

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ

ЭЛЕКТРО- МАГНЕТИЗМА

Учебное пособие

**Издательство
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»**

Содержание:

1. [Магнитное поле и электромагнитная индукция](#)
2. [Магнитное поле](#)
3. [Направление магнитного поля](#)
4. [Магнитное поле прямолинейного тока](#)
5. [Магнитное поле кругового тока](#)
6. [Магнитное поле катушки с током](#)
7. [Действие магнитного поля на проводник с током](#)
8. [Индукция магнитного поля](#)
9. [Намагничивание железа](#)
10. [Магнитный поток](#)
11. [Электромагниты и их применение](#)
12. [Электромагнитное реле](#)
13. [Электроизмерительные приборы](#)
14. [Электромагнитный осциллограф](#)
15. [Микрофон и телефон](#)
16. [Громкоговоритель](#)
17. [Магнитное поле Земли](#)
18. [Явление электромагнитной индукции](#)
19. [Объяснение возникновения э. д. с. индукции на основе электронной теории](#)
20. [Направление индукционного тока. Закон Ленца](#)
21. [Величина электродвижущей силы индукции](#)
22. [Правило правой руки](#)
23. [Вихревые токи](#)
24. [Самоиндукция](#)
25. [Индуктивность катушки](#)
26. [Индукция магнитного поля тока. Магнитная проницаемость](#)
27. [Взаимодействие параллельных токов](#)
28. [Напряжённость магнитного поля](#)
29. [Магнитные свойства вещества](#)
30. [Явление магнитного гистерезиса](#)
31. [Применение магнитных материалов](#)
32. [Природа магнитных свойств вещества](#)
33. [Энергия магнитного поля катушки](#)

Магнитное поле - это поле, порождаемое магнитом или проводником, по которому бежит электрический ток.

Электромагнитная индукция — явление возникновения электрического тока, электрического поля или электрической поляризации при изменении **магнитного** поля во времени или при движении материальной среды в **магнитном** поле. **Электромагнитная индукция** была открыта Майклом Фарадеем 29 августа 1831 года. Он обнаружил, что электродвижущая сила (ЭДС), возникающая в замкнутом проводящем контуре, пропорциональна скорости изменения **магнитного** потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

Магнитное поле и электромагнитная индукция

Магнитное поле можно назвать особым видом материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами или телами, обладающими **магнитным** моментом. В специальной теории относительности **магнитные поля** являются необходимым следствием существования электрических **полей**.

Электромагнитная индукция – явление возникновения тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего его.

Магнитное поле

Ранее рассматривая взаимодействие наэлектризованных тел, мы ознакомились с существованием вокруг электрических зарядов электрического поля. Было установлено, что везде, где имеется электрический заряд, в пространстве вокруг него существует электрическое поле. Мы знаем также, что под действием сил электрического поля происходит движение заряженных частичек — электронный ток в металлах и вакууме и ионный ток в жидкостях и газах.

При изучении явлений, сопровождающих прохождение электрического тока по проводникам, мы встречаемся с такими свойствами электрических зарядов, которые присущи им только в состоянии движения.

Одно из важнейших свойств движущихся зарядов проявляется во взаимодействии проводников, по которым проходит электрический ток. Ознакомимся с этим явлением на опыте.

Расположим два гибких прямых проводника параллельно друг другу, подвесив их, например, к какой-нибудь стойке. При пропускании тока по проводникам они будут взаимодействовать между собой — притягиваться или отталкиваться.

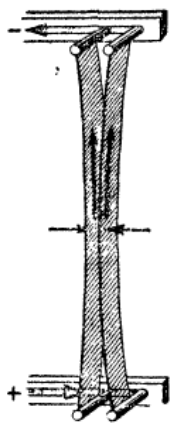


Рис. 121. Проводники притягиваются, если токи в них направлены в одну сторону.

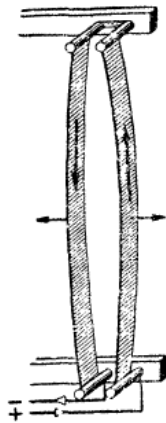


Рис. 122. Проводники отталкиваются, если токи в них направлены в противоположные стороны.

Притягиваются проводники тогда, когда токи в них направлены в одну сторону (рис. 121), и отталкиваются при противоположных направлениях токов (рис. 122).

Как же происходит этот процесс взаимодействия проводников с токами?

Рассмотрим сначала, не является ли наблюдаемое нами явление результатом взаимодействия электрических зарядов, находящихся в проводниках, которое мы наблюдали при равновесии зарядов. Проверим наше предположение на опыте. Соединим один из проводников с положительным полюсом источника тока, а другой — с отрицательным, цепь же разомкнём. На проводниках при этом сосредоточатся разноимённые электрические заряды, вокруг которых будет существовать электрическое поле. Электрическое же взаимодействие между проводниками столь слабо, что его даже невозможно обнаружить глазом. Но стоит

нам только замкнуть цепь, т. е. пропустить по проводникам ток. как тотчас же мы обнаружим отталкивание проводников друг от друга. Следовательно, взаимодействия покоящихся электрических зарядов, оно имеет иной характер. Чтобы выяснить причину этого взаимодействия, продолжим наше исследование.

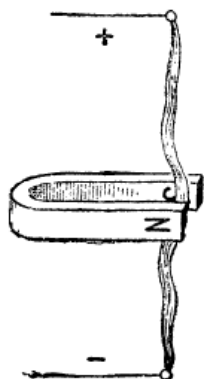


Рис. 123. Проводник, по которому течёт ток, отклоняется магнитом.

Повесим вертикально гибкий проводник (мишуру) и расположим его между полюсами магнита (рис. 123). Пропуская через проводник ток сверху вниз, мы заметим, что проводник отклонился вправо. При перемене местами полюсов магнита проводник отклоняется влево. Если переменить направление тока и пустить его снизу вверх, то и наблюдаемые отклонения проводника под влиянием магнита тоже переменят своё направление.

Проделаем ещё один опыт. Возьмём магнитную стрелку, установленную на острие, и расположим вдоль её оси проводник

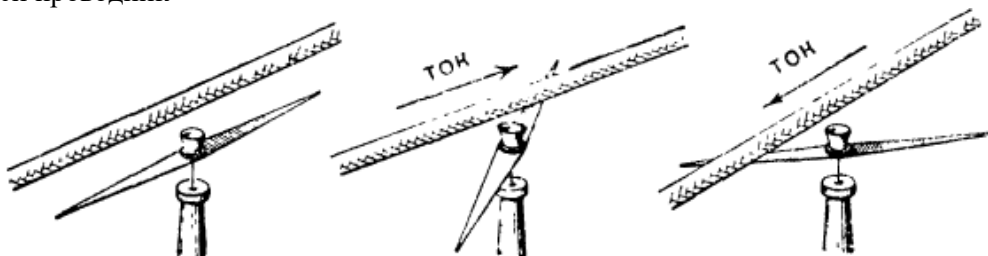


Рис. 124. Электрический ток действует на магнитную стрелку.

(рис. 124). При пропускании по нему тока стрелка отклоняется от своего первоначального положения.

Такой опыт, обнаруживший связь, существующую между электрическими и магнитными явлениями, впервые был проделан датским учёным Эрстедом в 1820 г.

Все эти опыты приводят нас к заключению, что силы, которые проявляются при взаимодействии токов, при действии магнита на ток или тока на магнит, имеют одну и ту же природу. Их называют магнитными силами. Источником магнитных сил является магнитное поле, существующее в пространстве, окружающем магниты и проводники с токами.

Итак, между движущимися электрическими зарядами, кроме электрических сил, действуют ещё и магнитные силы.

Изучение разнообразных магнитных явлений показало, *что всюду, где есть электрический ток, т. е. движущиеся электрические заряды, существует и магнитное поле.* Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Так как магнитное поле возникает вокруг проводника, когда в последнем появляется ток, то ток часто рассматривается как источник магнитного поля. В этом смысле надо понимать выражения: «магнитное поле, созданное током», «магнитное поле тока» и т. п.

Направление магнитного поля

Расположим проволочную катушку вблизи магнитной стрелки так, чтобы ось катушки была перпендикулярна оси стрелки (рис. 125, а). Пропустив по катушке ток, мы заметим, что под действием сил поля магнитная стрелка повернётся и установится вдоль оси катушки (рис. 125, б). Перемещая стрелку вокруг катушки с током, мы обнаружим, что в разных точках магнитного поля стрелка ориентируется по-разному.

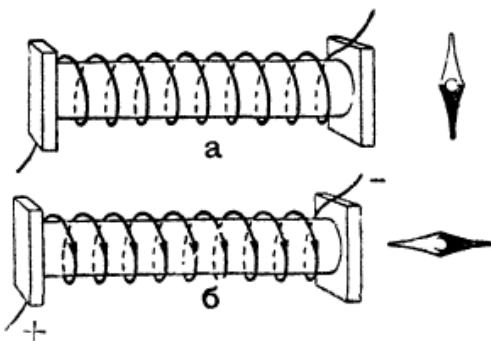


Рис. 125. Магнитная стрелка устанавливается вдоль оси катушки, если по последней проходит ток.

Ориентирующее действие магнитного поля на стрелку указывает на его направленность. Под направлением магнитного поля в данной точке мы будем понимать направление силы, действующей на северный полюс магнитной стрелки.

Рассмотрим теперь, зависит ли направление магнитного поля от направления тока в проводнике. Для этого сделаем опять опыт.

Расположим вокруг катушки с током в разных местах несколько небольших магнитных стрелок. Направление осей этих стрелок указывает на направление магнитного поля в местах их расположения (рис. 126). Изменим направление тока в катушке. Стрелки также изменят свои положения — каждая из них повернётся на 180° , т. е. изменит своё направление на противоположное (рис. 127). Значит, при перемене направления тока в проводнике меняется на противоположное и направление магнитного поля.

Следовательно, направление магнитного поля зависит от направления электрического тока, вокруг которого поле возникает.

Магнитное поле прямолинейного тока

Существование магнитного поля вокруг проводника с током можно обнаружить различными способами. Один из этих способов заключается в использовании железных опилок. В магнитном поле кусочки железа, из которых состоят железные опилки, становятся маленькими магнитными стрелочками. Каждая из этих стрелочек в магнитном поле устанавливается так, что её ось совпадает с направлением магнитного поля в данном месте. При помощи множества таких стрелочек можно увидеть, как изменяется направление сил,

действующих в магнитном поле, при переходе от одной точки поля к другой. Такое расположение железных опилок в магнитном поле называется магнитным спектром.

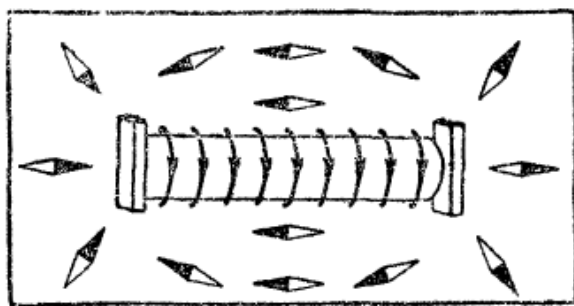


Рис. 126. Магнитные стрелки устанавливаются в направлении действия магнитных сил поля катушки.

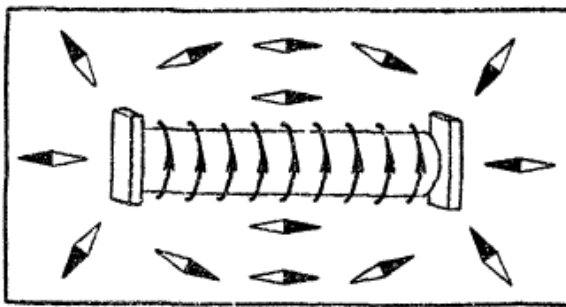


Рис. 127. При изменении направления тока в катушке стрелки поворачиваются на 180° .

Воспользуемся железными опилками и рассмотрим магнитное поле прямолинейного тока. Для этого пропустим проводник сквозь лист картона, а на картон насыплем тонкий слой железных опилок. Мы заметим, что при пропускании тока по проводнику опилки расположатся вокруг него по концентрическим окружностям (рис. 128).

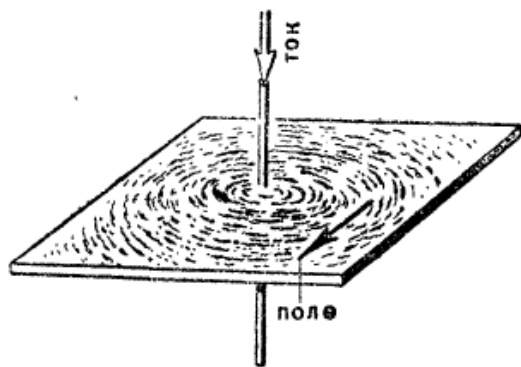


Рис. 128. Картина силовых линий магнитного поля прямого тока.

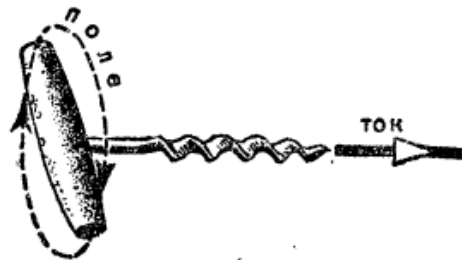


Рис. 129. Правило буравчика.

Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются оси маленьких магнитных стрелок, называются силовыми линиями магнитного поля.

С помощью силовых линий удобно изображать магнитные поля графически.

Силовая линия проводится так, что касательная к ней в любой её точке указывает направление силы, действующей в этой точке на северный полюс магнитной стрелки.

Цепочки, которые образуют в магнитном поле железные опилки, показывают форму силовых линий магнитного поля.

Силовые линии магнитного поля тока являются замкнутыми кривыми, охватывающими проводник. В частности, силовые магнитные линии прямого тока, как показывает расположение опилок на рисунке 128, представляют собой концентрические окружности, центры которых находятся на линии тока.

Для определения направления силовых линий магнитного поля тока в связи с направлением тока вместо опилок нужно воспользоваться магнитными стрелками. Поместив их вокруг проводника с током, мы определим направление силовых линий. При изменении направления тока в проводнике на противоположное магнитные стрелки поворачиваются на 180° , что указывает на соответствующее изменение направления силовых линий поля. На рисунке 128 стрелкой показано направление магнитного поля тока.

Направление силовых линий магнитного поля связано с направлением тока в проводнике простым правилом, предложенным английским учёным Максвеллом:

если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика при этом совпадает с направлением силовых линий магнитного поля, существующего вокруг проводника.

Это правило называется иногда правилом буравчика (рис.129).

Магнитное поле кругового тока

Возьмём теперь проводник, согнутый по окружности (рис. 130), и, пропустив по нему ток, будем опять наблюдать расположение опилок на картоне, установленном перпендикулярно к плоскости круга и проходящем через его центр.

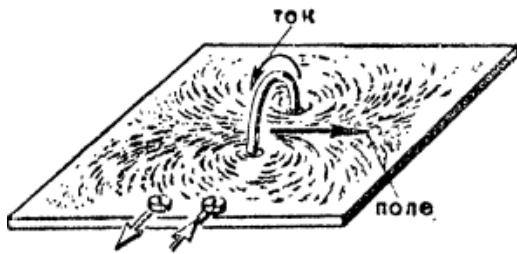


Рис. 130. Магнитное поле кругового тока.

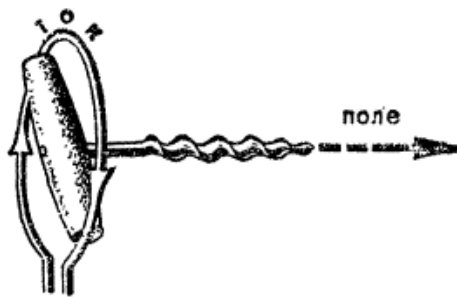


Рис. 131. Правило буравчика для кругового тока.

Мы обнаружим, что магнитные силовые линии уже не являются правильными окружностями, но и в этом случае все линии замыкаются, обходя проводник, по которому идёт ток. Таким образом, магнитные силовые линии тока всегда замыкаются вокруг тока.

Помещая в различные точки этого поля небольшие магнитные стрелки, можно определить направления силовых линий поля.

Правило буравчика применимо, конечно, и к круговому току, однако в этом случае удобнее поменять местами направление магнитного поля и направление тока (рис. 131). Действительно, если ручку буравчика вращать по току, то движение его острия покажет направление магнитного поля внутри кругового тока.

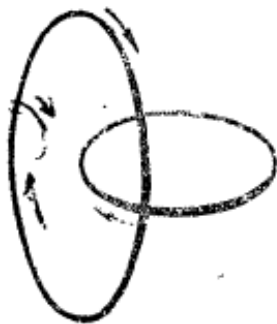


Рис. 132. Силовая линия магнитного поля и замкнутый ток.

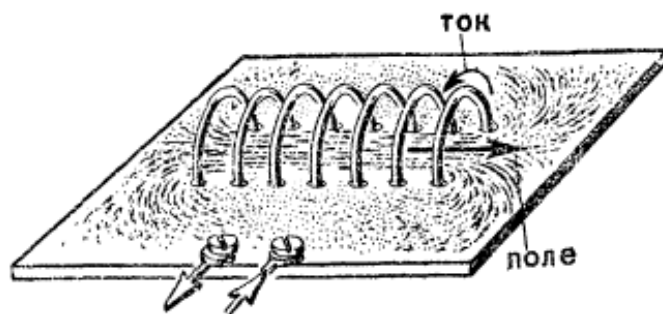


Рис. 133. Картина силовых линий магнитного поля соленоида.

Итак, *направление тока и силовых линий его магнитного поля суть два взаимно связанных направления.*

На рисунке 132 изображена картина сцепления силовой линии магнитного поля и силовой линии электрического поля внутри кругового проводника в виде колец со стрелками, указывающими направление магнитного поля и направление тока.

