магнитного поля, на заряды, причем как на движущиеся, так и на неподвижные, действует еще электрическое поле. Но ведь те поля, о которых пока шла речь (электростатическое или стационарное), создаются электрическими зарядами, а индукционный ток появляется в результате действия меняющегося магнитного поля. Поэтому можно предположить, что *электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается меняющимся магнитным полем*. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля: **изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле**. К этому выводу впервые пришел Дж. Максвелл.

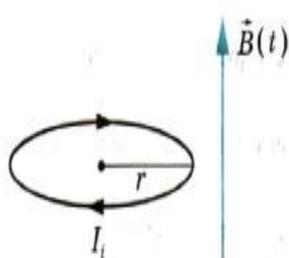


Рис. 2.8

Теперь явление электромагнитной индукции предстает перед нами в новом свете. Главное в нем — это процесс порождения полем магнитного поля электрического. При этом наличие проводящего контура, например катушки, не меняет существа процесса. Проводник с запасом свободных электронов (или других частиц) играет роль прибора: он лишь позволяет обнаружить возникающее электрическое поле. Поле приводит в движение электроны в проводнике и тем самым обнаруживает себя. Сущность явления электромагнитной индукции в неподвижном проводнике состоит не столько в появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

появлении индукционного тока, сколько в возникновении электрического поля, которое приводит в движение электрические заряды.

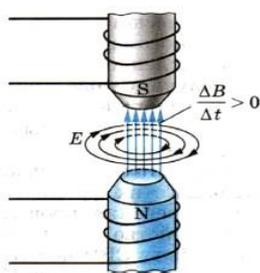


Рис. 2.9

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое.

Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряженности не могут на них начинаться и кончаться. Они вообще нигде не начинаются и не кончаются, а представляют собой замкнутые линии, подобные линиям индукции магнитного поля. Это так называемое вихревое электрическое поле (рис. 2.9).

Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряженность электрического поля. Согласно правилу Ленца при возрастании магнитной индукции  $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} > 0\right)$  направление вектора напряженности  $\vec{E}$  электрического поля образует *левый* винт с направлением вектора  $\vec{B}$ . Это означает, что при вращении винта с левой нарезкой в направлении линий напряженности электрического поля поступательное перемещение винта совпадает с направлением вектора магнитной индукции. Напротив, при *убывании* магнитной индукции  $\left(\frac{\Delta B}{\Delta t} < 0\right)$  направление вектора напряженности  $\vec{E}$  образует *правый* винт с направлением вектора  $\vec{B}$ .

Направление силовых линий напряженности  $\vec{E}$  совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд  $q$  (сторонняя сила), по-прежнему равна  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Но в отличие от случая стационарного электрического поля работа вихревого поля по перемещению заряда  $q$  на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряженности электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению. **Работа вихревого электрического поля** при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

### **Индукционные токи в массивных проводниках**

---

Особенно большого числового значения индукционные токи достигают в массивных проводниках, из-за того, что их сопротивление мало.

Такие токи, называемые *токами Фуко* по имени исследовавшего их французского физика, можно использовать для нагревания проводников. На этом принципе основано устройство индукционных печей, например используемых в быту СВЧ-печей. Также этот принцип используется для плавки металлов. Кроме этого явление электромагнитной индукции используется в детекторах металла, устанавливаемых при входах в здания аэровокзалов, театров и т. д.

Однако во многих устройствах возникновение токов Фуко приводит к бесполезным и даже нежелательным потерям энергии на выделение тепла. Поэтому железные сердечники трансформаторов, электродвигателей, генераторов и т. д. делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Поверхности пластин должны быть перпендикулярны направлению вектора напряженности вихревого электрического поля. Сопротивление электрическому току пластин будет при этом максимальным, а выделение тепла — минимальным.

### **Применение ферритов**

---

Радиоэлектронная аппаратура работает в области очень высоких частот (миллионы колебаний в секунду). Здесь применение сердечников катушек из отдельных пластин уже не дает нужного эффекта, так как большие токи Фуко возникают в каждой пластине.

В § 7 отмечалось, что существуют магнитные изоляторы — ферриты. При перемагничивании в ферритах не возникают вихревые токи. В результате потери энергии на выделение в них тепла сводятся к минимуму. Поэтому из ферритов делают сердечники высокочастотных трансформаторов, магнитные антенны транзисторов и др. Ферритовые сердечники изготавливают из смеси порошков исходных веществ. Смесь прессуется и подвергается значительной термической обработке.