Магнитное поле катушки с током

Пропустим ток через катушку, состоящую из многих витков проволоки, называемую соленоидом. Магнитное поле, которое создаётся проходящим через эти витки электрическим током, можно представить себе как результат слияния магнитных полей токов в отдельных витках. Когда длина катушки значительно превосходит диаметр витков, то внутри этой катушки получается магнитное поле (рис. 133), силовые линии которого параллельны друг другу. На концах катушки силовые линии расходятся и замыкаются вне катушки. На рисунке 133 стрелка показывает направление силовой линии магнитного поля катушки.

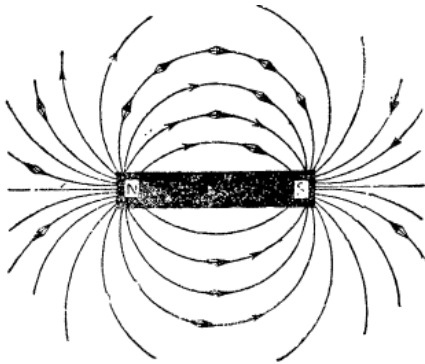


Рис. 134. Картина магнитного поля постоянного магнита.

Нетрудно подметить сходство между магнитным полем соленоида (вне его) и магнитным полем постоянного магнита (рис. 134). Можно условно считать, что силовые линии выходят с одной стороны катушки и входят в другую. Конец катушки, из которого силовые линии выходят, аналогичен северному полюсу магнита, другой же конец катушки, в который силовые линии входят, аналогичен южному магнитному полюсу.

Полюсы катушки с током на опыте легко определить с помощью магнитной стрелки.

Зная же направление тока в витках катушки, эти полюсы можно определить и по правилу буравчика. Вращая, как и в случае кругового тока, ручку буравчика по току, мы по движению его острия определим направление силовых линии магнитного поля катушки, а следовательно, и полюсы катушки.

Северным полюсом катушки будет тот её конец, на котором ток в витках катушки для наблюдателя, смотря на этот конец, будет соленоида, течь против часовой стрелки (рис. 135, а). Другой конец катушки будет южным полюсом, ток здесь будет обходить витки по часовой стрелке (рис. 135, б). Для перемены полюсов катушки достаточно изменить направление тока в ней.

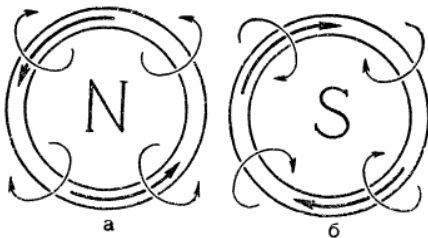


Рис. 135. Северный и южный полюсы соленоида.

Действие магнитного поля на проводник с током

Мы установили, что два проводника с токами взаимодействуют друг с другом. Это явление объясняется тем, что сила, которую испытывает каждый из проводников, обусловлена магнитным полем, создаваемым током другого проводника.

Следует ожидать поэтому, что если мы поместим проводник с током в магнитное поле, например в поле постоянного магнита, то на него будет действовать сила. Проверим это на опыте. Замкнув цепь, пропустим ток по свободно подвешенному проводнику AB , находящемуся в магнитном поле подковообразного магнита. Мы заметим, что проводник придёт в движение (рис. 136).

Уберём магнит, и проводник двигаться не будет. Значит, со стороны магнитного поля на проводник с током действует сила F так же, как действует сила со стороны магнитного поля на магнитную стрелку. Изменяя направление тока или направление силовых линий магнитного поля, мы замечаем, что меняется и направление движения проводника, а значит, и направление действующей на проводник силы.

Направление действующей на проводник с током силы в магнитном поле можно определить, пользуясь правилом левой руки. Руку располагают так, чтобы силовые линии поля входили в ладонь, четыре пальца были направлены по току; тогда отставленный на 90° большой палец расположится вдоль направления действующей на проводник силы (рис. 137).

Практически важное значение имеет вращение прямоугольной рамки с током в однородном магнитном поле. На рисунке 138 плоскость рамки $ABCD$ расположена параллельно силовым линиям поля. Направление тока показано стрелками.

Применяя правило левой руки, найдем, что на часть рамки AB действует сила F_1 направленная от нас за чертёж. К части рамки CD приложена сила F_2 , направленная от чертежа к нам. На части же рамки AC и BD , которые расположены вдоль силовых линий поля, силы не действуют. Силы F_1 и F_2 равны и параллельны друг другу, так как части рамки AB и CD одинаковы и параллельны. К рамке в целом, следовательно, приложена пара сил, под действием которой она повернётся и установится так, что плоскость её окажется перпендикулярной полю. В таком положении рамки вращающий момент, действующий на неё, равен нулю.

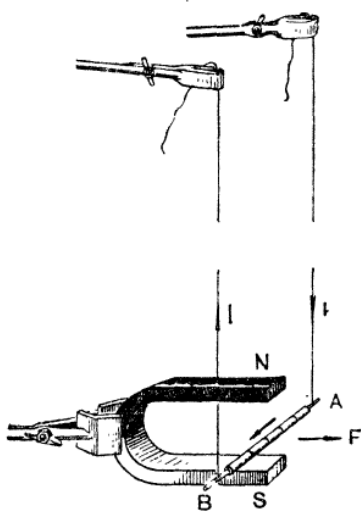


Рис. 136. Опыт, показывающий, что магнитное поле действует на проводник с током с некоторой силой.

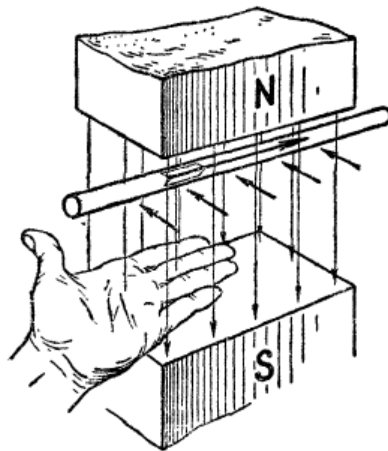


Рис. 137. К правилу левой руки.

Если бы в начале опыта ток в рамке был направлен в противоположную сторону, то и рамка повернулась бы в противоположную сторону.

Движение проводника с током в магнитном поле имеет огромное применение в технике: в электродвигателях, в измерительных приборах с вращающейся катушкой и во многих других устройствах. Некоторые из этих применений будут рассмотрены дальше.

Индукция магнитного поля

Мы знаем теперь, что на проводник с током в магнитном поле действует сила. Направление этой силы зависит от направления силовых линий поля и направления тока; если последние известны, то направление силы может быть определено по правилу левой руки.

Рассмотрим теперь, от чего зависит величина этой силы. Обратимся опять к опыту.

Подвесим к левому плечу коромысла рычажных весов линейный проводник AB и поместим его между полюсами N и S электромагнита (рис. 139) так, чтобы он был перпендикулярен силовым линиям магнитного поля. Последовательно с этим проводником включим амперметр, а также реостат, с помощью которого можно изменять ток в нашем проводнике (на рисунке 139 амперметр и реостат не показаны). Уравновесим весы и замкнём цепь. Пусть ток в проводнике AB направлен от B к A . Равновесие весов нарушится; чтобы его восстановить, на правую чашку придётся положить добавочный разновесок, вес которого будет равен силе, действующей на проводник вертикально вниз. Будем теперь изменять ток в нашем проводнике; мы заметим, что с увеличением тока увеличивается и сила, действующая на проводник. Измерения покажут нам, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник, прямо пропорциональна току, протекающему по нему.

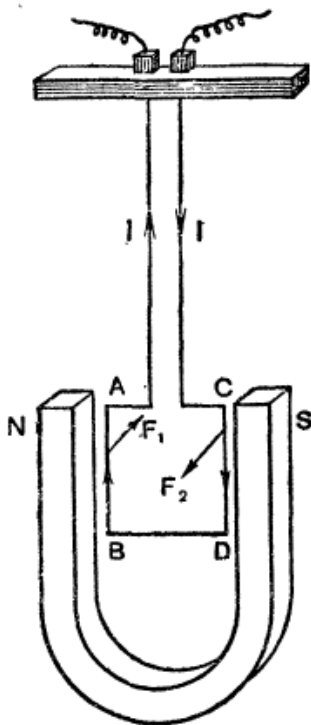


Рис. 138. На рамку с током в магнитном поле действует вращающий момент.

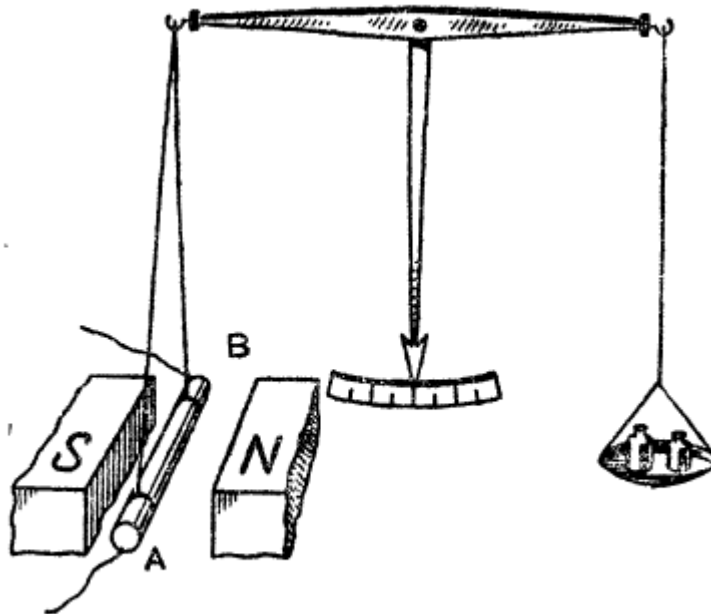


Рис. 139. Схема установки для определения индукции магнитного поля.

Зависит ли эта сила от длины проводника AB ? Чтобы решить этот вопрос, будем брать проводники разной длины при одном и том же токе. Измерения покажут нам, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, прямо пропорциональна длине части проводника, расположенной в магнитном поле.

Пусть F — сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, l — длина проводника и I — ток в нём.

С изменением длины проводника l и тока в нём меняется, как мы видели, и величина силы F .

Отношение же силы F к длине проводника l и к току в нём есть величина постоянная, не зависящая ни от длины проводнику, ни от тока в нём; следовательно, величина этого отношения может служить характеристикой магнитного поля.

Эту величину называют индукцией магнитного поля или просто магнитной индукцией.

Обозначим индукцию магнитного поля буквой B . Согласно определению, можно написать:

$$B = \frac{F}{l \cdot I}.$$

В системе единиц СИ за единицу индукции магнитного поля принимается индукция такого поля, в котором на проводник с током 1 а длиной 1 м действует, сила 1 н. Наименование

такой $1 \frac{\text{НЬЮТОН}}{\text{ампер} \cdot \text{метр}} \left(\text{сокращённо } 1 \frac{\text{Н}}{\text{а} \cdot \text{м}} \right).$

Покажем, что $1 \frac{\text{Н}}{\text{а} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2};$

$$1 \frac{\text{Н}}{\text{а} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{а} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{дж}}{\text{а} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{а} \cdot \text{сек}}{\text{а} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} = 1 \text{ тл (тесла)}.$$

Единица 1 вольт-секунда называется вебером (вб). Следовательно, единицей индукции магнитного поля

является $1 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}.$

Индукция магнитного поля — векторная величина. Направление вектора индукции в данной точке совпадает с направлением силовой магнитной линии, проходящей через эту точку.

В системе СИ индукция магнитного поля является силовой характеристикой магнитного поля, подобно тому как напряжённость электрического поля (§8) является силовой характеристикой электрического поля.

Зная индукцию магнитного поля, можно рассчитать силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля, по формуле:

$$F = BIl.$$

В общем случае $F = BIl \sin \alpha$, где α — угол между направлением тока (I) и вектором индукции магнитного поля (B).

Намагничивание железа

Мы знаем, что если внутрь катушки, по которой идёт электрический ток, вставить железный стержень, то он приобретёт свойства притягивать железные предметы и взаимодействовать с токами и другими магнитами, т. е. на магнитится. Рассмотрим это явление подробнее.

Установим вблизи катушки K вертикально расположенную железную стрелку C , могущую вращаться вокруг горизонтальной оси O (рис. 140). При пропускании тока через катушку мы заметим, что стрелка отклоняется на некоторый угол. Отодвинем катушку от стрелки на такое расстояние, чтобы отклонение стрелки стало едва заметным.

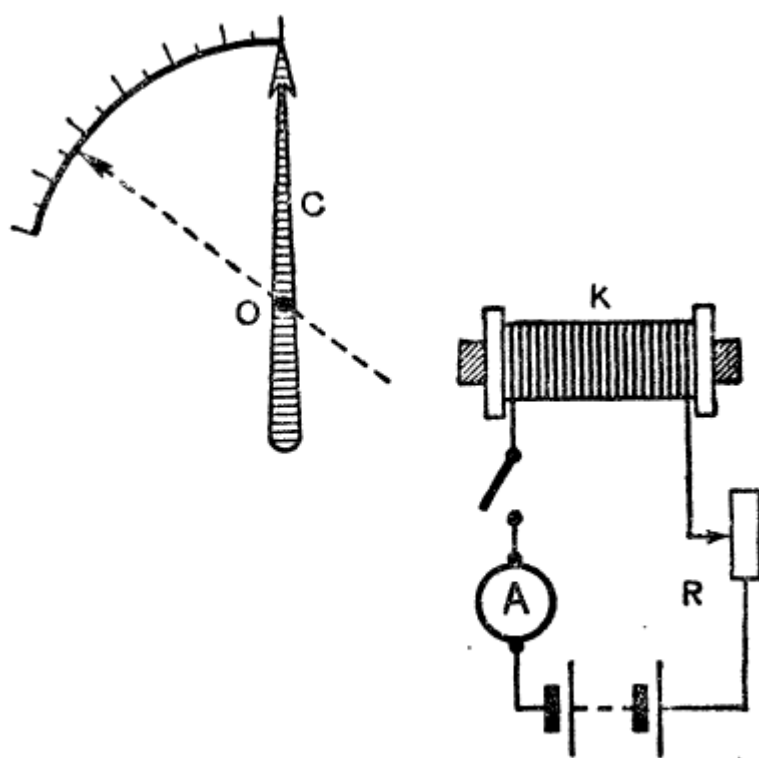


Рис. 140. Схема установки для изучения намагничивания железа.

Изменяя сопротивление цепи с помощью реостата R , усилим ток в катушке; стрелка снова отклонится на некоторый угол. Увеличивая число витков в катушке, мы можем получить такое же отклонение стрелки и без увеличения тока в ней. В обоих этих случаях усиливается магнитное поле катушки, в частности увеличивается индукция поля в месте нахождения стрелки.

Но можно достигнуть такого же усиления магнитного поля катушки и не увеличивая ни тока, ни числа витков в катушке. Для этого достаточно ввести внутрь катушки сердечник из мягкого железа.

В каком бы месте около катушки мы ни помещали стрелку, всюду её отклонение при введении железного сердечника внутрь катушки больше, чем без него.

Итак, железный сердечник, помещённый в катушку, производит такое же магнитное действие, какое получается при увеличении тока в катушке или при увеличении числа витков в ней, или при одновременном увеличении того и другого.

Произведение тока в амперах на число витков катушки называется ампер-витками. Пользуясь этим понятием, можно сказать, что введение железного сердечника внутрь катушки равносильно увеличению числа ампер-витков.

Французский учёный Ампер объяснил этот факт следующим образом. Раз железо увеличивает число ампер-витков катушки, при постоянных величине тока и числе витков, то это значит, что в самом железе циркулируют скрытые токи того же направления, что и ток, идущий по катушке. Ампер высказал мысль, что эти скрытые токи циркулируют внутри каждой молекулы железа.

В немагнитном железе круговые «молекулярные токи» циркулируют в различных беспорядочно ориентированных в пространстве плоскостях (рис. 141,а). Индукция создаваемого ими поля в среднем равна нулю. Когда же железо вносится в катушку, то плоскости круговых молекулярных токов устанавливаются параллельно виткам катушки (рис. 141,б). Магнитные поля этих круговых токов суммируются друг с другом и с полем соленоида, поэтому магнитное действие катушки с железом усиливается.

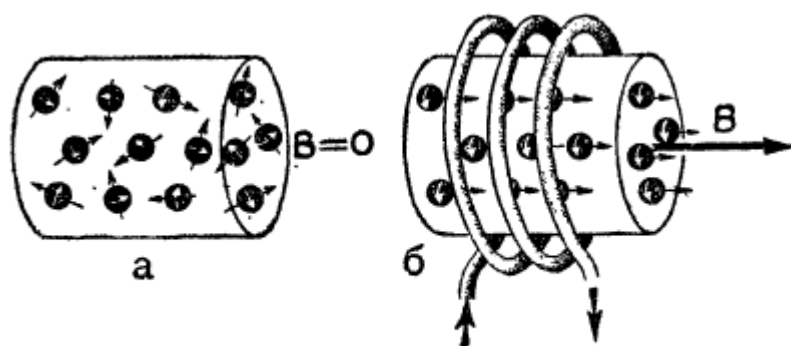


Рис. 141. К гипотезе Ампера.

Тепловое движение молекул железа несколько расстраивает ориентировку плоскостей молекулярных токов, но чем сильнее магнитное поле катушки, тем большее число молекулярных токов устанавливается параллельно виткам катушки. Это происходит до тех пор пока не наступает состояние магнитного насыщения железа. В этом состоянии все молекулярные токи оказываются ориентированными параллельно виткам катушки. При прекращении тока в катушке тепловое движение молекул железа расстраивает правильную ориентировку плоскостей молекулярных токов, вследствие чего железный сердечник размагничивается.

Во времена Ампера о строении атома ничего не знали, поэтому природа молекулярных токов оставалась неизвестной; теперь же мы знаем, что в каждом атоме имеются отрицательно заряженные частицы — электроны, обладающие магнитными полями.

Совокупность полей, создаваемых всеми движущимися в атоме электронами, создаёт некоторое результирующее поле вокруг атома. Если атомы объединены в молекулы, то магнитные поля атомов образуют в совокупности магнитное поле молекулы. Наконец, можно представить себе и значительно более крупные, чем молекулы, образования, которые играют в веществе роль самостоятельных маленьких магнитов. Наличие таких образований определяется той или иной кристаллической структурой вещества и обуславливает, как теперь полагают, магнитные свойства железа, стали и некоторых других веществ, получивших название ферромагнитных.

К числу ферромагнитных веществ относятся также никель, кобальт и некоторые сплавы — магнито, пермалой и др.

В сердечнике из мягкого железа намагничивание носит временный характер, оно почти полностью исчезает с исчезновением тока в катушке. В сердечниках же, изготовленных из особых сортов стали и из специальных сплавов, намагничивание сохраняется. Из этих материалов изготавливают постоянные магниты в виде круглых стержней, полос, подков или стрелок. (См. приложение.)

Магнитный поток

При помощи силовых линий можно не только изображать направление поля, но и характеризовать величину индукции поля.

Условились проводить силовые линии так, чтобы через 1 см^2 площадки, перпендикулярно вектору индукции в данной точке, проходило число линий, равное индукции поля в этой точке.

Там, где индукция магнитного поля будет больше, силовые линии будут гуще. И, наоборот, там, где индукция поля меньше, реже и силовые линии.

Таким образом, по густоте силовых линий можно судить о величине вектора индукции магнитного поля, а по направлению силовых линий — о направлении вектора индукции.

Наблюдение магнитных спектров прямого тока и катушки показывает, что с удалением проводника индукция магнитного поля уменьшается, притом очень быстро.

Магнитное поле, индукция которого в различных точках неодинакова, называется неоднородным. Неоднородным полем является поле прямолинейного и кругового тока, поле вне соленоида, поле постоянного магнита и т. д.

Магнитное поле, индукция которого во всех точках одинакова, называется однородным полем. Графически однородное магнитное поле изображается силовыми линиями, представляющими собой равно отстоящие друг от друга параллельные прямые.

Примером однородного поля является поле внутри длинного соленоида, а также поле между близко расположенными друг к другу параллельными плоскими полюсными концевиками электромагнита.

Произведение индукции магнитного поля, пронизывающего данный контур, на площадь контура называется потоком магнитной индукции или просто магнитным потоком (рис. 142).

Обозначая магнитный поток буквой Φ , площадь контура S и угол между направлением вектора индукции $\mathbf{B}$ и нормалью $\mathbf{n}$ к площади контура α , можно написать следующее равенство:

$$\Phi = B S \cos \alpha.$$

Магнитный поток — скалярная величина.

Так как густота силовых линий магнитного поля равна индукции магнитного поля, то магнитный поток равен всему числу силовых линий, пронизывающих данный контур.

С изменением поля меняется и магнитный поток, пронизывающий контур: при усилении поля магнитный поток возрастает, при ослаблении — уменьшается.

За единицу магнитного потока в системе СИ принимается поток, пронизывающий площадку в 1 м^2 , находящуюся в однородном магнитном поле, индукция которого равна $1 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$, и расположенную перпендикулярно вектору индукции. Такая единица называется вебером:

$$1 \text{ вб} = 1 \frac{\text{вб}}{\text{м}^2} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

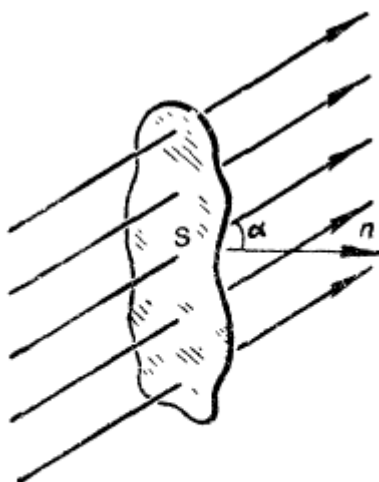


Рис. 142. К определению магнитного потока.

Электромагниты и их применение

Катушки с железными сердечниками внутри называются электромагнитами. В зависимости от назначения электромагниты изготовляют самых разнообразных размеров и форм.

Применение электромагнитов в электрическом звонке, телеграфе, электромоторе, генераторе было уже рассмотрено в начальном курсе физики. Дальше мы ознакомимся с некоторыми другими их применениями. А сейчас обратим внимание на одно существенное обстоятельство, касающееся электромагнитов.

Мы видели (§ 79), что магнитное поле катушки с железным сердечником значительно сильнее, чем поле без сердечника, потому что железо внутри катушки намагничивается током и поле его складывается с полем катушки. Поле сердечника усиливает поле катушки. Однако это утверждение справедливо только в определённых пределах. При сравнительно слабых токах, как показывает опыт, магнитное поле железного сердечника значительно сильнее поля катушки. С увеличением тока в катушке усиливаются оба поля — катушки и сердечника, а следовательно, усиливается и их суммарное поле. Но когда сердечник намагнитится до насыщения, а это случится при некотором токе в данной катушке, дальнейший рост тока усилит только поле одной катушки. При достаточно большом числе ампер-витков (несколько десятков тысяч на сантиметр длины катушки) магнитное поле самой катушки может оказаться значительно сильнее поля намагниченного до насыщения стержня. При изготовлении электромагнитов с этим фактом, конечно, приходится считаться.

Многие применяемые на практике электромагниты имеют обмотки, у которых число ампер-витков порядка нескольких сот на сантиметр. Это даёт возможность применять для обмоток сравнительно тонкие проволоки и питать их сравнительно слабыми токами. На рисунке 143 изображены электромагниты подъёмных кранов.

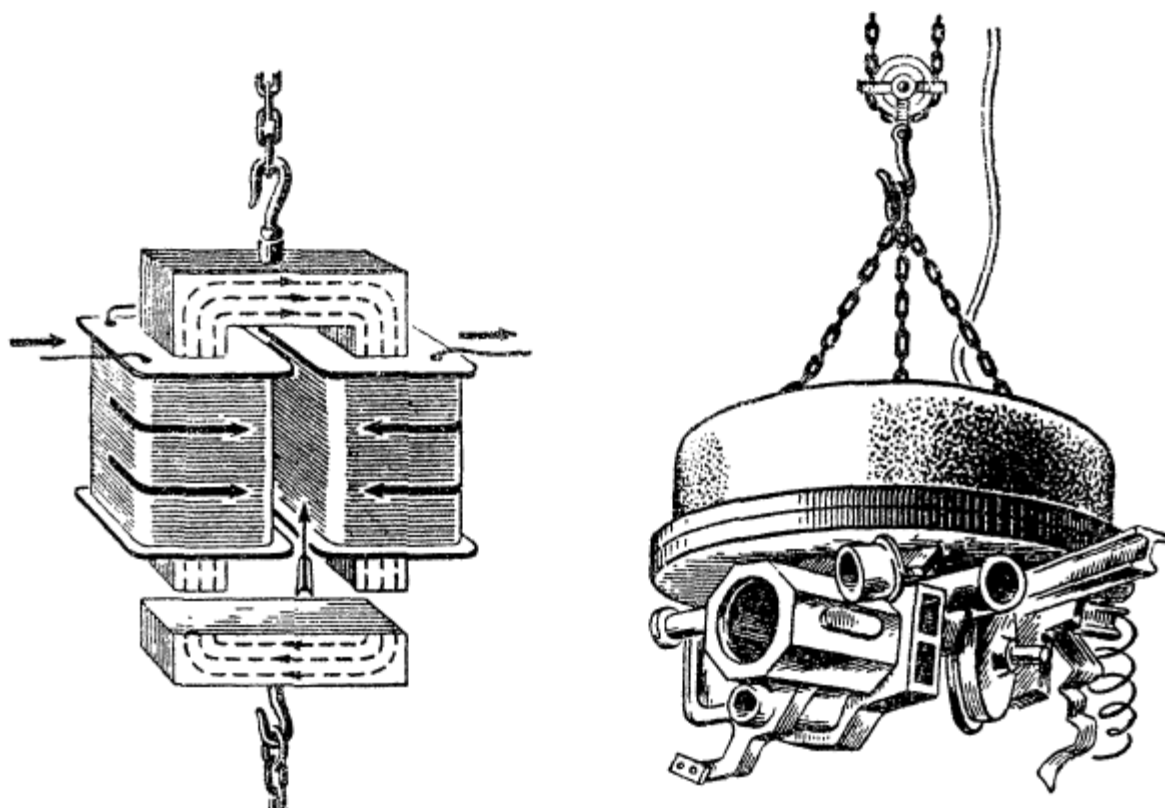


Рис. 143. Электромагниты подъёмных кранов.

Электромагнитное реле

Электромагнитное реле представляет собой электромагнитный прибор, работающий на слабых токах. Реле широко применяются во всех областях техники — в автоматическом регулировании, при автоматизации производства и т. п.

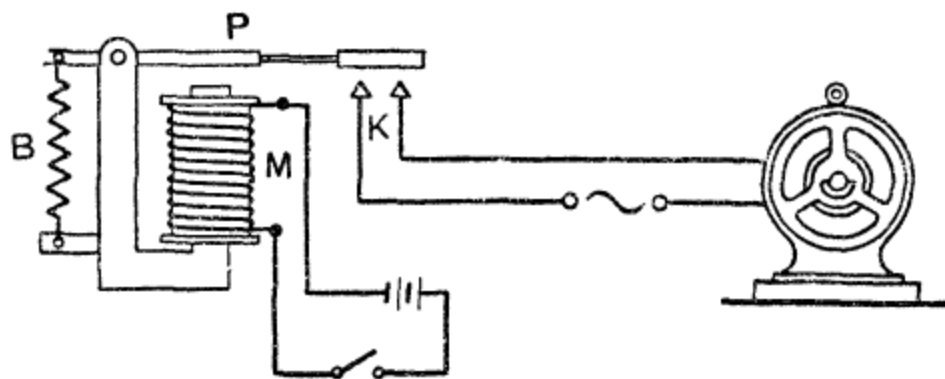


Рис. 144. Схема простейшего реле.

Широкое применение реле обусловлено основным свойством реле — возможностью управлять достаточно мощными процессами в рабочих электрических цепях с помощью слабых токов. Представление о принципе работы реле дает схема, изображённая на рисунке 144.

Когда по обмотке электромагнита M проходит управляющий (слабый) ток, железный сердечник электромагнита притягивает железную пластинку P , которая замыкает контакты K рабочей цепи, в которую могут быть включены электродвигатели, различные аппараты, электрические лампы и т. п. При размыкании управляющей цепи пружина B оттягивает пластинку P вверх; этим разрывается рабочая цепь.

От чувствительности пружины P зависит, при каком наименьшем управляющем токе реле может «сработать».

Электроизмерительные приборы

Большинство стрелочных приборов, применяемых в измерительной технике, разделяется на системы в зависимости от того или иного действия тока или напряжения, используемого для создания вращающего момента. В школьных физических лабораториях чаще всего применяются электроизмерительные приборы двух систем: магнитоэлектрической и электромагнитной, их мы и рассмотрим.

1. Магнитоэлектрические приборы. В устройстве магнитоэлектрического прибора используется явление взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника, по которому проходит ток.

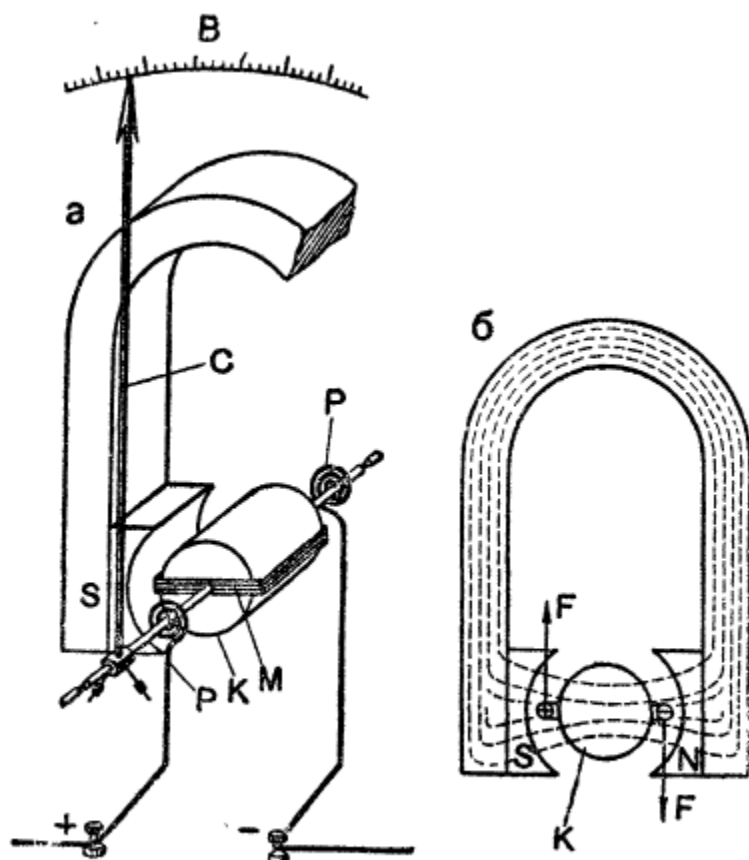


Рис. 145. Устройство гальванометра с вращающейся катушкой.

На рисунке 145 схематически изображена конструкция гальванометра с вращающейся катушкой. В узком просвете между полюсными наконечниками N и S сильного стального магнита и железным цилиндром K помещена лёгкая алюминиевая рамка M , на которой намотана катушка тонкой изолированной проволоки. Рамка укреплена на двух полуосях; с передней полуосью связана стрелка C ,двигающаяся вдоль шкалы B при повороте рамки. Рамка с катушкой удерживается в определённом положении двумя

спиральными пружинами P (рис. 145, a). Измеряемый ток через пружины P и полуоси подводится к катушке. Когда в катушке идёт ток, она поворачивается в магнитном поле, и при этом пружины закручиваются. Рамка поворачивается до тех пор, пока момент пары FF , вращающий её (рис. 145, b), не уравнивается противодействующим моментом, создаваемым упругостью закрученных пружин. Чем сильнее ток, тем больше угол поворота рамки.

Гальванометры данной системы очень чувствительны, весьма точны и имеют равномерную шкалу. Чтобы можно было данным прибором измерять напряжения, последовательно с катушкой гальванометра соединяют большое сопротивление. Гальванометр в сочетании с большим дополнительным сопротивлением является вольтметром (см. § 47, 48). Совокупность гальванометра с шунтом представляет собой прибор для измерения более значительных токов — амперметр (см. § 46).

Область применения магнитоэлектрических приборов — лабораторные, контрольные и технические измерения в цепях постоянного тока.



Рис. 146. Внешний вид щитового вольтметра.

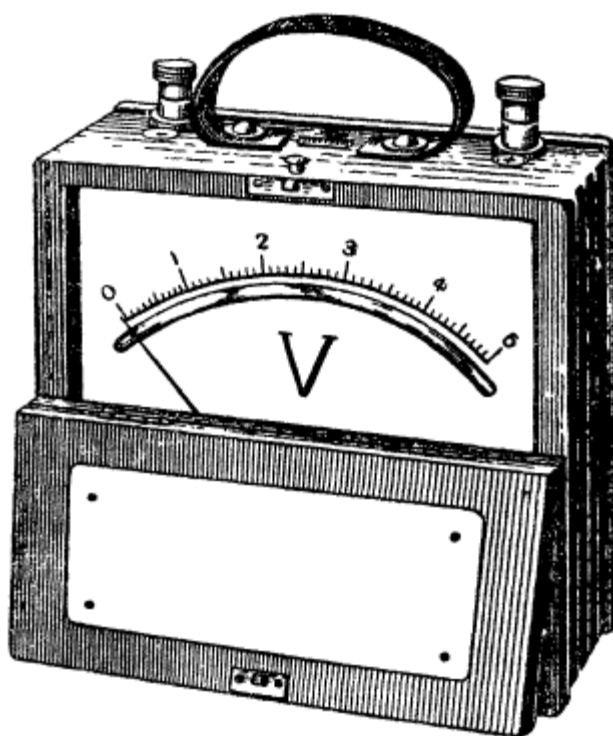


Рис. 147. Лабораторный вольтметр.

На рисунке 146 изображён щитовой вольтметр магнитоэлектрической системы.

На лицевой стороне этого прибора под шкалой указано назначение прибора для измерений в цепях постоянного тока — прямая черта — и условное обозначение магнитоэлектрической системы — подковообразный магнит с небольшим прямоугольником (катушкой) между полюсами. На рисунке 147 показан внешний вид лабораторного вольтметра магнитоэлектрической системы. Добавочные сопротивления находятся внутри корпусов приборов.

2. Электромагнитные приборы. В основе устройства электромагнитного прибора лежит явление взаимодействия магнитного поля катушки и намагниченного ею куска железа.

Схема устройства такого прибора показана на рисунке 148. Железная пластинка *В* помещена вблизи катушки *А*. При пропускании по катушке тока пластинка втягивается в катушку, поворачивая стрелку *С*. Цилиндр *Д*, в котором движется поршень *Е*, служит для успокоения колебаний стрелки.

Связанная с осью пластины *В* пружина, закручиваясь, создаёт противодействующий момент.

Внешний вид щитового амперметра такой системы изображён на рисунке 149.

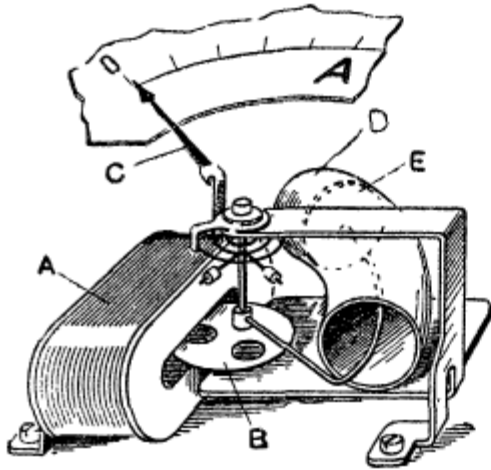


Рис. 148. Схема устройства электромагнитного прибора.