При быстром изменении магнитного поля в обычном ферромагнетике возникают индукционные токи, магнитное поле которых, в соответствии с правилом Ленца, препятствует изменению магнитного потока в сердечнике катушки. Из-за этого поток магнитной индукции практически не меняется и сердечник не перемагничивается. В ферритах вихревые токи очень малы, поэтому их можно быстро перемагничивать.

---

Наряду с потенциальным кулоновским электрическим полем существует вихревое электрическое поле. Линии напряженности этого поля замкнуты. Вихревое поле порождается меняющимся магнитным полем.

### ЭДС индукции в движущихся проводниках

Рассмотрим теперь второй случай возникновения индукционного тока.

При движении проводника его свободные заряды движутся вместе с ним. Поэтому на заряды со стороны магнитного поля действует сила Лоренца. Она-то и вызывает перемещение зарядов внутри проводника. ЭДС индукции, следовательно, имеет магнитное происхождение.

На многих электростанциях земного шара именно сила Лоренца вызывает перемещение электронов в движущихся проводниках.

Вычислим ЭДС индукции, возникающую в проводнике, движущемся в однородном магнитном поле (рис. 2.10). Пусть сторона контура MN длиной  $l$  скользит с постоянной скоростью  $\vec{v}$  вдоль сторон NC и MD, оставаясь все время параллельной стороне CD.

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  однородного поля перпендикулярен проводнику и составляет угол  $\alpha$  с направлением его скорости.

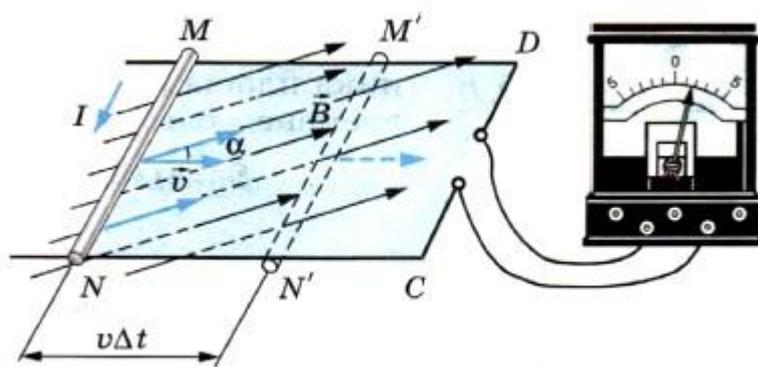


Рис. 2.10

Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, равна по модулю

$$F_L = |q|v B \sin \alpha. \quad (2.5)$$

Направлена эта сила вдоль проводника MN. Работа силы Лоренца<sup>1</sup> на пути l положительна и составляет:

$$A = F_L l = |q| v B l \sin \alpha.$$

<sup>1</sup> Это неполная работа силы Лоренца. Кроме силы Лоренца (см. формулу (2.5)), имеется составляющая силы Лоренца, направленная против скорости и проводника. Эта составляющая тормозит движение проводника и совершает отрицательную работу. В результате полная работа силы Лоренца оказывается равной нулю.

Электродвижущая сила индукции в проводнике MN равна, по определению, отношению работы по перемещению заряда q к этому заряду:

$$\mathcal{E}_i = \frac{A}{|q|} = v B l \sin \alpha. \quad (2.6)$$

Эта формула справедлива для любого проводника длиной l, движущегося со скоростью  $\vec{v}$  в однородном магнитном поле.

В других проводниках контура ЭДС равна нулю, так как эти проводники неподвижны. Следовательно, ЭДС во всем контуре MNCD равна  $\mathcal{E}_i$  и остается неизменной, если скорость движения  $\vec{v}$  постоянна. Электрический ток при этом будет увеличиваться, так как при смещении проводника MN вправо уменьшается общее сопротивление контура.

### Контрольные вопросы:

1. Как определяется направление индукционного тока?
  2. Возникнет ли в кольце с разрезом электрическое поле, если подносить к нему магнит?
- Что называется магнитным потоком (потоком магнитной индукции)?
3. Почему закон электромагнитной индукции формулируется для ЭДС, а не для силы тока?
  4. Почему в формуле для закона электромагнитной индукции стоит знак «—»?
  5. В чем отличие вихревого электрического поля от электростатического или стационарного?
  6. Что такое токи Фуко?
  7. В чем преимущества ферритов по сравнению с обычными ферромагнетиками?

---

### **Литература:**

Мякишев Г. Я. Физика 10 класс. Учебник для общеобразовательных учреждений. М., 2010. §10 упр. 1-2, §11 упр. 1-4; §12 упр. 1-4; §13 упр. 1-2