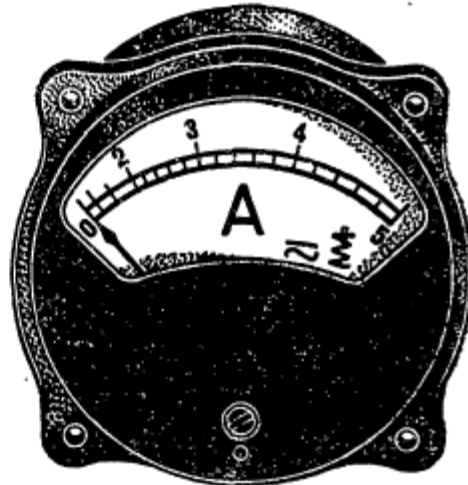


Рис. 149. Внешний вид щитового амперметра.

Приборы электромагнитной системы могут применяться для измерений в цепях постоянного и переменного тока, они имеют неравномерную шкалу. На лицевой стороне этого прибора указан условный знак прибора, могущего работать и на постоянном, и на переменном токе,— прямая черта и синусоида. Условное обозначение электромагнитной системы — прямой электромагнит.

Электромагнитный осциллограф

Осциллографом называется прибор, служащий для записи переменных электрических токов. Основной частью осциллографа является вибратор; устройство его изображено на рисунке 150. Между полюсами сильного постоянного магнита с помощью пружины *С* натянута тонкая металлическая лента *В* в форме петли, называемая шлейфом. К середине шлейфа прикреплено маленькое легкое зеркальце *А*. Когда по шлейфу проходит ток, то вследствие взаимодействия между током и магнитным полем шлейф поворачивается в магнитном поле, стремясь встать перпендикулярно полю. Пружина *С* создаёт противодействующий момент, пропорциональный углу поворота шлейфа из нулевого положения. Так как инерция шлейфа мала, то угол поворота зеркальца пропорционален мгновенному значению тока.

На рисунке 151 приведена схема расположения приборов для получения осциллограммы переменного тока.

На зеркальце *А* направляется достаточно мощный пучок лучей света от источника *С*. Отразившись от зеркальца под некоторым углом, пучок света падает на экран или фотобумагу в виде светлой точки — «зайчика». На экране частые колебания «зайчика» образуют светлую полоску, тем более длинную, чем шире размах колебаний зеркальца. Чтобы выяснить форму этих колебаний, происходящих на экране в вертикальной плоскости, световой пучок направляют на зеркальный многогранник *М* и от последнего на экран Э. Зеркальный многогранник, приводимый во вращение двигателем с определённой скоростью, развёртывает эти колебания в горизонтальном направлении. «Зайчик» в течение каждого последующего периода будет повторно описывать на экране одну и ту же кривую тока.

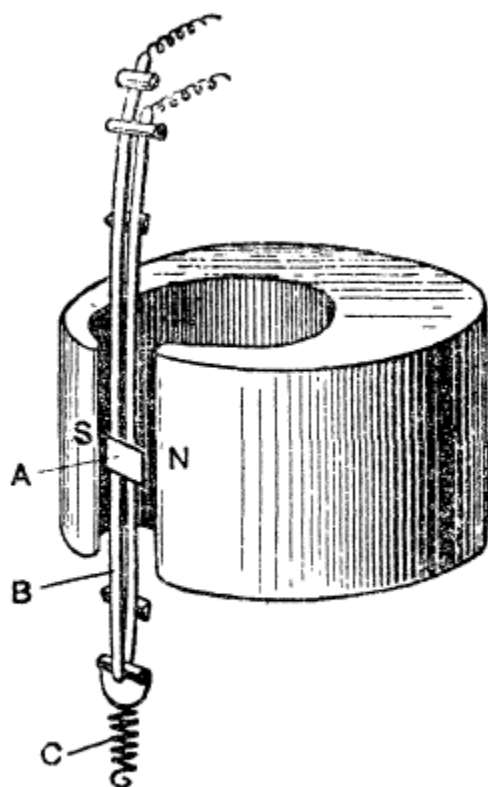


Рис. 150. Схема устройства осциллографа.

При помощи осциллографа можно получать также запись любых процессов, которые могут воздействовать на ток (например, запись звуковых колебаний, воспринимаемых микрофоном, запись переменного давления и т. п.).

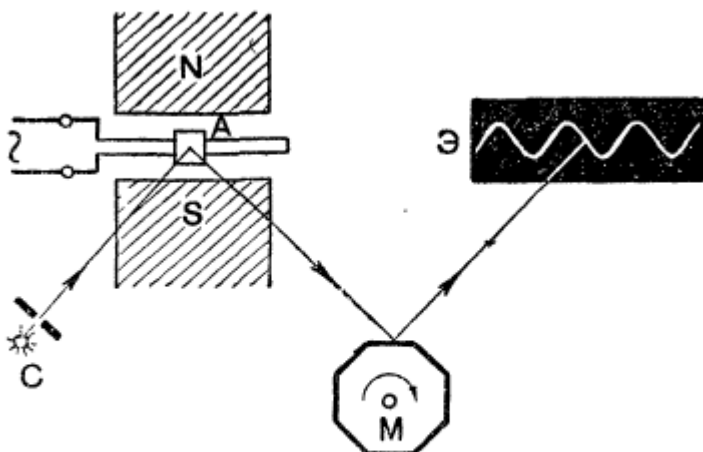


Рис. 151. Схема расположения приборов для получения осциллограмм.

Микрофон и телефон

Всем хорошо известна телефонная трубка. На одном конце этой трубки укреплен собственно телефон, прижимаемый к уху при разговоре, а на другом — микрофон, воспринимающий звуки человеческого голоса и вызывающий соответствующие изменения тока в цепи.

На рисунке 152 отдельно изображена схема устройства микрофона. Основными деталями микрофона являются мембрана **В** (тонкая пластинка из стали или прессованного угля) и угольный порошок **Г**, заключенный в углубления угольной колодки **Б**.

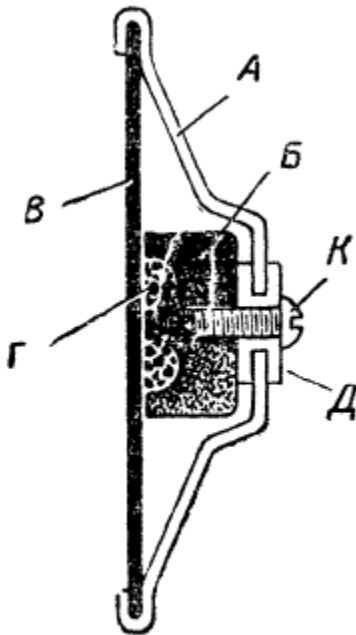


Рис. 152. Схема устройства микрофона.

Угольная колодка закреплена в корпусе **А** и изолирована от него прокладкой **Д**. На дне корпуса, тоже изолированно от него, укреплен неподвижный электрод **К**.

Электрический ток проходит через мембрану, угольную колодку, угольный порошок и электрод **К**.

Как работает микрофон? Когда на мембрану микрофона не попадают звуковые волны, тогда сопротивление порошка в нём неизменно и ток в цепи постоянен (рис.153, участок **АВ**). Звуковые волны, падающие на мембрану микрофона, приводят её в колебания. Мембрана, колеблясь, вызывает изменение плотности контактов между отдельными зёрнышками порошка. Вследствие этого сопротивление порошка в микрофоне изменяется, что вызывает изменение тока в цепи, и эти изменения происходят в соответствии с колебаниями мембраны. Ток в цепи микрофона становится пульсирующим (отрезок **ВС** на рис.153). Таким образом, звуковые волны в микрофоне вызывают изменения электрического тока, который по проводам идёт в телефон.

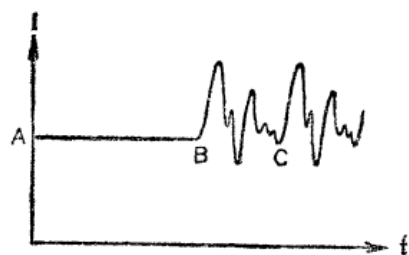


Рис. 153. График тока в цепи микрофона.

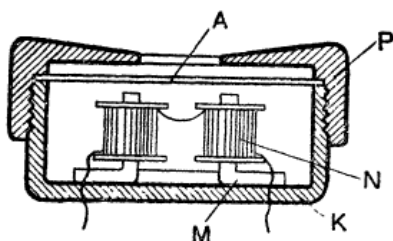


Рис. 154. Схема устройства телефона.

Схема устройства телефона изображена на рисунке 154. В корпусе телефона **K** находится постоянный магнит **M** со стальными полюсными наконечниками, на которые надеты катушки **N** из очень тонкого провода. Обмотки катушек соединены последовательно друг с другом. На корпусе **K** лежит мембрана **A**, представляющая собой тонкую стальную пластинку круглой формы. Между мембраной и полюсными наконечниками имеется небольшой воздушный зазор. Крышка **P** прижимает мембрану **A** к корпусу **K**.

Если в катушках телефона нет тока, то мембрана притягивается к полюсам магнита с некоторой постоянной силой. Когда же по катушке телефона идёт изменяющийся по величине ток, то он вызывает соответствующие изменения магнитного поля этих катушек. Если этот ток изменяется в соответствии со звуковыми колебаниями, то и дополнительное магнитное поле, созданное им, будет изменяться в соответствии с этими колебаниями.

Под действием изменяющегося магнитного поля мембрана телефона будет колебаться, приводя в колебание прилегающие к ней слои воздуха. В результате слушатель услышит в трубке те слова и фразы, которые в это время произносит в микрофон его собеседник.

Громкоговоритель

Громкоговоритель, так же как и телефон, служит для возбуждения звуковых волн действием переменного тока, меняющегося с частотой, соответствующей частоте звуков. В отличие от телефона громкоговоритель предназначен для одновременного обслуживания звуковой передачей многих слушателей.

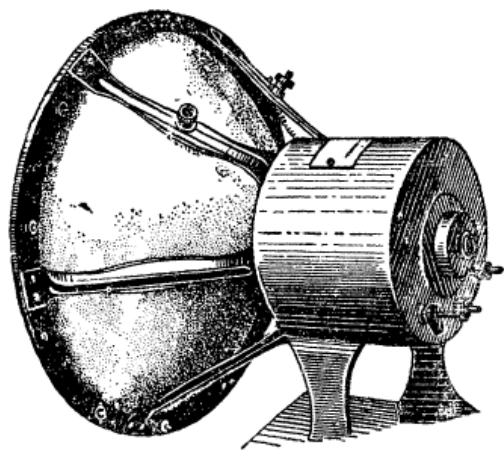


Рис. 155. Электродинамический громкоговоритель («динамик»).

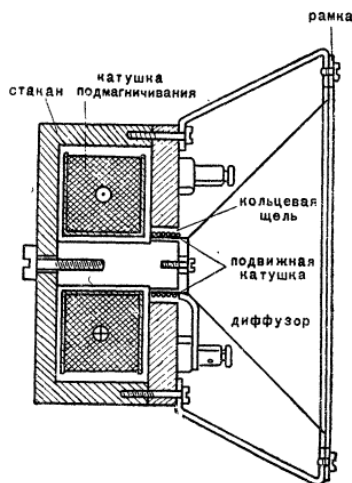


Рис. 156. Схема устройства динамика.

Существует несколько различных видов громкоговорителей. Наиболее совершенным из них является электродинамический громкоговоритель («динамик»). Внешний вид одной из многочисленных конструкций «динамиков» изображён на рисунке 155.

Понятие об устройстве громкоговорителя даёт схематический разрез его механизма, изображённый на рисунке 156. На оси массивного железного стакана намотана подмагничивающая катушка, питаемая постоянным током.

В крышке стакана сделана кольцевая щель, пронизываемая постоянным магнитным потоком. В эту щель помещена подвижная катушка, намотанная на лёгкий каркас, жёстко связанный с бумажным конусом (диффузором). Диффузор прикрепляется к раме при помощи какого-нибудь мягкого материала (например, замши).

По подвижной катушке протекает переменный ток звуковой частоты. Взаимодействие этого тока с постоянным магнитным потоком, в котором находится катушка, вызывает колебания катушки, которые передаются связанному с ней диффузору. Колеблющийся диффузор создаёт в окружающем его воздухе звуковые волны.

В настоящее время промышленностью выпускаются динамики и без подмагничивающей катушки. Постоянные магниты для них изготавливаются из специальных магнитных сплавов, обладающих высокими магнитными свойствами.

Магнитное поле Земли

Магнитная стрелка, укреплённая на вертикальной оси (если вблизи нет магнитов и электрических токов), всегда устанавливается в данном месте в определенном направлении: один конец её показывает на север, другой — на юг. Этот факт является доказательством того, что Земля окружена магнитным полем.

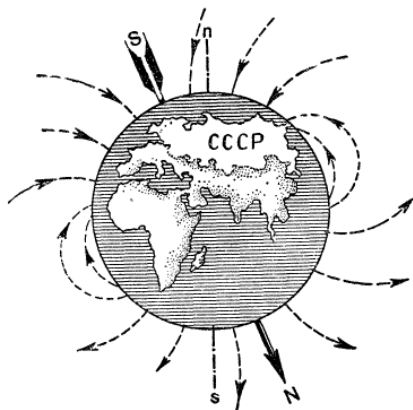


Рис. 157. Картина силовых линий магнитного поля Земли.

Наблюдая расположение магнитной стрелки, мы говорим, что северный конец стрелки указывает на север. Это не совсем верно. Направление магнитной стрелки не совпадает с направлением географического меридиана *ns* (рис. 157). Приближаясь к северному географическому полюсу Земли, магнитные линии всё больше и больше отклоняются от горизонта и около $70^{\circ} 50'$ северной широты и 96° западной долготы делаются вертикальными, входя в Землю. Здесь мы, следовательно, имеем южный магнитный полюс Земли *S*.

С другой стороны, вблизи южного географического полюса, а именно на $70^{\circ} 10'$ южной широты и $150^{\circ} 45'$ восточной долготы, магнитные линии выходят из Земли; здесь, следовательно, мы имеем северный магнитный полюс Земли *N*. Значит, магнитные полюсы не совпадают с географическими полюсами.

Вертикальная плоскость, в которой располагается продольная ось магнитной стрелки, называется плоскостью магнитного меридиана данной точки земной поверхности.

*Угол *D* между географическим и магнитным меридианами данной местности называется магнитным склонением.*

Магнитное склонение называют западным или восточным, в зависимости от того, к западу или востоку от плоскости географического меридиана отклоняется северный полюс магнитной стрелки (рис. 158—159).

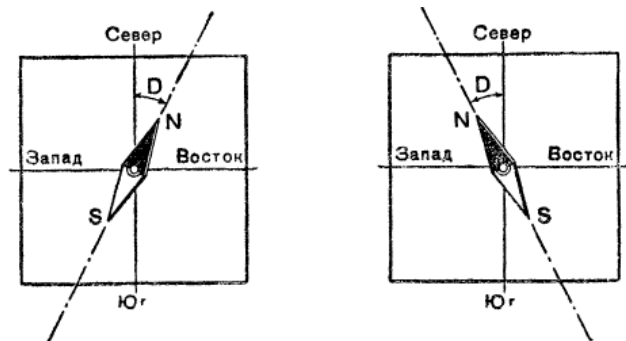


Рис. 158—159. К понятию магнитного склонения.

На рисунке 160 изображён прибор для измерения магнитного склонения. Этот прибор представляет собой не что иное, как обычный компас, устанавливаемый так, чтобы обозначенное на нём направление *С* — *Ю* лежало в плоскости географического меридиана данного места.

Ещё Колумб заметил, что магнитное склонение в различных местах имеет различную величину. Установлено, кроме того, что даже в одном и том же месте угол склонения не остаётся постоянным, а меняется весьма медленно из года в год.

Применяя для исследования земного магнитного поля стрелку, которая может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, можно заметить, что направление стрелки составляет угол с горизонтальным направлением. Угол *I* между осью стрелки и горизонтальной плоскостью называется магнитным наклонением (рис. 161). Этот угол в средних широтах близок к 70° , если стрелка расположена в плоскости магнитного меридиана.

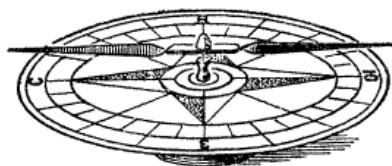


Рис. 160. Прибор для измерения магнитного склонения.

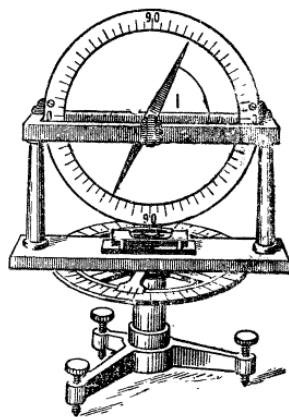


Рис. 161. Прибор для измерения магнитного наклонения.

На магнитных полюсах Земли уголклонения равен 90° , а на магнитном экваторе уголклонения равен 0° .

Ось магнитной стрелки, которая может свободно поворачиваться в любом направлении, устанавливается по направлению напряжённости магнитного поля Земли в данном месте.

Точки с одинаковым склонением на карте Земли соединяются в линии, называемые изогонами, а линии, соединяющие точки, обладающие одинаковым наклонением, называются изоклин а-м и. Имея такую карту, можно при помощи компаса определить положение географического меридиана в каждой точке. Такими картами пользуются штурманы морских и воздушных кораблей.

Однако на земном шаре встречаются области, в которых напряжённость магнитного поля изменяется очень резко. Такие области называются областями магнитной аномалии.

Одной из самых больших магнитных аномалий является Курская магнитная аномалия. Причиной таких аномалий являются залежи магнитной железной руды на сравнительно небольшой глубине.

Природа земного магнетизма ещё не выяснена. Установлено только, что большую роль в изменении магнитного поля Земли играют разнообразные электрические токи, текущие как в атмосфере (особенно в верхних слоях её), так и в земной коре.

Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции открыто в 1831г. Фарадеем. Это открытие принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX столетия. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие учёные и техники разных стран и народов. Среди них были и наши отечественные учёные: Ленц, Якоби, Яблочков, Доливо-Добровольский и другие, внёсшие большой вклад в развитие электротехники.

Открытием электромагнитной индукции была окончательно установлена неразрывная связь между электрическим током и магнитным полем.

Открытие электромагнитной индукции не было случайным, Фарадей и многие другие учёные сознательно искали разрешения проблемы: «Если ток создаёт магнитное поле, то не существует ли обратной стороны явления, нельзя ли с помощью магнитного поля создать электрический ток», — вот мысль, направлявшая ученых в их исследованиях.

Много труда затратил Фарадей и много проявил изобретательности, прежде чем отклонившаяся стрелка гальванометра впервые показала ему, что он не ошибся в своих предположениях.

На основе известных по курсу семилетней школы опытов рассмотрим теперь общие законы электромагнитной индукции.

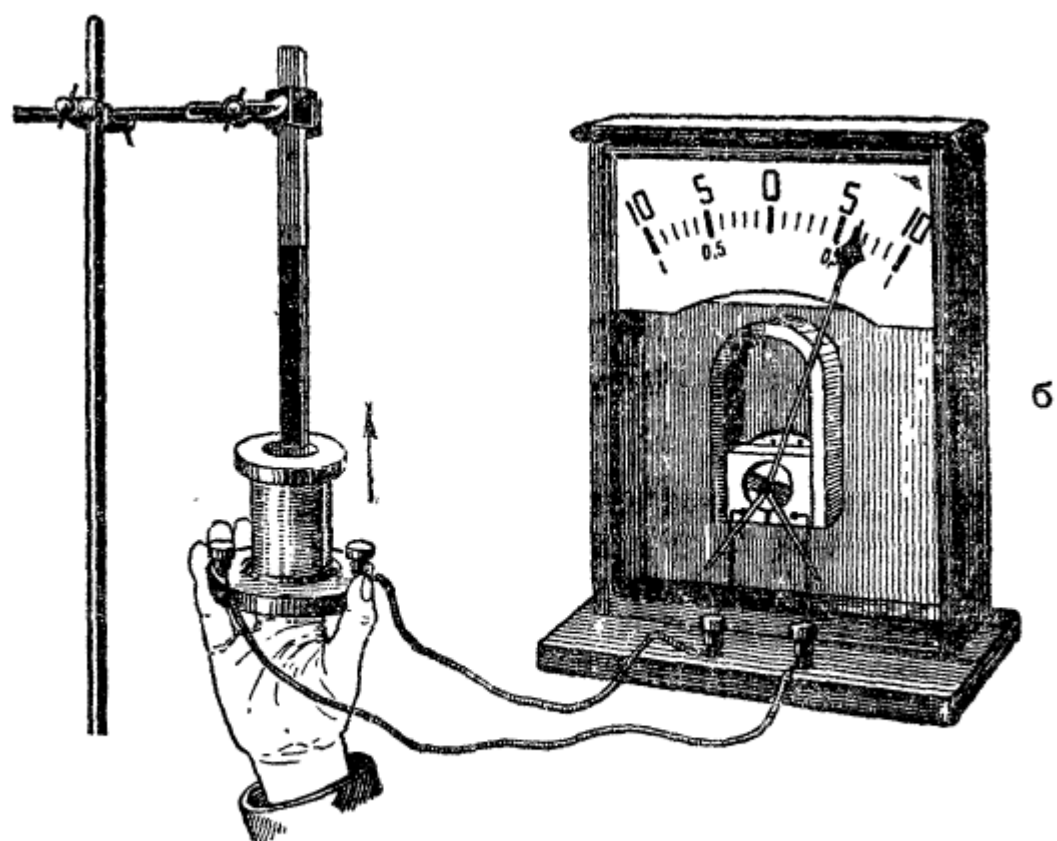
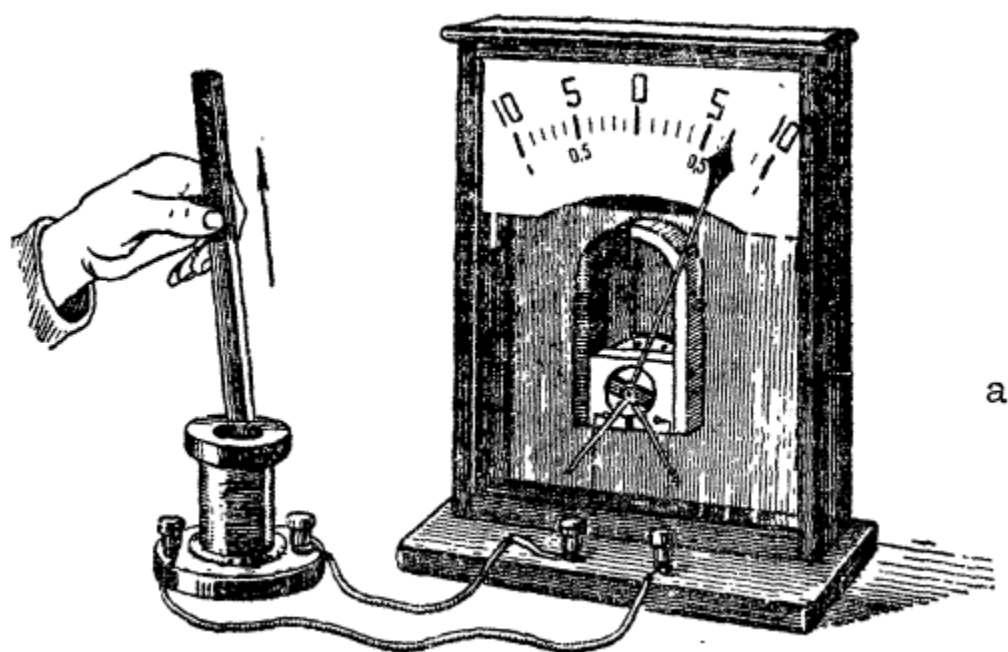


Рис. 162. Опыты по обнаружению явления электромагнитной индукции.

Если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигается магнит, то стрелка гальванометра при этом отклоняется, указывая на появление индукционного (наведённого) тока в цепи катушки. При извлечении

магнита из катушки снова наблюдается отклонение стрелки гальванометра, но в противоположную сторону, что указывает на возникновение в катушке тока противоположного направления (рис. 162, а). Как только движение магнита относительно катушки прекращается, прекращается и ток. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Опыт можно видоизменить: на неподвижный магнит надевать катушку и снимать её (рис. 162,б). И опять можно обнаружить, что во время движения катушки относительно магнита в цепи снова появляется ток.

На рисунке 163 изображена катушка *A*, включённая в цепь источника тока. Эта катушка вставлена в другую катушку *B*, замкнутую на гальванометр. При замыкании и размыкании цепи катушки *A* в катушке *B* возникают индукционные токи.

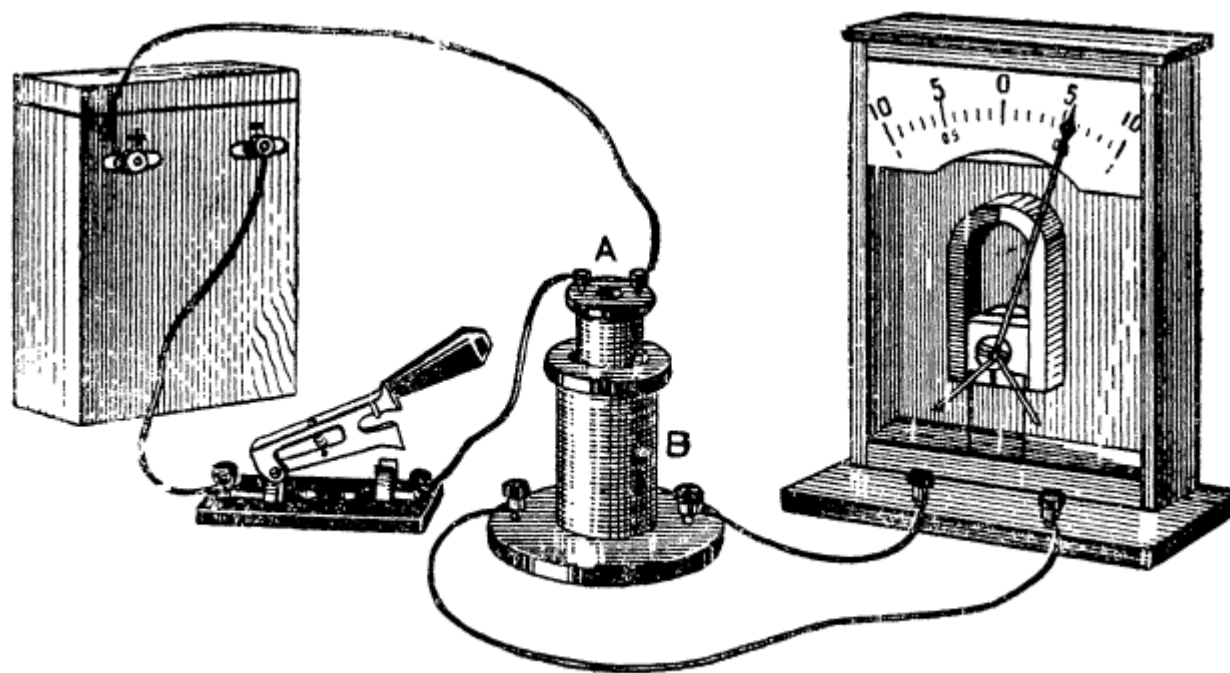


Рис. 163 Установка для обнаружения явления электромагнитной индукции.

Можно вызвать появление индукционного тока в катушке *B* и путём изменения тока в катушке *A* или движением этих катушек относительно друг друга.

Прделаем ещё один опыт. Поместим в магнитное поле подковообразного магнита плоскую катушку, концы которой соединим с гальванометром. При повороте катушки гальванометр отмечает появление в ней индукционного тока.

На основании рассмотренных нами опытов можно установить, что во всех случаях возникновения индукционного тока происходит изменение магнитного потока, пронизывающего площадь, охваченную проводником.

Действительно, при движении магнита относительно замкнутой на гальванометр катушки или катушки относительно магнита (рис. 162) магнитный поток, пронизывающий витки катушки, меняется: при движении магнита вниз он увеличивается, а при движении вверх уменьшается. В обоих случаях в витках катушки появляется ток.

Так же при замыкании и размыкании цепи в катушке *A* (рис. 163) или при изменении тока в ней меняется магнитный поток, пронизывающий витки катушки *B*, и во всех этих случаях в этой катушке обнаруживается ток.

Точно так же при повороте катушки в магнитном поле магнитный поток, пронизывающий площадь, охватываемую её витками, меняется, вследствие чего в ней возникает индукционный ток.

Если же магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, не меняется, то индукционный ток в контуре не возникает. В этом легко убедиться, перемещая поступательно замкнутый контур в однородном магнитном поле: ток в контуре при этом не возникает.

Итак, при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур замкнутого проводника, в последнем возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

В этом и заключается один из важнейших законов природы — закон электромагнитной индукции.

Возникающую в проводнике при индукции электродвижущую силу принято называть электродвижущей силой индукции.

Заметим, что для явления электромагнитной индукции характерной величиной является э. д. с. индукции, а не индукционный ток, который зависит от сопротивления проводника. В двух одинаковых по размерам и форме проводниках при одинаковых условиях э. д. с. будет одинакова, но индукционный ток будет больше в том проводнике, сопротивление которого меньше.

Введя понятие э. д. с. индукции, мы можем выразить закон электромагнитной индукции в более общем виде.

При всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур проводника, в последнем возникает э. д. с. индукции.

Явление электромагнитной индукции наблюдается и в незамкнутых проводниках. В этих случаях при пересечении проводником магнитных силовых линий на концах его возникает напряжение, причиной появления которого является та же самая э. д. с. индукции.

Объяснение возникновения э. д. с. индукции на основе электронной теории

Возникновение э.д.с. индукции можно объяснить на основании электронной теории. Допустим, что проводник AB (рис. 164) движется слева направо с некоторой скоростью $\vec{v}$ в однородном магнитном поле $\vec{B}$, силовые линии которого направлены сверху вниз. Вместе с проводником движутся слева направо его электроны и положительно заряженные частицы. Согласно электронной теории, движение заряженных частиц образует электрический ток. На всякий же ток магнитное поле действует в направлении, определяемом правилом левой руки. Направление тока в данном случае является направлением движения проводника; оно обозначено на рисунке вектором $\vec{v}$.

Применяя правило левой руки, найдём, что на положительно заряженные частицы проводника действует сила, направленная к концу проводника B , а на свободные электроны в проводнике действует сила, направленная к концу A . Но положительно заряженные частицы металла, образующие кристаллическую решётку, отклоняться полем не будут. Свободные же электроны сместятся в поле к концу проводника A . Следовательно, в части A проводника получится избыток электронов, а в части B — их недостаток. Между концами проводников A и B возникнет напряжение, которое и будет мерой э. д. с. индукции.

Таким образом, э. д. с. индукции возникает и в незамкнутом проводнике при пересечении им силовых линий магнитного поля.

Направление индукционного тока. Закон Ленца

Индукционный ток в проводнике, в зависимости от условий его возникновения, имеет разное направление. Об этом мы могли судить по отклонению стрелки гальванометра, которое в одних опытах, описанных в §88, происходило в одну сторону, в других — в другую.

Вопрос о направлении индукционного тока в самом общем виде был разрешён Ленцем.

Прежде чем сформулировать закон Ленца, рассмотрим направление тока в некоторых частных случаях индукции.

Возьмём два лёгких алюминиевых кольца, находящихся на острие подставки (рис. 165). Одно кольцо, *A*, сплошное, другое, *B*, имеет разрез. Если приближать и удалять магнит от разрезанного кольца, то можно заметить, что оно не взаимодействует с магнитом, так как индукционный ток в кольце не возникает. Двигая же магнит относительно сплошного кольца, мы обнаружим, что при приближении магнита кольцо отталкивается от него, при удалении притягивается.

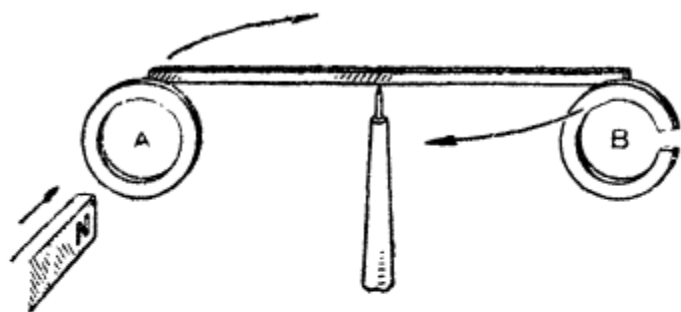


Рис. 165. При приближении магнита к сплошному кольцу оно отталкивается, а при удалении притягивается. Разрезанное кольцо не взаимодействует с магнитом.

На рисунке 166 схематически показано направление индукционного тока, возникающего в катушке при движении относительно неё магнита. Вертикальные стрелки здесь показывают направление движения магнита относительно катушки, а стрелки на витках — направление индукционного тока, возникающего при этом в катушке. На рисунке 166, *a* мы видим, что когда к катушке приближается северный полюс магнита, то в ней возникает индукционный ток, она становится электромагнитом: на ближайшем к магниту конце катушки возникает северный полюс электромагнита (индукционный ток, если смотреть со стороны северного полюса, обтекает витки катушки против часовой стрелки).

Когда же северный полюс магнита (рис. 166, *б*) удаляется от катушки, то на ближайшем конце катушки возникает южный полюс. Аналогично при приближении к катушке южного полюса магнита (рис. 166, *в*) на ближайшем к нему конце катушки возникает южный полюс, а при удалении магнита (рис. 166, *г*) на этом конце возникает северный полюс.

Но мы знаем, что магниты, обращённые друг к другу одноимёнными полюсами, отталкиваются, а разноимёнными — притягиваются. Следовательно, когда индукционный ток в катушке возникает вследствие приближения к ней магнита, то силы взаимодействия между магнитом и индукционным током отталкивают магнит от катушки (рис. 166, *a*). Когда же магнит удаляется от катушки, то происходит притяжение их друг к другу (рис. 166, *б*).

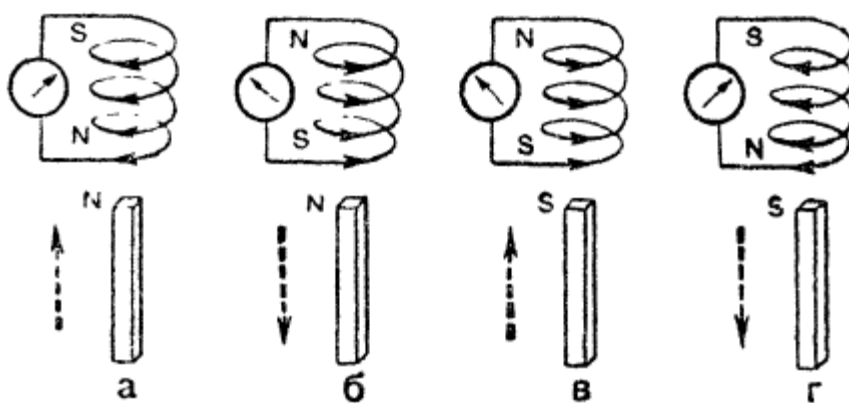


Рис. 166. К закону Ленца.

Из рассмотренных опытов можно сделать следующий вывод: *индукционный ток, возникающий в проводнике, направлен так, что своим магнитным полем противодействует движению магнита и проводника относительно друг друга.*

Рассмотрим теперь случай, когда индукционный ток в катушке *В* возникает вследствие изменения тока в катушке *А*. Схематически этот случай изображён на рисунке 167, где каждая из катушек *А* и *В* изображена в виде одного витка.

Опыт показывает, что при усилении тока в катушке *А*, т. е. при усилении магнитного поля, индукционный ток в катушке *В* имеет направление, противоположное току в катушке *А* (рис. 167,а). При уменьшении же тока в катушке *А*, т.е. при ослаблении магнитного поля, индукционный ток в катушке *В* имеет такое же направление, как и в *А* (рис. 167,б).

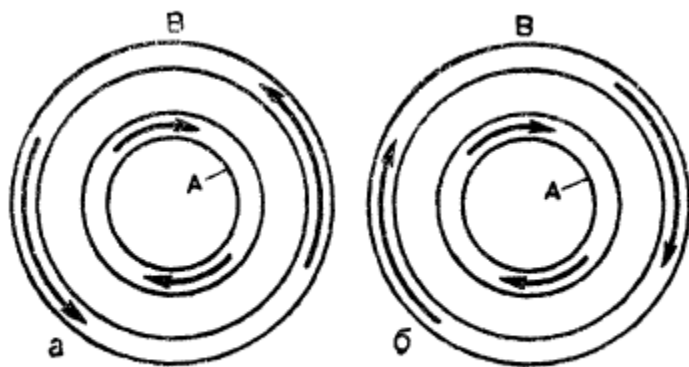


Рис. 167. К закону Ленца.

В первом случае магнитное поле индукционного тока катушки *В* направлено в сторону, противоположную магнитному полю катушки *А*, противодействуя его усилению. Во втором, наоборот, магнитное поле индукционного тока катушки *В* направлено в ту же сторону, что и поле в катушке *А*, противодействуя его ослаблению.

Все рассмотренные нами случаи направления индукционного тока находятся в полном соответствии с законом Ленца, который в самом общем виде формулируется следующим образом:

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Индукционный ток, как и всякий ток, обладает энергией. Следовательно, получая индукционный ток, мы тем самым получаем электрическую энергию; согласно закону сохранения и превращения энергии, последняя может быть получена только за счёт эквивалентного количества энергии какого-нибудь другого вида.

Когда мы приближаем, например, к катушке (рис. 166,а) магнит, то возникающий в ней индукционный ток своим магнитным полем отталкивает магнит. Двигая магнит, мы преодолеваем эти силы отталкивания, т. е. совершаем работу, в результате чего механическая энергия превращается в энергию индукционного тока.

При выдвигании магнита из катушки (рис. 166,б) совершается работа по преодолению силы притяжения катушки. Механическая энергия здесь также превращается в энергию индукционного тока.

Таким образом, закон Ленца находится в полном соответствии с законом сохранения и превращения энергии.

Величина электродвижущей силы индукции

Мы ознакомились с условиями, при которых в проводнике возникает э.д.с. индукции. Рассмотрим теперь, от чего зависит величина э. д. с. индукции. О величине её можно судить по индукционному току, который возникает в замкнутом контуре. Величина этого тока по закону Ома определяется величиной э.д.с. и сопротивлением цепи. Чем больше индукционный ток в данной цепи, тем, следовательно, больше э. д. с. индукции, возникшая в ней.

В опытах по индукции, описанных в предыдущих параграфах, можно подметить следующее очень важное обстоятельство: чем быстрее меняется магнитный поток, пронизывающий контур проводника, тем больший ток течёт по проводнику, тем, следовательно, большая э. д. с. индукции возникает в нём.

Так, например, чем быстрее движется магнит относительно катушки (см. рис. 162), тем больше угол, на который отклоняется стрелка гальванометра: следовательно, тем большей величины э. д. с. индукции возникает в катушке. При медленном движении магнита магнитный поток, охватывающий витки катушки, изменяется медленно и возникающая в катушке э. д. с. мала по величине.

Таким образом, изменяя медленно или быстро магнитный поток, можно получить в проводнике различной величины э. д. с.

Если в момент времени t_1 магнитный поток, пронизывающий контур проводника, был Φ_1 а к моменту t_2 стал Φ_2 , то за время $t_2 - t_1 = \Delta t$ магнитный поток изменился на величину $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta \Phi$

Отношение $\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, показывающее изменение магнитного потока в единицу времени, называется скоростью изменения магнитного потока.

Измерения, производимые с различными проводниками при различных изменениях магнитного потока, показывают, что величина э. д. с. индукции, возникающей в проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока. Обозначая её буквой E , можно написать:

$$E = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1)$$

В этой формуле k — коэффициент пропорциональности, числовое значение которого зависит от того, в каких единицах измерены другие величины, входящие в равенство (1).

Знак минус в формуле э. д. с. индукции означает, что при возрастании магнитного потока, пронизывающего

контур проводника (т. е. при $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$), э. д. с. индукции будет отрицательна, она создаёт индукционный ток, противодействующий магнитному потоку (см. § 90); при уменьшении магнитного потока

(т. е. при $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0$) э. д. с. положительна и ток будет поддерживать убывающий магнитный поток.

В системе СИ э. д. с. выражается в вольтах, поток индукции — в веберах, время — в секундах; коэффициент пропорциональности k в формуле (1) равен единице:

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2)$$

Если число витков в катушке n , а э. д. с., возникающая в каждом витке, равна $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ в, то полная э. д. с., возникающая в катушке при последовательном соединении всех витков, будет в n раз

больше, т. е.

$$E = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ в.}$$

В случае возникновения э. д. с. индукции в незамкнутом проводнике величина её, как показал Фарадей, определяется числом силовых линий, пересекаемых проводником в единицу времени.

Определим э. д. с. индукции при передвижении проводника длиной $AB=l$ м со скоростью $v \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ в однородном магнитном поле, индукция которого $B \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$, считая, что проводник движется перпендикулярно к линиям индукции магнитного поля (рис. 164).

При скорости $v \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ проводник длиной l м пересечёт в секунду площадь $vl \text{ м}^2$. При индукции поля B число магнитных силовых линий, пересекаемых проводником в единицу времени, равно Bvl . Поэтому возникшая в проводнике э. д. с. индукции $E = Bvl \text{ в.}$

При движении проводника не перпендикулярно к силовым линиям поля число пересечённых силовых линий будет меньше. В этом случае $E = Bvl \cdot \sin \alpha$, где α — угол между векторами индукции поля и

скорости движения проводника.

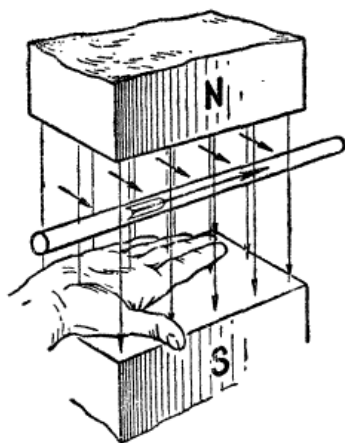


Рис. 168. Правило правой руки.

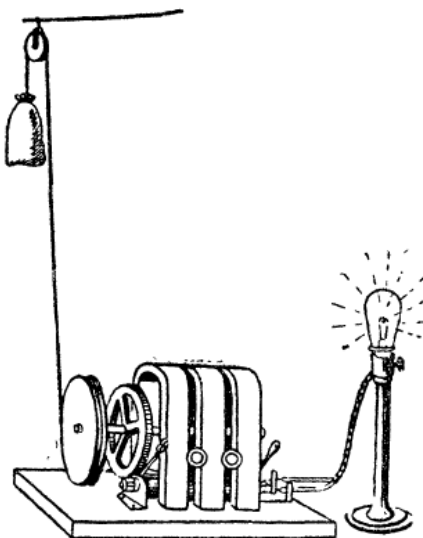


Рис. 169. К задаче 2.

Правило правой руки

В некоторых случаях для определения направления индукционного тока в проводнике удобно пользоваться правилом правой руки (рис. 168). Если расположить ладонь правой руки так, чтобы в неё входили силовые линии магнитного поля, а отставленный на 90° большой палец направить по направлению движения проводника, то положение четырёх пальцев руки определит направление индукционного тока в проводнике.

Вихревые токи

Если в магнитном поле сильного электромагнита начнёт качаться массивный маятник, состоящий из стержня с толстой медной пластинкой на конце, то колебания такого маятника очень быстро прекратятся (рис. 172). Объясняется это следующим образом. При движении медной пластинки в магнитном поле она пересекает силовые линии поля, вследствие чего в ней возникают замкнутые индукционные токи. На рисунке показан мысленно выделенный контур $abcd$. При движении пластинки в пространстве между магнитами магнитный поток, пронизывающий этот контур, меняется. По закону Ленца, в контуре возникает индукционный ток I , который, взаимодействуя с магнитным потоком, тормозит движение маятника.

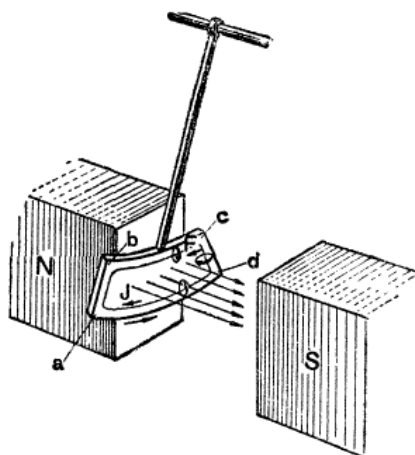


Рис. 172. Возникновение вихревых токов в медной пластинке.

Индукционные токи, возникающие в сплошных металлических массах, называются вихревыми токами. Вихревые токи образуются во всех проводниках, движущихся в магнитном поле тока или находящихся в переменном магнитном поле.

Так как сопротивление массивного проводника очень мало, то вихревые токи в нём могут достигнуть очень большой величины, вследствие чего проводник будет нагреваться. Вот почему во многих случаях важное значение имеют способы ослабления вихревых токов.

Самоиндукция

Весьма важное практическое значение имеет один частный случай явления электромагнитной индукции, получивший название самоиндукции. Познакомимся с этим явлением на опыте.

Составим цепь из источника постоянного тока и двух параллельных ветвей (рис. 173). В одну из ветвей включим последовательно лампу накаливания и реостат R , а в другую ветвь — такую же лампу и последовательно с ней катушку L с железным сердечником (электромагнит). При помощи реостата R мы можем сделать сопротивления обеих ветвей одинаковыми, а реостатом r создать нормальный накал ламп.

Если мы замкнём электрическую цепь, то заметим, что лампа, включённая последовательно с электромагнитом, загорится не сразу, волосок её будет медленно раскаляться, пока не достигнет нормальной яркости. Другая же лампа достигнет нормальной яркости практически сразу после замыкания цепи.

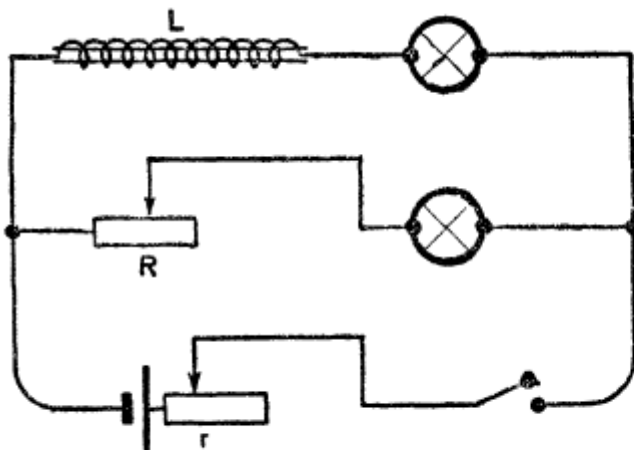


Рис. 173. Схема установки для наблюдения явления самоиндукции.

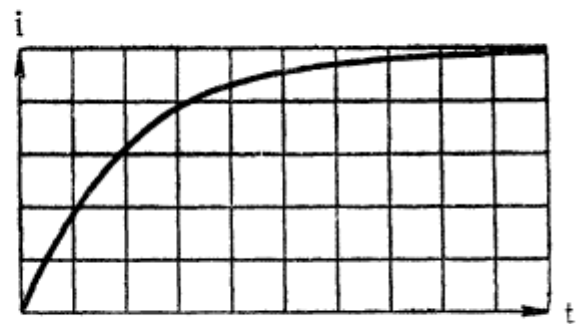


Рис. 174. График изменения тока в катушке при замыкании цепи.

Следовательно, при замыкании цепи электрический ток в катушке постепенно нарастает от нуля до некоторой постоянной величины.

На рисунке 174 показан график изменения тока в катушке при замыкании цепи с постоянной э. д. с.

Можно показать, что наблюдаемые в этом опыте явления обусловлены электромагнитной индукцией.

Действительно, когда в катушке возникает ток, то одновременно с ним возникает и магнитный поток, который растёт с увеличением тока. С изменением же магнитного потока в катушке индуцируется электродвижущая сила, величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Так как в данном случае проводник индуцирует э. д. с. в самом себе, то это явление называется самоиндукцией.

Электродвижущая сила, индуцированная в катушке под влиянием изменения её собственного магнитного потока, называется электродвижущей силой самоиндукции.

Согласно закону Ленца, во всё время роста магнитного потока, пронизывающего витки катушки, э. д. с. самоиндукции в катушке направлена против э. д. с. источника, включённого в данную цепь, и противодействует росту тока в цепи катушки. Когда ток в катушке достигает постоянной величины, изменение магнитного потока прекращается и э. д. с. самоиндукции в катушке становится равной нулю.

Включим теперь параллельно электромагниту одну лампочку. При отключении источника мы заметим, что лампочка, перед тем как погаснуть, ярко вспыхивает. Эта вспышка вызвана током, который течёт через лампу благодаря возникновению э. д. с. самоиндукции в электромагните при отключении его от источника. Величина этой э. д. с. самоиндукции может быть значительно больше э. д. с. источника, питавшего цепь.

Для того чтобы выяснить направление э. д. с., возникающей в катушке при размыкании цепи, произведём ещё один опыт.

Включим гальванометр параллельно катушке L в цепь постоянного тока (рис. 175, а). При замыкании цепи через гальванометр пойдёт ток. Допустим, что стрелка гальванометра отклоняется при этом вправо.

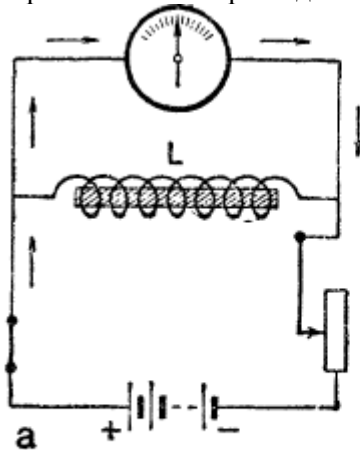


Рис. 175. Схема опыта, выясняющего направление э. д. с. самоиндукции.

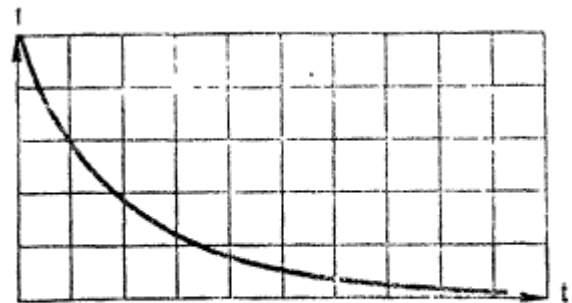


Рис. 176. График изменения индукционного тока.

Разомкнём цепь и поставим около стрелки задержку S (рис. 175, б). Когда вновь замкнём цепь, эта задержка не даст стрелке отклониться вправо. Разомкнув цепь, мы заметим, что стрелка гальванометра отклоняется влево, обнаруживая текущий по цепи ток, который не сразу исчезает в катушке, а постепенно, так, как показано на рисунке 176. Плавность исчезновения тока в катушке также объясняется возникновением в ней э. д. с. самоиндукции. При размыкании цепи вместе с током исчезает и его магнитное поле, что вызывает в катушке появление э. д. с., направление которой, согласно закону Ленца, одинаково с направлением тока. Эта э. д. с. и обуславливает ток в катушке ещё некоторое время после отключения источника постоянной э. д. с. В нашем опыте для этого имеются условия, так как контур, состоящий из катушки L и гальванометра, остаётся замкнутым и после размыкания цепи.

Стрелка гальванометра при отключении источника отклоняется в сторону, противоположную по сравнению с первоначальным её отклонением. Оно указывает на то, что э. д. с. самоиндукции в катушке действительно имеет то же направление, что и ток, текущий в ней до отключения источника.

Явление самоиндукции в электрических цепях можно сравнить с проявлением инертности в механике. Нельзя мгновенно увеличить скорость какого-нибудь тела от нуля до какой-нибудь заданной величины;

невозможно также и мгновенно остановить движущееся тело, т. е. мгновенно уменьшить его скорость до нуля.

Аналогичные явления происходят и в электрической цепи. В момент замыкания ток не достигает сразу своей наибольшей величины, а нарастает постепенно (рис. 174). При размыкании же

цепи ток не падает сразу до нуля (рис. 176).

Чем же вызываются эти явления? Они являются следствием того, что магнитное поле, всегда возникающее вместе с током, обладает свойством сохранять свою величину и направление, иными словами: *магнитное поле обладает инерцией*.

Индуктивность катушки

При самоиндукции, как и при всяком процессе электромагнитной индукции, индуктированная э. д. с. пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, по которому течёт ток. Величина же магнитного потока при отсутствии в катушке железа пропорциональна току, а скорость

изменения потока пропорциональна скорости изменения тока $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$, создающего этот поток.

Таким образом, величина э. д. с. самоиндукции, возникающая в проводнике, пропорциональна скорости изменения тока в нём.

Если брать проводники разной формы, то окажется, что при одной и той же скорости изменения тока э. д. с. самоиндукции, возникающая в них, будет различна.

Так, если взять катушку *AB* (рис. 177,а), а затем эту же катушку растянуть в один виток (рис. 177,б), то при одинаковой скорости изменения тока в них э. д. с. самоиндукции в катушке будет больше.

Рассматривая рисунок, можно установить причину этого явления. Каждая силовая линия, пронизывая витки катушки, сцепляется с ней большее число раз, чем с одним витком. Поэтому при одинаковой скорости изменения тока в катушке и витке скорость изменения магнитного потока, сцепленного с катушкой, больше, чем скорость изменения магнитного потока, сцепленного с одним витком.

Величина, характеризующая связь между скоростью изменения тока в цепи и возникающей при этом э. д. с. самоиндукции, называется индуктивностью цепи.

Обозначим индуктивность буквой *L*; тогда зависимость величины э. д. с. самоиндукции от скорости изменения тока можно выразить следующей формулой:

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Отсюда

$$\text{ед. } L = \frac{\text{ед. } E \cdot \text{ед. } t}{\text{ед. } I}.$$

Полагая в этой формуле $\Delta t = 1$ сек, $\Delta I = 1$ амперу и $E = 1$ вольту, получим:

$$\text{ед. } L = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{а}}.$$

Эта единица называется генри (гн).

$$1 \text{ гн} = 1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{а}}.$$

Следовательно,

Итак, *генри есть индуктивность катушки, в которой изменение тока на 1 ампер в секунду возбуждает э. д. с. самоиндукции, равную 1 вольту.*

Для измерения малых индуктивностей применяются тысячные доли генри — миллигенри (мгн) и миллионные доли генри — микрогенри (мкгн).

Кроме того, часто применяется и другая единица — сантиметр индуктивности,

причём $1 \text{ мкгн} = 1000 \text{ см}$ индуктивности. Таким образом,

$$1 \text{ гн} = 10^3 \text{ мгн} = 10^6 \text{ мкгн} = 10^9 \text{ см}.$$

Величина индуктивности катушки зависит от её размеров, формы и числа витков. Чем больше число витков в катушке самоиндукции, тем больше индуктивность катушки.

Индуктивность катушки сильно увеличивается при внесении внутрь её сердечника из железа или какого-либо другого магнитного материала.

Большой индуктивностью обладают обмотки электромагнитов у генераторов и двигателей. В момент

размыкания цепи, когда скорость изменения тока $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ очень велика, в этих обмотках может возникнуть большая э. д. с. самоиндукции, которая, если не принять соответствующих мер, приведёт к пробое изоляции обмоток.

Индукция магнитного поля тока. Магнитная проницаемость

Всякое вещество под действием магнитных сил способно в той или иной степени намагничиваться. Но одни вещества (воздух, вода, дерево, уголь, алюминий, медь и т. д.) намагничиваются очень слабо, другие (железо, сталь и ряд специальных сплавов), наоборот, намагничиваются очень сильно.

Способность вещества намагничиваться характеризуют величиной, называемой магнитной проницаемостью.

Обозначают эту величину греческой буквой μ («мю»).

Допустим, что в среде с некоторой магнитной проницаемостью существует магнитное поле, создаваемое током, протекающим по прямолинейному проводнику.

Очевидно, что, чем сильнее ток в проводнике, тем больше будет и индукция магнитного поля его в какой-нибудь точке пространства, окружающего ток. Кроме этого, индукция поля убывает с удалением от проводника, так как магнитное поле тока с расстоянием ослабевает. Вместе с этим индукция поля зависит от способности среды намагничиваться, т. е. от магнитной проницаемости среды.

Как показывают расчёты и опыт, индукция магнитного поля в какой-нибудь точке D (рис. 17), отстоящей от прямолинейного

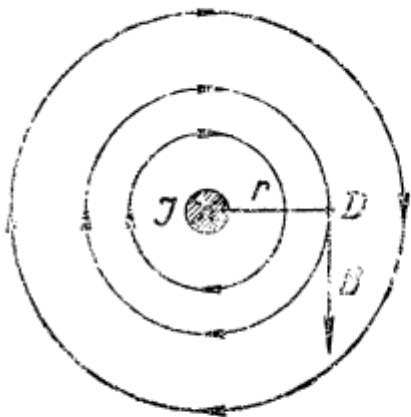


Рис. 17. Лектор индукции поля B прямого тока I в точке D , отстоящей от проводника с током на расстоянии r .

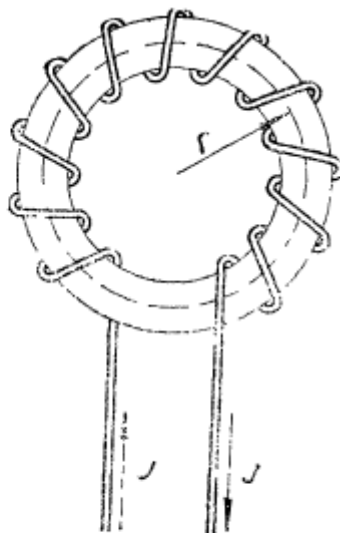


Рис. 18. Катушка в форме замкнутого кольца (тора).

проводника с током на некотором расстоянии r , может быть определена по формуле:

$$B = \mu \frac{I}{2 \pi r}, \quad (1)$$

где B — индукция магнитного поля;

I — ток;

r — расстояние от оси проводника до исследуемой точки поля;

μ — магнитная проницаемость среды.

Для практической электротехники важно уметь рассчитывать индукцию магнитного поля внутри катушки с током. Если катушка имеет форму замкнутого кольца (тора) (рис. 18), диаметр которого значительно меньше его длины, то индукцию поля внутри катушки можно вычислять по формуле:

$$B = \mu n I,$$

где n — число витков, приходящихся на единицу длины катушки (густота намотки витков).

Исходя из формулы (1), магнитную проницаемость среды определяют по формуле:

$$\mu = \frac{2 \pi r B}{I}.$$

Получим наименование единицы магнитной проницаемости в системе СИ. Для этого выразим индукцию

поля B в $\frac{вб}{м^2}$, или $\frac{в \cdot сек.}{м^2}$, силу тока I в амперах и расстояние r в метрах,
 ед. $\mu = 1 \frac{вб \cdot м}{м^2 \cdot а} = 1 \frac{в \cdot сек. \cdot м}{м^2 \cdot а} = 1 \frac{в \cdot сек.}{а \cdot м} = 1 \frac{ом \cdot сек.}{м}$.

тогдаед.

Единица $ом \cdot сек$ называется генри (сокращённо $гн$). Таким образом, за единицу измерения магнитной проницаемости в системе СИ принята $1 \frac{гн}{м}$.

Величину магнитной проницаемости среды μ выражают в виде произведения двух сомножителей:

$$\mu = \mu_r \mu_0,$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, она называется магнитной постоянной;

μ_r — относительная магнитная проницаемость — число отвлечённое, показывающее отношение . величины магнитной проницаемости данного вещества к величине магнитной постоянной:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

Величина магнитной постоянной может быть рассчитана по силе взаимодействия между двумя параллельными бесконечно длинными проводниками. Об этом будет рассказано ниже.

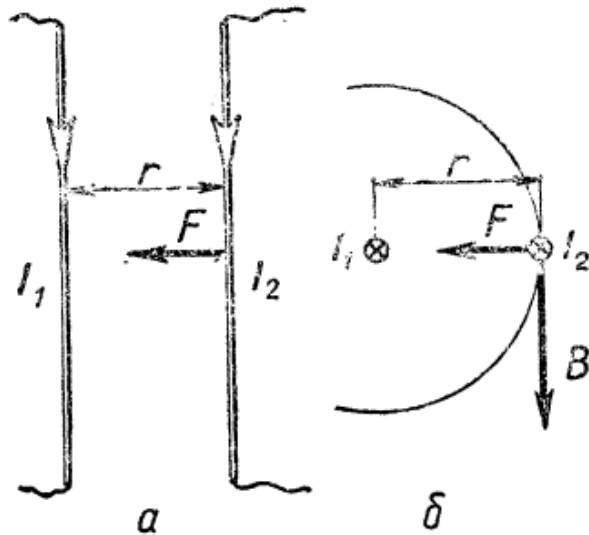


Рис. 19. Взаимодействие между двумя параллельными проводниками при протекании по ним токов.

Взаимодействие параллельных токов

Единица силы тока—ампер. Магнитная постоянная. Рассмотрим, как можно рассчитать силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками при протекании по ним токов (рис. 19, а). Пусть I_1 и I_2 — токи в проводниках, l — длины проводников, r — расстояние между ними, μ — магнитная проницаемость среды, окружающей проводники.

Индукция магнитного поля тока в точке (рис. 19, б), отстоящей от первого проводника на расстоянии r , выразится формулой:

$$B = \mu \frac{I_1}{2 \pi r}.$$

Сила, с которой поле действует на проводник с током, равна произведению индукции поля на ток и на длину проводника: $F = BIl$ (глава III, § 78).

На основании этого можно написать, что магнитное поле тока I_1 действует на ток I_2 с силой, выражаемой формулой:

$$F = BI_2l, \text{ или } F = \mu \frac{I_1 I_2}{2 \pi r} l. \text{ Для вакуума: } F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2 \pi r} l.$$

Приведённая формула в системе единиц СИ взята за основу определения одной из основных единиц этой системы — единицы силы тока — ампера.

Ампер — сила тока, который, проходя по каждому из двух бесконечно длинных параллельных проводников, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызывает силу взаимодействия между проводниками в $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона на каждый метр длины.

При этом взаимодействующие проводники должны быть прямолинейными и ничтожно малого кругового сечения.

Для воспроизведения единицы силы тока — ампер — созданы так называемые ампер-весы.

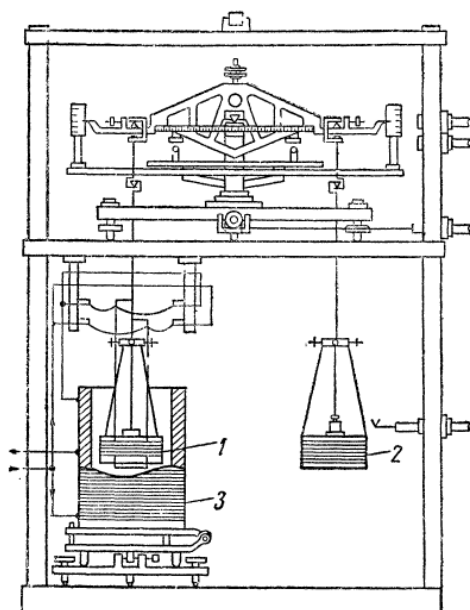


Рис. 20. Схема устройства ампер-весов.

Схема устройства весов изображена на рисунке 20. Два одинаковых соленоида 1 и 2 подвешены к плечам коромысла весьма чувствительных весов. Первый из них помещён (соосно) в неподвижный соленоид 3 и соединён с ним последовательно в электрическую цепь, питаемую от источника электрической энергии.

При включении цепи соленоиды 1 и 3 взаимодействуют так, что подвижный соленоид втягивается в неподвижный, равновесие весов нарушается. Для восстановления равновесия надо нагружать другое плечо (по рисунку 20 — правое) гирями, вес которых равен силе F , с которой токи в соленоидах взаимодействуют между собой. Вес этих гирь $P = mg$ пропорционален произведению токов в последовательно соединённых соленоидах, т. е. I^2 . Поэтому

$$mg = kI^2,$$

где k — постоянная ампер-весов,

откуда

$$I = \sqrt{\frac{mg}{k}},$$

при $k = mg, I = 1a.$

Точность измерений на этих весах порядка $10^{-5} - 10^{-6} a.$. Подставляя указанные в определении ампера значения величин, входящих в формулу взаимодействия двух параллельных проводников с током, найдём:

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = \mu_0 \frac{1a \cdot 1a \cdot 1 \text{ м}}{2 \pi \cdot 1 \text{ м}},$$

откуда

$$\mu_0 = \frac{2 \pi \cdot 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}}{a^2} \approx 12,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{a^2}.$$

Предоставляется самим учащимся показать, что

$$1 \frac{\text{Н}}{a^2} = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{сек}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{ЗН}}{\text{м}}.$$

$$12,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{ЗН}}{\text{м}}.$$

Итак, магнитная постоянная равна

Напряжённость магнитного поля

Индукция магнитного поля — величина, характеризующая результирующее магнитное поле в намагниченном веществе. Это результирующее поле представляет сумму внешнего поля (например, поля тока) и внутреннего поля самого намагниченного вещества.

Наряду с индукцией магнитного поля для расчетных целей применяют величину, называемую напряжённостью магнитного поля.

Эта величина характеризует интенсивность намагничивающего (внешнего) магнитного поля.

Напряжённость поля прямо пропорциональна току, создающему магнитное поле. \

В случае однородного замкнутого стального сердечника, на который равномерно наложена обмотка, обтекаемая током, напряжённость поля вычисляется по формуле:

$$H = nI,$$

где I — ток в амперах,

n — число витков обмотки, приходящихся на единицу длины катушки,

$$H \text{ — напряженность магнитного поля в } \frac{a}{\text{м}}.$$

Напряжённость магнитного поля связана с магнитной индукцией следующей формулой

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

В системе СИ напряжённость поля измеряется в $\frac{a}{м}$:

$$\text{ед. } H = 1 \frac{вб \cdot м}{м^2 \cdot гн} = 1 \frac{в сек \cdot м}{м^2 \cdot ом \cdot сек} = 1 \frac{a}{м}.$$

Напряжённость магнитного поля — величина векторная. Вектор напряженности магнитного поля H в любой точке магнитного поля направлен по касательной к магнитной силовой линии, проходящей через данную точку.

Магнитные свойства вещества

Магнитные свойства вещества проявляются в его способности намагничиваться.

Опытное исследование магнитных свойств веществ, начатое ещё Фарадеем, показало, что все вещества обладают магнитными свойствами. Причем у большинства из них магнитные свойства выражены слабо. Эти вещества получили название слабомагнитных в отличие от небольшой группы веществ (железо, никель, кобальт и специальные сплавы), называемых сильномагнитными.

Для исследования магнитных свойств вещества из него изготавливают небольшой стерженек (или, если вещество жидкое, наполняют им тонкую стеклянную трубку) и подвешивают его между полюсами электромагнита

Если испытуемый стерженек помещён в однородном поле, то действие поля на него сводится к определенной ориентации его в этом поле. Причем на опытах было обнаружено, что стерженьки из одной группы веществ устанавливаются вдоль линий индукции поля, из другой — поперёк этих линий.

В неоднородном магнитном поле стерженьки, изготовленные из первой группы веществ, устанавливаясь вдоль линий поля, втягиваются в область более сильного поля, стерженьки же из другой группы веществ выталкиваются в область слабого поля.

Различие в поведении стерженьков объясняется тем, что одни из них (первая группа) намагничиваются в направлении линий индукции поля, другие — в противоположном направлении (рис. 21).



Рис 21 В однородном магнитном поле железный стержень устанавливается вдоль силовых линий поля, висмутовый — перпендикулярно силовым линиям поля.

В случае слабомагнитных веществ первая группа веществ получила название парамагнитных, а вторая — диамагнитных веществ.

Рис 21 В однородном магнитном поле железный стержень устанавливается вдоль силовых линий поля, висмутовый — перпендикулярно силовым линиям поля.

Относительная магнитная проницаемость у парамагнитных веществ больше единицы ($\mu_r > 1$), у диамагнитных веществ меньше единицы ($\mu_r < 1$).

Ниже приводятся значения относительной магнитной проницаемости некоторых веществ.

Таблица относительных магнитных проницаемостей некоторых слабомагнитных веществ.

**Таблица относительных магнитных проницаемостей
некоторых слабомагнитных веществ**

Воздух	1,00000036	} Парамагнитные вещества
Олово	1,000004	
Алюминий	1,000023	
Платина	1,000364	
Висмут	0,999825	} Диамагнитные вещества
Сурьма	0,999937	
Серебро	0,999981	
Медь	0,999991	

Относительная магнитная проницаемость вакуума, как это следует из её определения, равна единице.

Если внутрь соленоида внести стержень из какого-либо слабомагнитного вещества, то магнитное поле этого соленоида заметно не изменится, так как магнитная проницаемость этих веществ близка к единице.

Характерным свойством слабомагнитных веществ является то, что они бывают намагничены только тогда, когда находятся во внешнем магнитном поле.

Сильномагнитные вещества называются ферромагнитными (по названию важнейшего представителя этой группы веществ — железа).

Ферромагнитные вещества в магнитном поле ведут себя подобно парамагнитным веществам[^], но только они значительно сильнее намагничиваются.

Ниже приводятся предельные значения относительной магнитной проницаемости некоторых ферромагнитных веществ.

Ферромагнитное вещество	Относительная магнитная проницаемость
Кобальт	174
Никель	1120
Мягкая сталь	2180
Трансформаторная листовая сталь	7500
Сплав железа с никелем	60 000
Пермалой (Ni 78%; Fe 18%; Mo 3%; Mn 0,5%)	115 000

Отличительной особенностью ферромагнитных веществ является не только то, что магнитная проницаемость у них достигает очень большой величины, но и то, что она не является постоянной величиной, как у слабомагнитных веществ, а зависит от величины напряжённости намагничивающего поля.

Эта зависимость μ от H весьма сложная и у разных ферромагнитных веществ в деталях различна. Общий характер зависимости μ от H иллюстрирует рисунок 22.

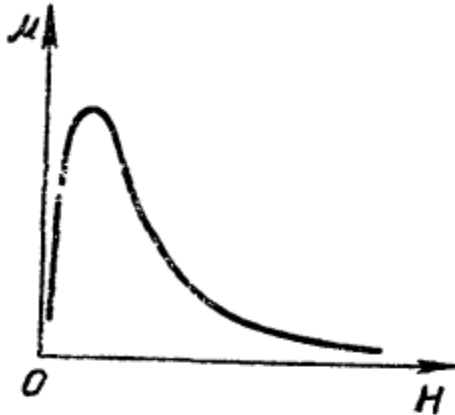


Рис 22 График зависимости магнитной проницаемости вещества от напряжённости намагничивающего поля

В слабых полях с увеличением напряжённости намагничивающего поля магнитная проницаемость ферромагнитных веществ быстро растёт и достигает максимума. При дальнейшем увеличении напряжённости магнитная проницаемость уменьшается и в полях большой напряжённости приближается к единице. Это происходит тогда, когда ферромагнитное вещество намагничивается до насыщения.

При достижении ферромагнитным веществом состояния магнитного насыщения рост индукции в этом веществе может происходить только за счёт увеличения напряжённости намагничивающего поля.

Достижение состояния магнитного насыщения присуще только ферромагнитным веществам. У слабомагнитных веществ магнитное насыщение не наблюдается.

Различие в магнитных свойствах слабомагнитных и ферромагнитных веществ наглядно отражено на кривых намагничивания (рис. 23), которые выражают зависимость индукции в данном веществе от напряжённости намагничивающего поля.

Явление магнитного гистерезиса

Для намагничивания ферромагнитного вещества стержень из этого вещества вносят в катушку. При пропускании тока по ней стержень намагничивается. Причём с увеличением тока в катушке пропорционально ему растёт и напряжённость намагничивающего поля H внутри катушки, а это приводит ко всё большему намагничиванию стержня, т. е. к увеличению в нём магнитной индукции B .

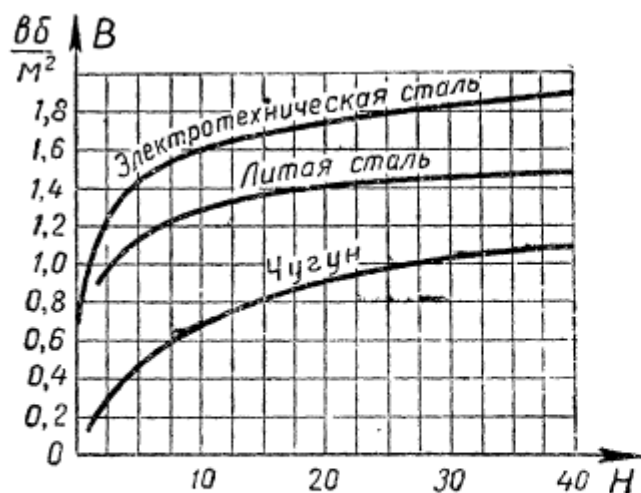


Рис. 23а. Кривые намагничивания различных ферромагнитных веществ.

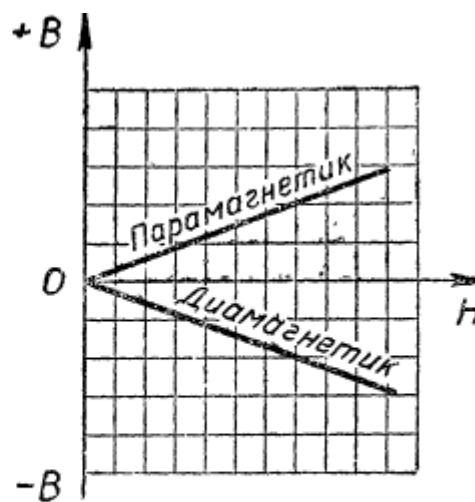


Рис. 23б. Кривые намагничивания парамагнетиков и диамагнетиков.

Графически процесс намагничивания стержня изобразится в виде кривой **OA** (рис. 24).

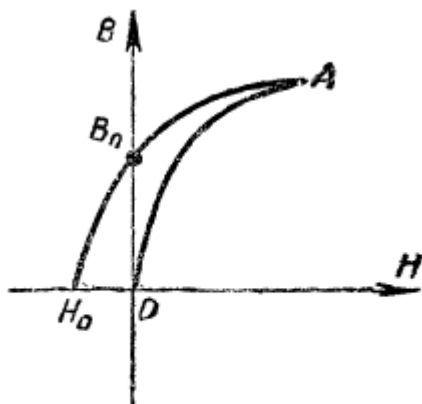


Рис. 24. Кривая намагничивания.

Начнём постепенно уменьшать напряжённость намагничивающего поля, уменьшая для этого ток в катушке. При этом магнитная индукция в стержне тоже станет уменьшаться. Но процесс размагничивания стержня пойдёт по пути, отличному от пути намагничивания, что графически изобразится не кривой **AO**, а

кривой **AB₀**, т. е. размагничивание стержня будет отставать от уменьшения напряжённости поля в катушке.

Это явление получило название гистерезиса.

Когда ток в катушке уменьшится до нуля и, следовательно, напряжённость намагничивающего поля в катушке станет равной нулю, стержень сохранит состояние намагничивания и индукция в нём не будет равна нулю. На графике эта остаточная индукция изобразится отрезком **OB₀**.

Для полного размагничивания стержня необходимо создать внутри катушки поле обратного направления, что легко осуществить, изменив направление тока в катушке.

Постепенно увеличивая напряжённость намагничивающего поля H противоположного направления, можно довести до нуля магнитную индукцию в стержне.

На графике этот процесс изображается участком кривой B_0H_0 . Отрезок OH_0 выражает величину напряжённости намагничивающего поля обратного направления, при которой происходит полное размагничивание стержня.

Величина этой напряжённости H_0 получила название коэрцитивной силы. Величина коэрцитивной силы характеризует «прочность» остаточного намагничивания ферромагнитного вещества.

Как величина остаточного намагничивания так особенно и величина коэрцитивной силы H_0 у разных ферромагнитных веществ различны. Они являются важными характеристиками ферромагнетиков.

Вещества с малой коэрцитивной силой получили в технике название мягких ферромагнетиков.

Вещества с большой коэрцитивной силой называются жёсткими ферромагнетиками.

Жёсткие ферромагнетики незаменимы при изготовлении постоянных магнитов, в которых остаточная намагниченность должна быть по возможности максимальной, т. е. близкой к магнитному насыщению.

Мягкие ферромагнетики используются в тех случаях, когда материал должен во время работы аппарата или машины непрерывно перемагничиваться.

Продолжим рассмотрение явления, описанного в начале параграфа.

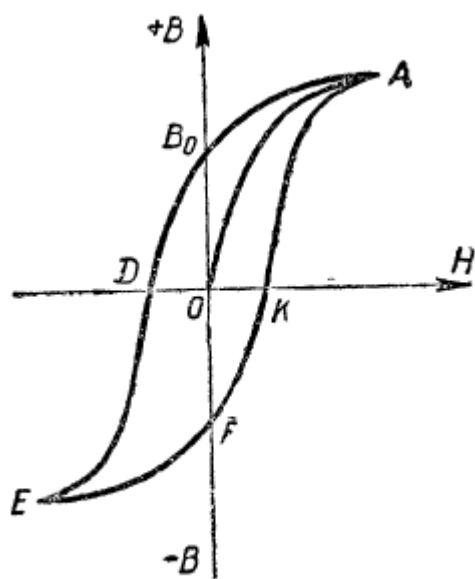


Рис. 25. Петля гистерезиса.

Увеличивая напряжённость поля H в новом направлении (рис. 25), можно довести намагничивание материала до насыщения, соответствующего точке E . Затем, размагничивая материал, при $H=0$ получим остаточное намагничивание, определяемое отрезком OF .

Если повторить весь цикл перемагничивания вещества, то индукции также повторится по замкнутой кривой $AB, DEFKA$.

У мягких ферромагнетиков (с малой коэрцитивной силой) петля гистерезиса узкая, а у жестких (или высококоэрцитивных ферромагнетиков) широкая.

Явление гистерезиса приводит к тому, что на перемагничивание веществ расходуется энергия. Причём, чем больше у данного вещества коэрцитивная сила, тем больше расходуется энергии на перемагничивание. Поэтому, например, сердечники трансформаторов и генераторов переменного тока должны изготавливаться из особых мягких ферромагнетиков. Металлургия выпускает для этой цели специальную магнитомягкую трансформаторную сталь.

Энергия, расходуемая на перемагничивание материала, превращается во внутреннюю энергию сердечника, который при этом нагревается. Нагревание же ухудшает магнитные свойства ферромагнитных веществ, а при достижении некоторой критической для данного ферромагнетика температуры его магнитные свойства исчезают. Ферромагнитное вещество при температуре выше критической ведёт себя как обычное парамагнитное вещество.

Критическая температура для ферромагнитных веществ называется точкой Кюри, по имени Пьера Кюри, открывшего её существование.

Точка Кюри у железа 769°K , у никеля 350°K .

Изучение законов намагничивания ферромагнитных материалов — одна из важнейших практических и теоретических задач. Первые крупные исследования в этой области были произведены русским учёным А. Т. Столетовым. Большой вклад в исследование свойств ферромагнитных материалов вложили советские учёные В. К. Аркадьев, Н. А. Акулов, Я. Т. Дорфман, С. В. Вонсовский и другие.

Применение магнитных материалов

Применение магнитных материалов в технике в настоящее время очень велико. Укажем на главнейшие из них.

Одним из основных потребителей магнитных материалов является электротехника. Огромное количество мягкого магнитного материала — трансформаторной стали — ежегодно расходуется на изготовление генераторов, электродвигателей и трансформаторов. Немалое количество ферромагнитных материалов идёт на изготовление электромагнитов, которые используются и в гигантских ускорителях ядерных частиц, и в мощных электромагнитных кранах, и в громкоговорителях, и в электроизмерительных приборах и т. д.

Чрезвычайно широко используются магнитные материалы в радиотехнических, радиоэлектронных устройствах, в автоматике и телемеханике.

Важное применение магнитные материалы получили в ультразвуке в качестве излучателей и приёмников ультразвука. Стержень из ферромагнитного вещества при его перемагничивании удлиняется или сжимается (магнитострикция), а при сжатии или растяжении изменяется его намагниченность. Это свойство и используется в устройстве магнитострикционных излучателей и приёмников ультразвука.

На явлении остаточного магнетизма в жёсткой ферромагнитной проволоке или в специально изготовленной магнитной ленте основан способ магнитной записи звука.

Схема магнитной звукозаписи показана на рисунке 26. Звуковые сигналы вызывают в электрической цепи соответствующие изменения электрического тока, которые, в свою очередь, вызывают изменение магнитного поля. На ленте при пересечении этого переменного магнитного поля звуковой частоты создаются участки неоднородной намагниченности, соответствующие записываемому звуку, и благодаря остаточному магнетизму звук «записывается».

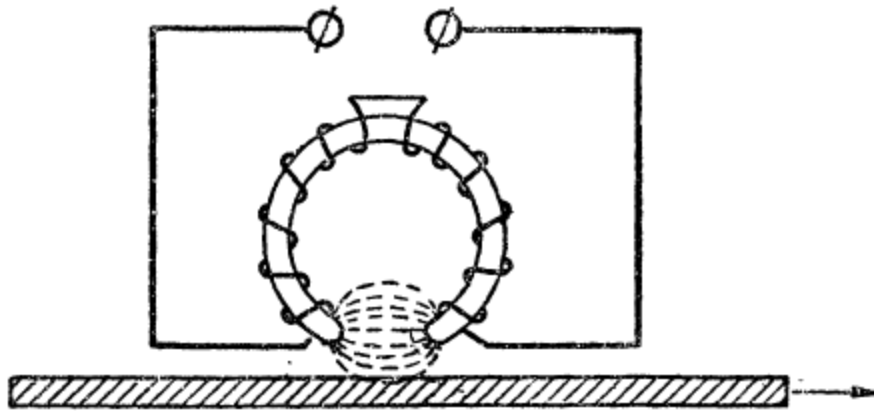


Рис. 26. Схема магнитной звукозаписи.

В связи с бурным развитием техники сверхвысокой частоты (СВЧ) разработан новый класс неметаллических полупроводниковых магнетиков, называемых ферримагнетиками, у которых электросопротивление во много (в $10^8—10^{20}$) раз больше, чем у металлов и металлических сплавов. Вследствие этого при сверхвысокочастотном намагничивании в них не возникают сколько-нибудь заметные индукционные (вихревые) токи и связанные с ними вредные потери энергии. Одним из наиболее распространённых типов таких веществ оказались сложные металлические окислы с общей химической формулой MeOFe_2O_3 , где **Me** — какой-нибудь из металлов: железо, никель, кобальт, марганец и др. Из этих веществ готовят мягкие полупроводниковые материалы — ферриты (или оксиферы), которые нашли необычайно широкое применение в современной технике СВЧ.

Природа магнитных свойств вещества

Первой попыткой объяснения магнитных свойств вещества была гипотеза Ампера о существовании внутри постоянных магнитов молекулярных токов, которые и создают поле магнита.

Изучение строения атома и исследование свойств элементарных частиц раскрыло физическую сущность амперовских молекулярных токов и магнитных свойств веществ.

Каждый атом вещества — сложная система, состоящая из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него электронов. Движение электронов вокруг ядра представляет собой элементарный ток, создающий, как и всякий ток, магнитное поле.

Исследования показали, что магнитное поле атомов обусловлено не только движением электронов вокруг ядра, но главным образом магнитными полями, которыми обладают сами электроны. Кроме этого, оказалось, что магнитными полями обладают и частицы, из которых состоят ядра атомов, — протоны и нейтроны.

Однако магнитное поле атома зависит не только от магнитных полей отдельных частиц, входящих в его состав, а также и от характера расположения и движения частиц в атоме. В атомах одних веществ магнитные

ноля могут, суммируясь, создать результирующее поле атома, в атомах других веществ такого результирующего поля может и не возникнуть.

Для того чтобы вещество оказалось намагниченным, необходима ещё и определённая пространственная ориентировка атомов и молекул, из которых состоит данное вещество.

Самопроизвольная ориентация магнитных полей атомов наблюдается лишь у ферромагнитных веществ. В ферромагнитных веществах были обнаружены небольшие области размером порядка 10^{-3} мм, в которых атомы расположены так, что их магнитные поля имеют одно и то же направление.

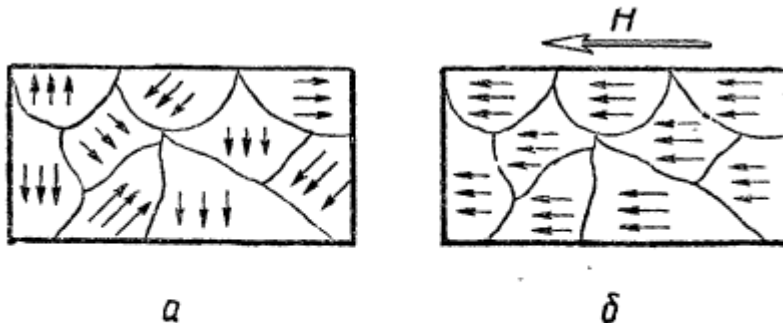


Рис. 27. а) Направление намагничивания в различных доменах различно;
б) ориентировка намагниченных доменов в направлении внешнего поля.

В этих малых областях, называемых доменами, вещество намагничено до насыщения. Направление намагничивания в разных доменах различно (рис. 27, а), поэтому всё тело в отсутствие внешнего магнитного поля оказывается ненамагниченным.

Под действием внешнего магнитного поля происходит смещение границ отдельных доменов; увеличивается число доменов, в которых направление поля совпадает с направлением внешнего намагничивающего поля. Кроме того, происходит ориентировка намагниченных доменов в направлении внешнего поля (рис. 27, б).

В этом и заключается процесс намагничивания ферромагнитного вещества.

Гипотеза о существовании ферромагнитных доменов была высказана ещё в 1907 г. французским учёным П. Вейссом и доказана теоретически советскими учёными Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшицем в 1935 г.

Существование отдельных областей самопроизвольного (спонтанного) намагничивания — доменов — может быть непосредственно обнаружено при рассмотрении под микроскопом отшлифованной поверхности ферромагнетика, покрытой тончайшим железным порошком. Этот порошок располагается по границам доменов. Такие опыты впервые проделали советские учёные Н. С. Акулов и М. В. Дегтяр.

У парамагнитных веществ атомы и молекулы обладают собственными магнитными полями. Под воздействием внешнего магнитного поля эти микрополя ориентируются преимущественно в направлении внешнего намагничивающего поля. С увеличением напряжённости внешнего поля H пропорционально ему увеличивается и индукция B , созданная в веществе микро-нолями. Тепловое движение молекул противодействует ориентации микрополей в направлении внешнего поля, поэтому в парамагнитных веществах не наблюдается намагничивания до насыщения.

Атомы диамагнитных веществ не имеют собственных магнитных полей. При возникновении в таких веществах внешнего магнитного поля они намагничиваются в направлении, противоположном внешнему полю. Объясняется это следующим.

Внешнее магнитное поле вызывает изменения в движении электронов внутри атомов, что, в свою очередь, приводит к возникновению магнитных полей атомов, направленных против внешнего поля (в соответствии с явлением электромагнитной индукции).

Итак, в магнитных свойствах вещества находит отражение его внутреннее молекулярно-атомное строение.

Детальное исследование магнитных свойств веществ позволяет физикам получить много данных о структуре вещества и свойствах элементарных частиц.

Дальнейшее изучение этих свойств расширит наши знания об окружающем нас мире.

Энергия магнитного поля катушки

Магнитное поле катушки обладает энергией. Такое заключение можно сделать из ряда опытов. Один из них описан в § 94. В этом опыте лампочку от карманного фонаря подключали в цепь источника тока параллельно с электромагнитом, обладающим большой индуктивностью. Так как напряжение источника было мало, то лампочка не светила, но при размыкании цепи лампочка ярко вспыхивала.

Свечение лампочки происходит во время размыкания цепи источника, следовательно, оно не связано с преобразованием энергии источника и происходит за счёт энергии индукционного тока, вызванного э. д. с. самоиндукции. Энергия же тока заключена главным образом в магнитном поле катушки с током. Следовательно, в момент размыкания цепи источника в лампочке происходит преобразование энергии, запасённой в магнитном поле катушки, в другие виды энергии. Как подсчитать энергию магнитного поля катушки?

Очевидно, что накопление энергии в магнитном поле происходит в момент замыкания цепи, так как в установившемся режиме, когда ток достигает постоянного значения, энергия магнитного поля не меняется, а источник расходует свою энергию лишь на поддержание постоянного тока и эта часть энергии превращается во внутреннюю энергию проводников (катушка нагревается).

В момент же нарастания тока в цепи от 0 до I источник совершает дополнительную работу против действующей в цепи э. д. с. самоиндукции, которая противодействует нарастанию тока. Энергия, запасённая в магнитном поле, будет равна этой работе источника.

Расчёты, выходящие за пределы курса средней школы, показывают, что величина энергии, запасённой в магнитном поле катушки, может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки.