

Троицкий АТК – филиал МГТУ ГА

Учебное пособие по дисциплине «Электротехника»

на тему: «Магнитные цепи» для специальностей:

25.02.03. «Техническая эксплуатация электрифицированных и пилотажно - навигационных комплексов»

25.02.01. «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей»

25.02.06. «Производство и обслуживание авиационной техники»

Троицк, 2024 г.

В предлагаемом учебном пособии изложены основные сведения по теме: «Магнитные цепи» в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования по учебной дисциплине «Электротехника»

Данное учебное пособие позволяет обучающимся самостоятельно изучать материал и использовать вопросы и задачи, приведённые в каждой главе для самоконтроля.

Организация – разработчик: Троицкий авиационный технический колледж – филиал Московского государственного технического университета Гражданской авиации.

Разработчик:

Жукова О.А., преподаватель Троицкого авиационного технического колледжа – филиала Московского государственного технического университета Гражданской авиации.

Учебное пособие рассмотрено

на заседании ЦК АиРЭО

Протокол № _____ от «___» _____ 2024 г.

Председатель ЦК АиРЭО _____ /Я. М. Стриженюк/

Согласовано:

Зам. директора по учебной работе _____ /В. А. Хомуткова/

«___» _____ 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА	6
1.1. Магнитное поле вокруг прямолинейного проводника с током	6
1.2. Круговой проводник с током	15
1.3. Соленоид. Электромагнит	16
1.4. Закон полного тока	20
1.5. Ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные тела	27
1.6. Гистерезис	28
1.7. Магнитные цепи и их расчет	30
1.8. Постоянные магниты	33
1.9. Проводник с током в магнитном поле	39
1.10. Принцип действия электродвигателя	41
1.11. Взаимодействие проводников с током	44
1.12. Магнитные и немагнитные материалы	46
Задачи для самостоятельного решения	55
Контрольные вопросы	56
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	57
2.1. Получение индуцированной электродвижущей силы (ЭДС)	57
2.2. Направление и величина индуцированной ЭДС	60
2.3. Принцип действия генератора	67
2.4. Правило Ленца	68
2.5. Вихревые токи	75
2.6. ЭДС самоиндукции и индуктивность цепи	79
2.7. Взаимоиндукция	87
2.8. Принцип действия трансформатора	93
2.9. Индукционная катушка	94
Задачи для самостоятельного решения	96
Контрольные вопросы	97
Заключение.	98
Список использованных источников.	100

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника - это увлекательная и важная область знаний, которая лежит в основе современной техники и технологий. Знакомство с основами электротехники позволит лучше понять принципы работы электронных устройств, электроприводов, электросетей и многого другого.

Это учебное пособие разработано с целью помочь обучающимся освоить основные концепции и принципы электротехники, а также научиться применять их на практике. Материал изложен максимально доступным и понятным образом.

В мире, где технологии играют всё более важную роль, понимание принципов электротехники становится необходимым для каждого, кто стремится разобраться в современных системах энергетики, электроники и автоматизации.

Электромагнетизм - одно из основных явлений в физике, благодаря которому мы можем понимать и контролировать мир вокруг себя. Электромагнетизм объединяет в себе два явления: электричество и магнетизм, которые оказались взаимосвязанными благодаря открытиям ученых XIX века, в числе которых выдаются Майкл Фарадей, Андре-Мари Ампер, Джеймс Клерк Максвелл.

Основополагающим явлением в электромагнетизме является электромагнитное поле, которое возникает при наличии электрических зарядов или при токе. Интересно, что электрическое поле изменяется при движении зарядов и создает магнитное поле, а, в свою очередь, изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле - это и есть основа взаимосвязи электричества и магнетизма.

Важное понятие в электромагнетизме - закон сохранения заряда, который означает, что суммарный электрический заряд в замкнутой системе остается постоянным. Благодаря этому принципу можно объяснить множество явлений, происходящих в электрических цепях, в магнитных материалах, в электромагнитных волнах и так далее.

Электромагнетизм находит широкое применение в нашей повседневной жизни - от работы электрических приборов до производства магнитных материалов для различных технологий. Без понимания электромагнетизма невозможно представить себе современный мир, полный технологических устройств и инноваций.

Таким образом, электромагнетизм играет ключевую роль в развитии науки и техники, открывая перед человечеством бесконечные возможности для исследования и применения.

ГЛАВА 1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Магнитное поле вокруг прямолинейного проводника с током

В первой главе мы изучали одну из сторон электромагнитного поля — поле электрическое. Теперь мы приступаем к рассмотрению другой стороны электромагнитного поля, называемой магнитным полем.

Если к прямолинейному проводнику с электрическим током поднести магнитную стрелку, то она будет стремиться стать перпендикулярно плоскости, проходящей через ось проводника и центр вращения стрелки. Это указывает на то, что на стрелку действуют особые силы, которые называются магнитными силами. Кроме действия на магнитную стрелку, магнитное поле оказывает влияние на движущиеся заряженные частицы и на проводники с током, находящиеся в магнитном поле. В проводниках, движущихся в магнитном поле, или в неподвижных проводниках, находящихся в переменном магнитном поле, возникает индуктивная э. д. с.

В соответствии с вышесказанным мы можем дать следующее определение магнитного поля.

Магнитным полем называется одна из двух сторон электромагнитного поля, возбуждаемая электрическими зарядами движущихся частиц и изменением электрического поля и характе-

ризующаяся силовым воздействием на движущиеся заряженные частицы, а стало быть, и на электрические токи.

Если продеть через картон толстый проводник и пропустить по нему электрический ток, то стальные опилки, насыпанные на картон, расположатся вокруг проводника по концентрическим окружностям, представляющим собой в данном случае так называемые магнитные индукционные линии (рис. 1). Мы можем передвигать картон вверх или вниз по проводнику, но расположение стальных опилок не изменится. Следовательно, магнитное поле возникает вокруг проводника по всей его длине.

Если на картон поставить маленькие магнитные стрелки, то, меняя направление тока в проводнике, можно увидеть, что магнитные стрелки будут поворачиваться (рис. 2). Это показывает, что направление магнитных индукционных линий меняется с изменением направления тока в проводнике.

Магнитные индукционные линии вокруг проводника с током обладают следующими свойствами: 1) магнитные индукционные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей; 2) чем ближе к проводнику, тем гуще располагаются магнитные индукционные линии; 3) магнитная индукция (интенсивность поля) зависит от величины тока в проводнике; 4) направление магнитных индукционных линий зависит от направления тока в проводнике.

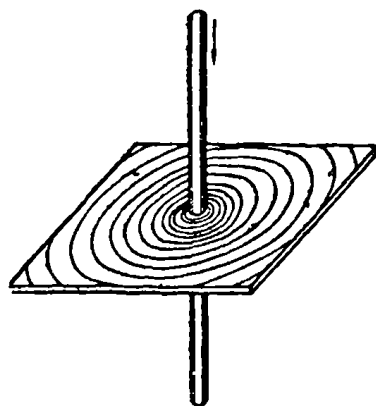


Рис. 1. Магнитное поле вокруг проводника с током



Рис. 2. Направление магнитных индукционных линий

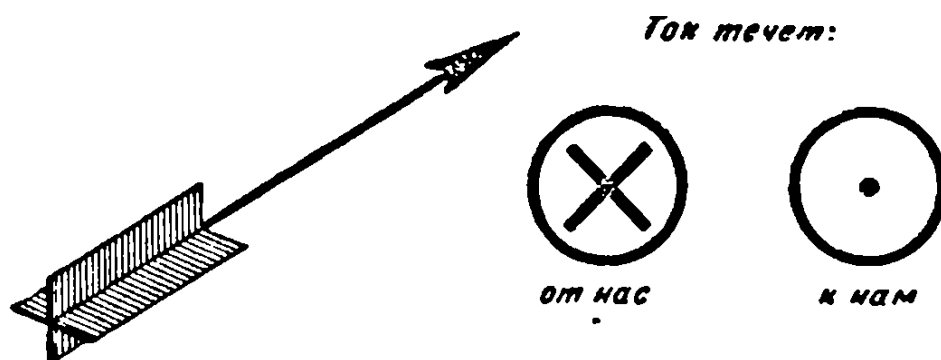


Рис. 3. Условное обозначение направления тока в проводниках

Чтобы показать направление тока в проводнике, изображенном в разрезе, принято условное обозначение, которым мы в дальнейшем будем пользоваться. Если мысленно поместить в проводнике стрелу по направлению тока (Рис. 3), то в проводнике, ток в котором направлен от нас, увидим хвост оперения стрелы (крестик); если же ток направлен к нам, увидим острие стрелы (точку).

Направление магнитных индукционных линий вокруг проводника с током можно определить по «правилу Буравчика».



Рис. 4. Определение направления магнитных индукционных линий вокруг проводника с током по «правилу Буравчика»

Если буравчик (штопор) с правой резьбой будет двигаться поступательно по направлению тока, то направление вращения ручки будет совпадать с направлением магнитных индукционных линий вокруг проводника (Рис. 4).

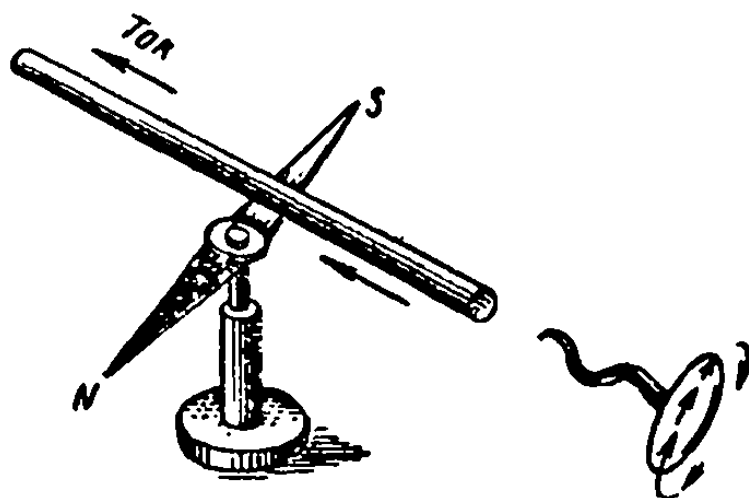


Рис. 5. Определение направления отклонения магнитной стрелки, поднесенной к проводнику с током, по «правилу Буравчика»

Магнитная стрелка, внесенная в поле проводника с током, располагается вдоль магнитных индукционных линий. Поэтому

для определения ее расположения можно также воспользоваться «правилом буравчика» (Рис. 5).

Магнитное поле есть одно из важнейших проявлений электрического тока и не может быть получено

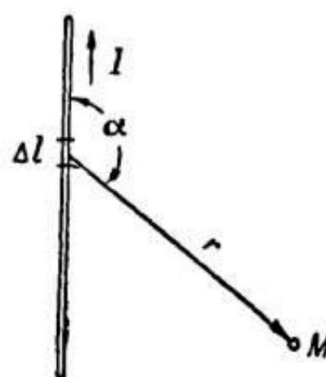


Рис. 6. К закону Био и Савара

независимо и отдельно от тока. Магнитное поле характеризуется

вектором магнитной индукции, который имеет, следовательно, определенную величину и определенное направление в пространстве.

Количественное выражение для магнитной индукции в результате обобщения опытных данных было установлено Био и Саваром (Рис. 6). Измеряя по отклонению магнитной стрелки магнитные поля электрических токов различной величины и формы, оба ученых пришли к выводу, что всякий элемент тока создает на некотором расстоянии от себя магнитное поле, магнитная индукция которого ΔB прямо пропорциональна длине Δl этого элемента, величине протекающего тока I , синусу угла α между направлением тока и радиусом-вектором, соединяющим интересующую нас точку поля с данным элементом тока, и обратно пропорциональна квадрату длины этого радиуса-вектора r :

$$\Delta B = K \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2}$$

где K — коэффициент, зависящий от магнитных свойств среды и от выбранной системы единиц.

В абсолютной практической рационализованной системе единиц МКСА

$$K = \frac{\mu \mu_0}{4\pi}$$

где μ_0 — магнитная проницаемость пустоты в системе МКСА:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad \frac{\text{генри}}{\text{метр}}$$

генри (**Гн**) — единица индуктивности; 1 Гн = 1 Ом·сек.,

μ — относительная магнитная проницаемость — безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная проницаемость данного материала больше магнитной проницаемости пустоты.

Размерность магнитной индукции можно найти по формуле

$$[\Delta B] = \left[\frac{\mu\mu_0 I \Delta l \sin\alpha}{4\pi r^3} \right] = \frac{\text{Ом}\cdot\text{сек}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{А}\cdot\text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{В}\cdot\text{сек}}{\text{м}^2}$$

вольт-секунда иначе называется вебером (вб):

$$[B] = \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}$$

На практике встречается более мелкая единица магнитной индукции — Гаусс (Гс):

$$1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = 10^4 \text{Гс}.$$

Закон Био и Савара позволяет вычислить магнитную индукцию бесконечно длинного прямолинейного проводника:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi a}$$

где a — расстояние от проводника до точки, где определяется магнитная индукция.

Отношение магнитной индукции к произведению магнитных проницаемостей $\mu \cdot \mu_0$ называется напряженностью магнитного поля и обозначается буквой H :

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}$$

или:

$$B = H\mu\mu_0$$

Последнее уравнение связывает две магнитные величины: индукцию и напряженность магнитного поля.

Найдем размерность H :

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu\mu_0} \right] = \frac{\text{в}\cdot\text{сек}\cdot\text{м}}{\text{м}^2\cdot\text{ом}\cdot\text{сек}} = \frac{\text{а}}{\text{м}}$$

Иногда пользуются другой единицей напряженности — эрстедом (Эр):

$$1 \text{ эр} = 79,6 \text{ а/м} \approx 80 \text{ а/м} \approx 0,8 \text{ а/см}$$

Напряженность магнитного поля H , как и магнитная индукция B , является векторной величиной.

Линия, касательная к каждой точке которой совпадает с направлением вектора магнитной индукции, называется линией магнитной индукции или магнитной индукционной линией.

Произведение магнитной индукции на величину площадки, перпендикулярной направлению поля (вектору магнитной индукции), называется потоком вектора магнитной индукции или просто магнитным потоком и обозначается буквой Φ :

$$\Phi = BS$$

Размерность магнитного потока:

$$[\Phi] = [BS] = \frac{\text{в}\cdot\text{сек}}{\text{м}^2} \text{м}^2 = \text{в}\cdot\text{сек} \text{ или вебер (вб)},$$

т. е. магнитный поток измеряется в вольт-секундах или веберах.

Более мелкой единицей магнитного потока является максвелл (Мкс):

$$1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$$

$$1 \text{ мкс} = 1 \text{ Гс} \cdot 1 \text{ см}^2$$

1.2. Круговой проводник с током

Возьмем проводник, согнутый по кругу, и пропустим по нему ток (Рис. 7). Из чертежа видно, что магнитные линии по-прежнему замыкаются вокруг проводника с током и имеют форму окружностей. Магнитные линии с одной стороны входят в плоскость кругового проводника, с другой выходят. Магнитное поле кругового тока напоминает собой поле очень короткого магнита, ось которого совпадает с перпендикуляром к середине плоскости контура.

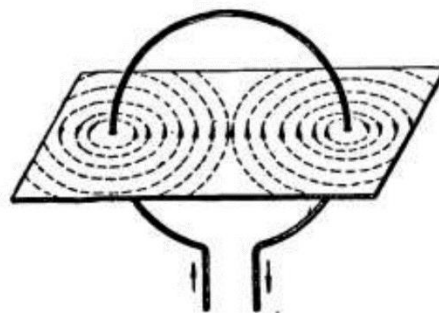


Рис. 7. Круговой проводник с током.

Направление поля кругового тока можно определить, пользуясь «правилом буравчика».

Буравчик нужно расположить по оси кругового тока перпендикулярно его плоскости. Если теперь вращать ручку буравчика по направлению тока в контуре, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля. Напряженность

магнитного поля в центре кругового проводника с током определяется по формуле:

$$H = \frac{I}{2R}$$

переходя к магнитной индукции, имеем:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \text{ или } B = \frac{\mu\mu_0 I}{D}$$

где R — радиус витка;

D — диаметр витка.

1.3. Соленоид. Электромагнит

Соленоидом называется проводник, свитый спиралью, по которому пропущен электрический ток (Рис. 8, а).

Если мысленно разрезать витки соленоида поперек, обозначить направление тока в них, как было указано выше, я определить направление магнитных индукционных линий по «правилу буравчика», то магнитное поле всего соленоида будет иметь такой вид, как показано на рис. 8, б.

На оси бесконечно длинного соленоида, на каждой единице длины которого намотано n_0 витков, напряженность поля определяется формулой:

$$H = In_0$$

В том месте, где магнитные линии входят в соленоид, образуется южный полюс, где они выходят — северный полюс.

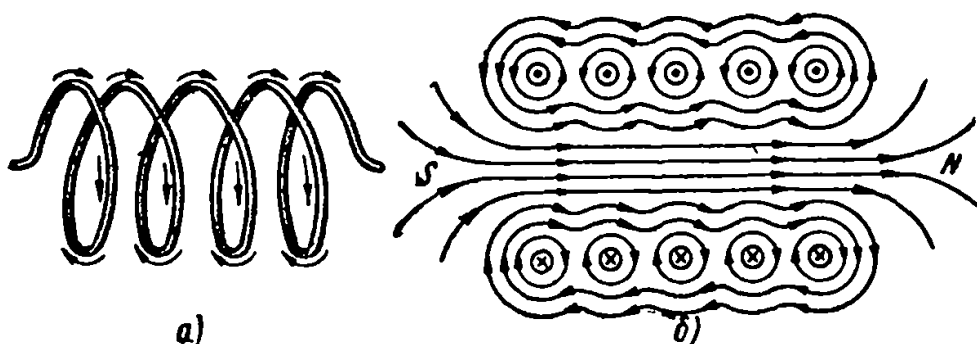


Рис. 8. Соленоид (а) и его магнитное поле (б)

Для определения полюсов соленоида пользуются «правилом буравчика», применяя его следующим образом: если расположить буравчик вдоль оси соленоида и вращать его по направлению тока в витках соленоида, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля (Рис. 9),



Рис. 9. Определение полюсов соленоида

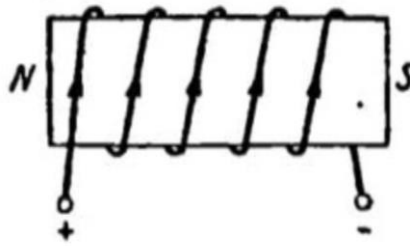


Рис. 10. Электромагнит

Соленоид, внутри которого находится стальной (железный) сердечник, называется электромагнитом (рис. 10). Магнитное поле у электромагнита сильнее, чем у соленоида, так как кусок стали, вложенный в соленоид, намагничивается и результирующее магнитное поле усиливается. Полюсы у электромагнита можно определить, так же, как и у соленоида, по «правилу буравчика»-

Электромагниты широко применяются в технике. Они служат для создания магнитного поля в электрических генераторах и двигателях, в электроизмерительных приборах, электрических аппаратах и т. п.

В установках большой мощности для отключения поврежденного участка цепи вместо плавких предохранителей применяются автоматические, масляные и воздушные выключатели. Для приведения в действие отключающих катушек автоматических выключателей применяются различные реле. Реле называются приборы или автоматы, реагирующие на изменение тока, напряжения, мощности, частоты и пр.

Из большого числа реле, различных по своему назначению, принципу действия и конструкции, кратко рассмотрим устройство электромагнитных реле. На рис. 11 представлены конструкции этих реле. Работа реле основана на взаимодействии магнитного поля, создаваемого неподвижной катушкой, по которой

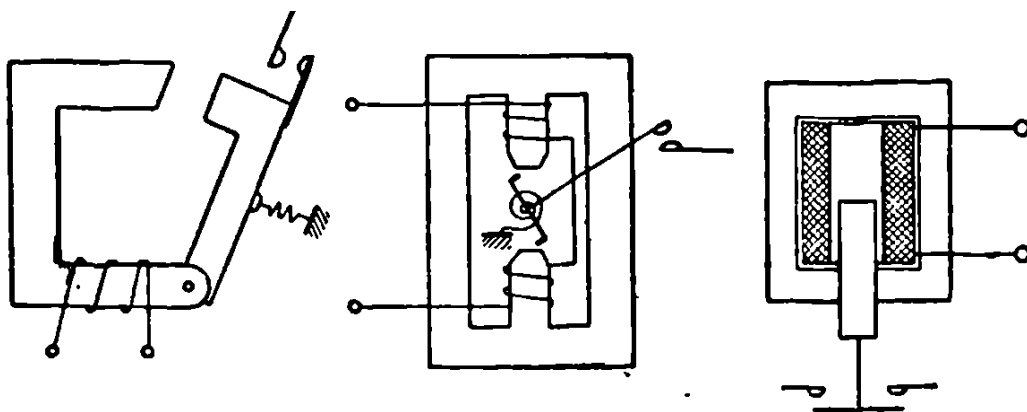


Рис. 11. Электромагнитное реле.

проходит ток, и стального подвижного якоря. При изменении условий работы в цепи главного тока катушка реле возбуждается, магнитный поток сердечника подтягивает (поворачивает или втягивает) якорь, который замыкает контакты в цепи, отключающей катушки привода масляных и воздушных выключателей или вспомогательных реле.

Реле нашли себе применение также в автоматике и телемеханике.

Магнитный поток соленоида (электромагнита) увеличивается с увеличением числа витков n и тока в нем. Намагничивающая сила зависит от произведения тока на число витков (числа ампер-витков).

Если, например, взять соленоид, по обмотке которого проходит ток 5 а и число витков которого равно 150 , то число ампер-витков будет $5 \cdot 150 = 750$. Тот же магнитный поток получится, если взять 1500 витков и пропустить по ним ток $0,5$ а, так как $0,5 \cdot 1500 = 750$ ампер-витков.

Увеличить магнитный поток соленоида можно следующими путями: 1) вложить в соленоид стальной сердечник, превратив его в электромагнит; 2) увеличить сечение стального сердечника электромагнита (так как при данных токе, напряженности магнитного поля, и стало быть, магнитной индукции увеличение сечения ведет к росту магнитного потока); 3) уменьшить воздушный зазор электромагнита (так как при уменьшении пути магнитных линий по воздуху уменьшается магнитное сопротивление).

1.4. Закон полного тока

Пусть произвольная замкнутая линия l пронизывает проводник с током (рис. 12), т. е. они сцепляются друг с другом как два звена цепи. Вокруг проводника возникает магнитное поле.

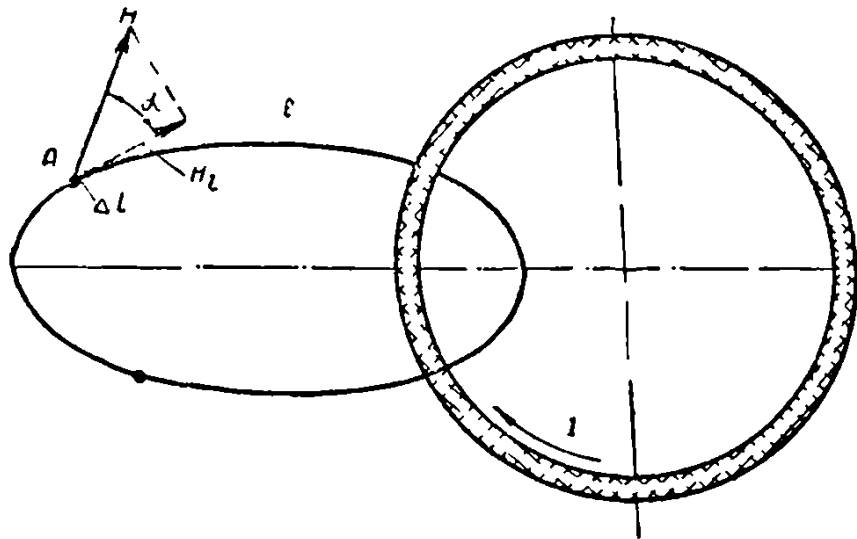


Рис. 12. Закон полного тока

Построим вектор напряженности H , создаваемой током в точке A , расположенной на линии l . Если линия охватывает несколько проводников с током, то для каждого тока строятся векторы напряженности в данной точке линии. Складывая геометрически отдельные векторы напряженности, находим вектор результирующей напряженности магнитного поля.

Вектор результирующей напряженности H в общем случае образует с элементом длины Δl угол α . Поэтому продольная или тангенциальная составляющая H_1 результирующей напряженности H будет:

$$H_1 = H \cos \alpha$$

Если разбить замкнутую линию на n элементов длины и сложить произведения длин всех элементов на тангенциальные со-

ставляющие результирующей напряженности в этих элементах, получим следующую сумму:

$$H_1 \Delta l_1 \cos \alpha_1 + H_2 \Delta l_2 \cos \alpha_2 + \dots + H_n \Delta l_n \cos \alpha_n$$

Эту сумму можно представить так:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k \Delta l_k \cos \alpha_k$$

Где знак $\sum_{k=1}^{k=n}$ означает сумму от $k = 1$ до $k = n$

В теоретической электротехнике доказывается, что указанная сумма равна алгебраической сумме токов, сцепляющихся с контуром суммирования подобно тому, как сцепляются между собой два смежных звена цепи.

Следовательно, можно написать:

$$\sum H_k \Delta l_k \cos \alpha_k = \sum I$$

Это выражение называется законом полного тока. Для случая, когда контур многократно пронизывает один и тот же ток, как, например, при наличии обмотки с числом витков w , полный ток будет:

$$\sum I = \omega l$$

Если замкнутый контур суммирования совпадает магнитной линией, то вектор напряженности в любой точке контура будет направлен по касательной к элементу длины Δl .

В этом случае

$$\mathbf{H} = H_k; \mathbf{a}_k = \mathbf{0}; \cos \alpha_k = 1,$$

и закон полного тока принимает вид:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k \Delta l_k = \sum I$$

Если значение напряженности для всех точек контура при этом одинаково, а сумма Δl по контуру равна l , то закон полного тока запишется так:

$$Hl = \sum I$$

Закон полного тока является основным законом при расчете магнитных цепей и дает возможность в некоторых случаях легко определять напряженность поля.

Например, применяя закон полного тока для определения напряженности на расстоянии a от прямолинейного проводника с током, имеем:

$$\Sigma I = I,$$

$$l = 2\pi a$$

Поэтому

$$H 2\pi a = I,$$

Откуда

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad \frac{\text{а}}{\text{м}}$$

Эта же формула была нами получена из закона Био и Савара. Чтобы определить напряженность поля внутри катушки, намотанной на кольцо (Рис. 13), воспользуемся опять законом полного тока. Контуром здесь является окружность радиуса r . Контур пронизывает w проводников с токами одного направления:

$$H \times 2\pi r = I\omega.$$

Обозначая длину средней линии кольца через $l = 2\pi r$, получаем:

$$Hl = I\omega,$$

Откуда

$$H = \frac{l\omega}{l} \frac{a}{\text{м}}$$

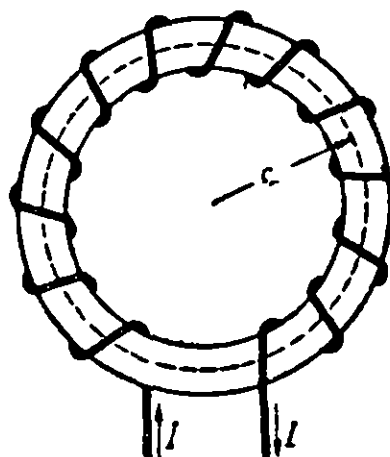


Рис. 13. К определению напряженности поля катушки, намотанной на кольцо

Таким образом, напряженность поля катушки пропорциональна произведению числа ампер на число витков или числу ампер-витков. $I \cdot w$ называется намагничивающей силой (НС) и обозначается буквой F . Так как w — число отвлеченное, то намагничивающая сила измеряется в амперах.

Магнитная индукция внутри катушки будет:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{l\omega}{l} \frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$$

Если площадь поперечного сечения кольца по всей длине одинакова и равна S , то, зная магнитную индукцию B , можно определить магнитный поток Φ :

$$\Phi = BS = \mu\mu_0 HS = \mu\mu_0 \frac{I\omega S}{l} \text{ Вб.}$$

Эту формулу можно представить в ином виде:

$$\Phi = \frac{\omega I}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}}$$

По своему строению эта формула напоминает формулу Ома. Выше было указано, что произведение $l \cdot w$ называется намагничивающей силой. Выражение $\left(\frac{l}{\mu\mu_0 S}\right)$, стоящее в знаменателе, называется магнитным сопротивлением и обозначается буквой R_M :

$$R_M = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$$

Из этой формулы видно, что магнитное сопротивление пропорционально длине пути и обратно пропорционально сечению материала, по которому проходит магнитный поток.

Таким образом, магнитный поток Φ пропорционален намагничивающей силе F и обратно пропорционален магнитному сопротивлению R_m :

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

1.5. Ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные тела

По характеру магнитных свойств все вещества можно разделить на три группы:

1. Ферромагнитные — вещества, сильно притягивающиеся к магниту. К ним принадлежат железо, сталь, чугун, никель, кобальт, редкоземельный элемент гадолиний и некоторые сплавы.

2. У этих веществ относительная магнитная проницаемость имеет величину от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч. Например, для кобальта — 150, никеля — 300, железа — до 500, пермаллоя (сплав стали с никелем) — до 100000.

3. Парамагнитные — вещества, слабо притягивающиеся к магниту. К ним принадлежат алюминий, магний, олово, платина, марганец, кислород и др. У этих веществ относительная магнитная проницаемость немного больше единицы. Например, у воздуха $\mu = 1,0000031$.

4. Диаманитные — вещества, слабо отталкивающиеся от магнита. К ним принадлежат цинк, ртуть, свинец, сера, медь, хлор, серебро, вода и др. У этих веществ относительная магнитная проницаемость немного меньше единицы. Например, у меди $\mu = 0,999995$.

1.6. Ферромагнитные тела в магнитном поле

Зависимость между B и H у ферромагнитных материалов обычно выражается графически в виде так называемой кривой намагничивания. Для построения кривой от горизонтальной оси откладывают напряженность магнитного поля H в $\frac{a}{m}$, $\frac{a}{cm}$ или эрстедах, а по вертикальной оси откладывают величину магнитной индукции B в $\frac{wb}{m^3}$, $\frac{wb}{cm^2}$ или гауссах. На рис. 14 приведены кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна. Величины напряженности магнитного поля для литой стали даны на нижней горизонтали, для электротехнической стали и чугуна — на верхней горизонтали. Из рассмотрения кривой намагничивания видно, что с увеличением напряженности H магнитная индукция B сначала быстро возрастает, затем в месте изгиба кривой скорость роста B уменьшается и, наконец, за изгибом кривая незначительно поднимается вверх, переходя в прямую линию. Последний участок кривой характеризует состояние магнитного насыщения материала. Из кривой

намагничивания видно, что отношение $\frac{B}{\mu_0} = \mu$ не является постоянной величиной, а все время меняется с изменением B и H .

Магнитная проницаемость ферромагнитных тел зависит от величины магнитной индукции, химического состава металла, его предварительной термической и механической обработки,

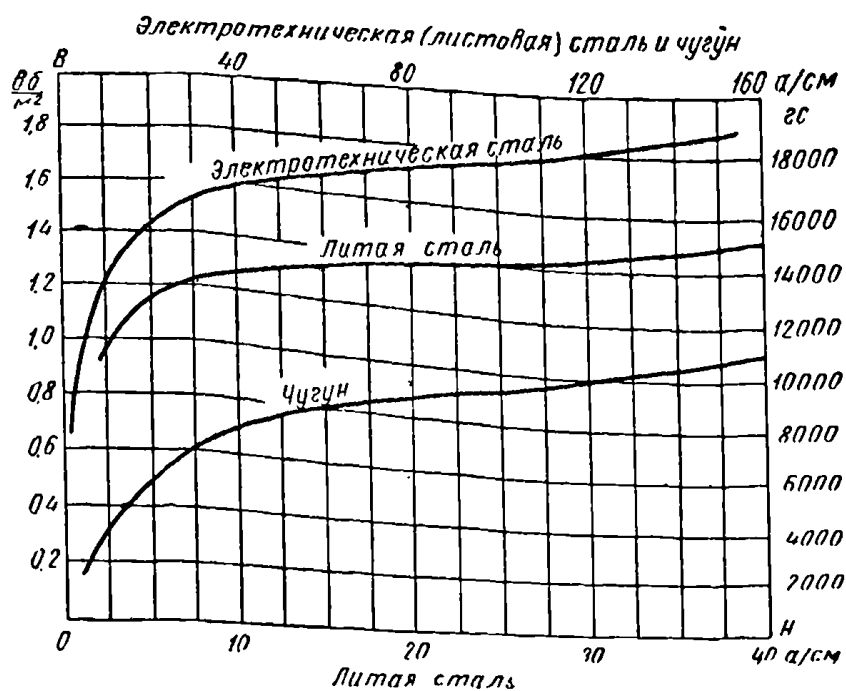


Рис. 14. Кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна

температуры металла. Кроме того, магнитная проницаемость этих тел зависит от их формы и геометрических размеров.

Кривые намагничивания снимаются опытным путем отдельно для каждого материала и каждого сорта этого материала.

Будем уменьшать ток в витках катушки. Напряженность поля, а вместе с ней и магнитная индукция будут уменьшаться. Когда ток в обмотке катушки будет равен нулю, напряженность поля также будет равна нулю. Однако стальной сердечник будет сохранять некоторую магнитную индукцию.

Индукция, которая остается в ферромагнитном теле при напряженности поля, равной нулю, называется остаточной индукцией или остаточным магнетизмом.

Небольшим остаточным магнетизмом обладают чистое железо, мягкая сталь, сплавы железа с кремнием (электротехническая сталь), сплавы железа с никелем (пермаллой). Эти металлы и сплавы легко намагничиваются и так же легко размагничиваются. Они нашли себе применение при изготовлении сердечников электромагнитов, трансформаторов, полюсных наконечников, якорей генераторов и т. п.

Наибольшим остаточным магнетизмом обладают специальные сорта твердых сталей: вольфрамовой, хромистой, кобальтовой, алюминиевой. Эти стали применяются для изготовления постоянных магнитов.

1.7. Гистерезис

Рассмотрим процесс переменного намагничивания ферромагнитного материала. Для этой цели намотаем на стальной сердечник обмотку и будем по ней пропускать постоянный ток. Предположим, что сердечник электромагнита ранее не был намагничен. Увеличивая проходящий по виткам обмотки ток I от

нуля, мы тем самым будем увеличивать намагничивающую силу и напряженность поля H . Величина магнитной индукции B в сердечнике будет также увеличиваться. Кривая намагничивания Oa на рис. 15 имеет прямолинейную часть, а затем вследствие насыщения кривая поднимается медленно, приближаясь к горизонтали. Если теперь, достигнув точки a , уменьшать H , то будет уменьшаться и B . Однако уменьшение B при уменьшении H , т. е. при размагничивании, будет происходить с запаздыванием по отношению к уменьшению H . Величина остаточной индукции при $H=0$ характеризуется отрезком Ob .

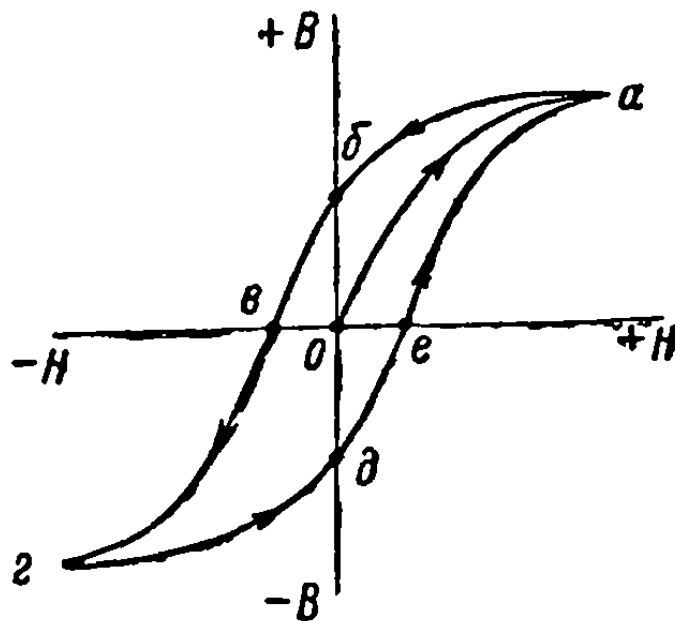


Рис. 15. Петля гистерезиса.

Для того чтобы магнитная индукция в сердечнике стала равной нулю, необходимо намагничивать материал в обратном направлении, т. е. перемагничивать его. Для этой цели направление

тока в обмотке меняется на обратное. Направление магнитных линий и напряженности поля также изменяется. При напряженности поля $H=0$ индукция в сердечнике равна нулю и материал сердечника полностью размагничен. Значение напряженности поля $H=0$ при $B=0$ является определенной характеристикой материала и называется задерживающей (коэрцитивной) силой.

Повторяя процесс перемагничивания, мы получаем замкнутую кривую $a b c d e a$, называемую петлей гистерезиса. На этом опыте легко убедиться, что намагничивание и размагничивание сердечника (появление и исчезновение полюсов, магнитной индукции или магнитного потока) отстают от момента появления и исчезновения намагничивающей и размагничивающей силы (тока в обмотке электромагнита). Явление гистерезиса можно иными словами охарактеризовать как отставание изменений магнитной индукции от изменений напряженности поля. Перемагничивание материала связано с затратой некоторого количества энергии, которая выделяется в виде тепла, нагревающего материал.

Гистерезис особенно сильно сказывается, если материал сердечника обладает большим остаточным магнетизмом (например, твердая сталь). Явление гистерезиса в большинстве случаев вредно. Оно сопровождается нагревом сердечника, лишней затратой мощности источника напряжения и гудением сердечника вследствие перемены полярности и поворотов элементарных частиц материала сердечника.

Первое серьезное исследование процессов намагничивания стали было проведено Александром Григорьевичем Столетовым (1839—1896) в 1872 г. и опубликовано в работе «О функции намагничивания мягкого железа».

А. Г. Столетов, кроме того, исследовал и объяснил природу внешнего фотоэффекта и изготовил первый фотоэлемент.

1.8. Магнитные цепи и их расчет

Магнитной цепью или магнитопроводом называется путь, по которому замыкается магнитный поток. Этот путь может проходить целиком по воздуху.

На рис. 16, *а* показан соленоид. Магнитная цепь здесь проходит через воздух. Магнитное сопротивление воздуха очень велико, поэтому даже при большой намагничивающей силе магнитный поток мал.

Для увеличения магнитного потока в состав магнитной цепи вводят ферромагнитные материалы (обычно литая или электротехническая сталь), имеющие меньшее магнитное сопротивление.

На рис. 16, *б* представлен прямой электромагнит с разомкнутым сердечником. Магнитные линии только небольшую часть своего пути проходят по стальному сердечнику, большую же часть своего пути они проходят по воздуху. Полюсы электромагнита определяются при помощи правила буравчика».

Подковообразный электромагнит, изображенный на рис.

16, в, представляет магнитную цепь с лучшими условиями для прохождения магнитного потока. При такой конструкции поток большую часть пути проходит по стали и меньшую часть от полюса N до полюса S по воздуху.

На рис. 16, г представлена конструкция магнитной цепи, применяемая в электромашиностроении и приборостроении. Между полюсами электромагнита помещается стальной якорь. Большую часть своего пути магнитные линии проходят по стали и только очень малую часть (от нескольких долей миллиметра до 2—3 мм) проходят по двум воздушным промежуткам. Трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник (рис. 16, д). Сердечники трансформаторов собираются из нескольких частей, но во время сборки принимают меры к тому, чтобы воздушные зазоры между отдельными частями практически были равны нулю.

До сих пор мы не говорили о том, что магнитный поток, созданный намагничивающей силой, не весь замыкается по тому пути, который ему предназначен. Помимо рабочего магнитного потока, существует магнитный поток рассеяния, который замыкается вне того места, где используется рабочий поток. На рис. 16, б, в, г, д показаны потоки рассеяния.

Таким образом, общий магнитный поток, который должна создать обмотка возбуждения электромагнита, равен сумме рабочего потока и потока рассеяния.

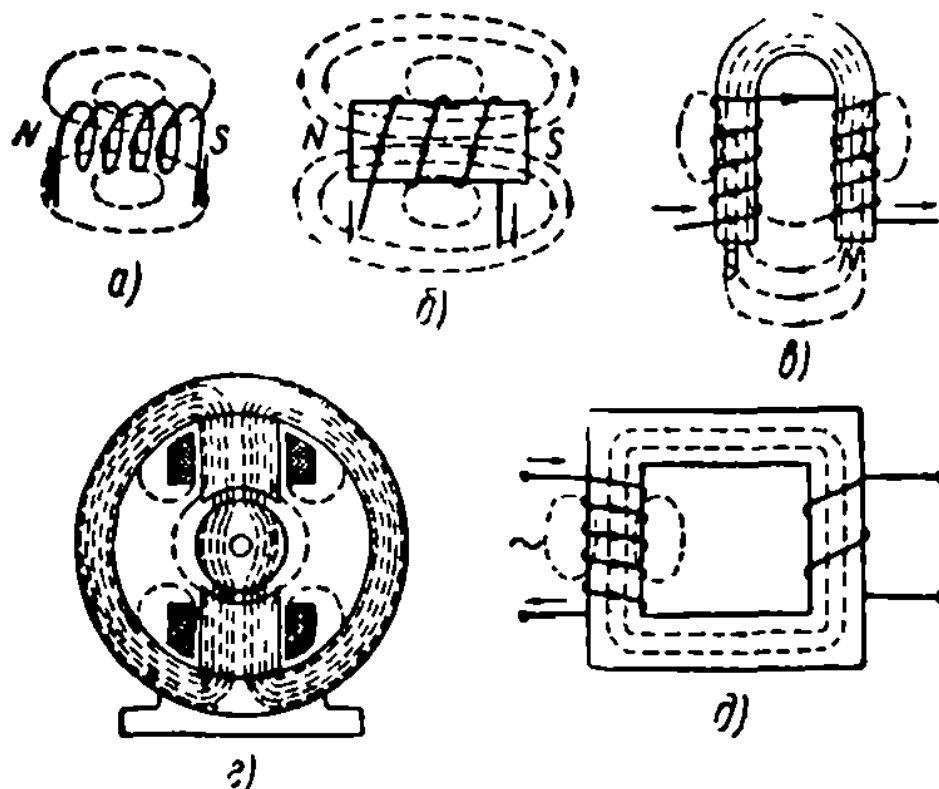


Рис. 16. Примеры магнитных цепей

Расчет магнитной цепи, казалось бы, можно производить по формуле:

$$\Phi = \frac{I_{\omega}}{\frac{l_{cp}}{\mu\mu_0 S}}$$

Но если вспомнить, что относительная магнитная проницаемость μ для ферромагнитных тел непостоянна и зависит от

многих причин, то становится ясно, что этой формулой можно пользоваться лишь в том случае, когда в состав магнитной цепи входят только немагнитные тела (в том числе и воздух), для которых μ есть заранее заданная величина.

На практике для расчета магнитных цепей предпочитают пользоваться графическими методами решения.

Расчет магнитной цепи производят в следующем порядке. Задаются необходимой величиной магнитного потока. Разбивают магнитную цепь на участки, имеющие одинаковые поперечные сечения и однородный материал, и для каждого участка определяют величину магнитной индукции по формуле:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Затем по кривым намагничивания для данного материала находят для каждого значения магнитной индукции величину H . Если в магнитной цепи встречаются воздушные зазоры, то зависимость между B_0 и H_0 определяется по формуле:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0 10^7}{4\pi} = 80 \cdot 10^4 B_0 \frac{a}{m}$$

Здесь B_0 выражено в

$$\frac{вб}{м^2}, \mu_0 - \frac{гн}{м}, \quad H_0 - \frac{a}{см}$$

Если индукция выражена в гауссах, а напряженность в $\frac{a}{см}$,

то зависимость между B_0 и H_0 будет:

$$H_0 = 0,8 B_0.$$

Определив величину H для каждого участка, находим по закону полного тока величину намагничивающей силы по формуле:

$$Iw = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_3 l_3$$

Пример. Найти намагничивающую силу обмотки электромагнита, изображенного на рис. 17, Размеры даны в миллиметрах. Материал сердечника — электротехническая сталь. В сердечнике необходимо создать магнитный поток 60 000 мкс. Магнитным рассеянием пренебрегаем.

Проводим среднюю линию по всей длине магнитной цепи. Разбиваем цепь на пять участков и определяем длину каждого участка.

Так как магнитный поток во всех участках одинаков и площадь поперечного сечения всех участков магнитной цепи одинакова (2x2 см), то магнитная индукция везде также будет одинакова.

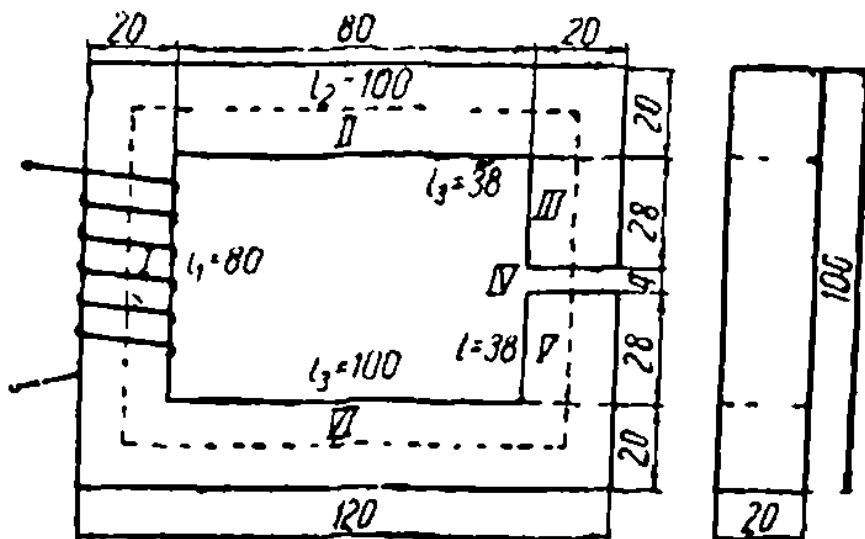


Рис. 17. К примеру расчета магнитной цепи.

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{60000_{\text{мкс}}}{4\text{см}^2} = 15000 \text{ Гс.}$$

По кривой намагничивания (рис. 14) для электротехнической стали по индукции 15 000 гс находим напряженность магнитного поля $H=30 \text{ а/см}$. Для воздушного зазора имеем:

$$H_0 = 0,8 \cdot 15000 = 12000 \frac{\text{а}}{\text{см}}$$

Умножая величины напряженности на длины соответствующих участков, получаем произведения HI для этих участков.

№ частков	Материал	B	l	H	HI
		Гс	см	А·см	А
I	Эл.техническая сталь	15000	8	30	240
II и VI	То же	15000	10x2	30	600
III и V	- " -	15000	3,8x2	30	228
IV	Воздух	15000	0,4	12000	4800

$$I \omega = \Sigma (HI) = 5868 \text{ А}$$

Результаты вычислений записываем в таблицу (табл. 1).

Интересно отметить, что если на участках из электротехнической стали I, II, III, V и VI общей протяженностью 35,6 см (8+20+7,6 см) для проведения магнитного потока необходима намагничивающая сила 1068А (240+ +600+228 А), то

на воздушный зазор длиной всего 4 мм (в 89 раз меньше длины пути по стали) нужна намагничивающая сила 4800 А. Отсюда становится понятной необходимость создания магнитных цепей с минимальными воздушными зазорами.

1.9. Постоянные магниты

Магнитное поле намагниченного ферромагнитного тела (т. е. постоянного магнита), согласно современным научным представлениям, создается в основном собственным вращением электронов вокруг осей, проходящих через них, что эквивалентно некоторым элементарным замкнутым токам.

В не намагниченном теле отдельные группы элементарных токов и их магнитные поля расположены хаотически. Поэтому во внешнем пространстве магнитного поля не наблюдается.

Под влиянием внешнего магнитного поля элементарные токи, обусловленные собственным вращением электронов, в большей или меньшей степени устанавливаются параллельно один другому и создают результирующее магнитное поле.

Ферромагнитное тело, обладающее остаточной намагниченностью, называется постоянным магнитом.

Если постоянный магнит накрыть картоном или стеклом и насыпать сверху железных опилок, то они будут располагаться в виде изогнутых линий, идущих от одного полюса магнита к другому (рис. 18). Условно считают магнитные индукционные ли-

нии выходящими из северного полюса магнита и входящими в его южный полюс (рис. 18).

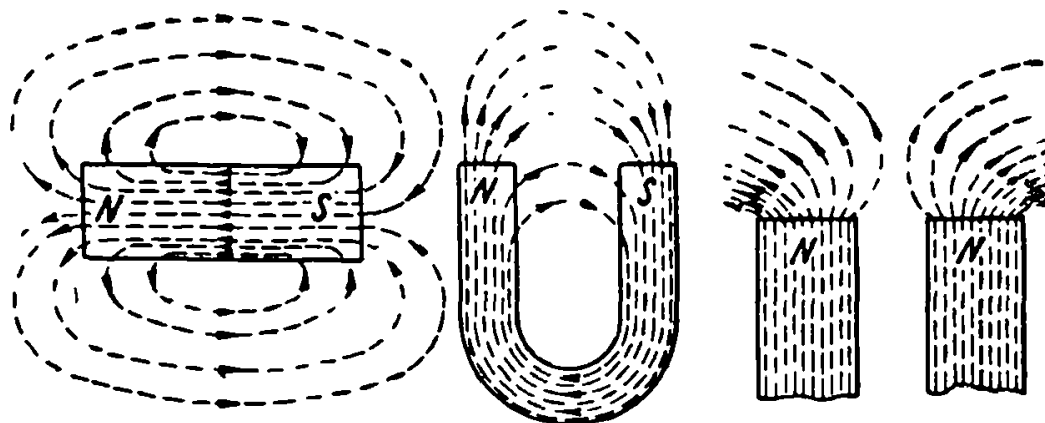


Рис. 18. Магнитное поле постоянных магнитов

Магнитные индукционные линии обладают следующими свойствами:

- ▶ образуют замкнутые контуры, т. е. нигде не прерываются;
- ▶ внутри магнита магнитные индукционные линии идут от южного полюса к северному;
- ▶ имеют стремление укоротиться по своей длине, т. е. обладают свойством продольного тяжения;
- ▶ стремятся воздействовать друг на друга в перпендикулярном к их длине направлении, т. е. обладают свойством бокового распора;
- ▶ магнитные индукционные линии никогда не пересекаются.

1.10. Проводник с током в магнитном поле

Если внести проводник с током в магнитное поле (рис. 19. а), то мы увидим, что в результате сложения магнитных полей магнита и проводника произойдет усиление результирующего магнитного поля с одной стороны проводника (на чертеже сверху) и ослабление магнитного поля с другой стороны проводника (на чертеже снизу).

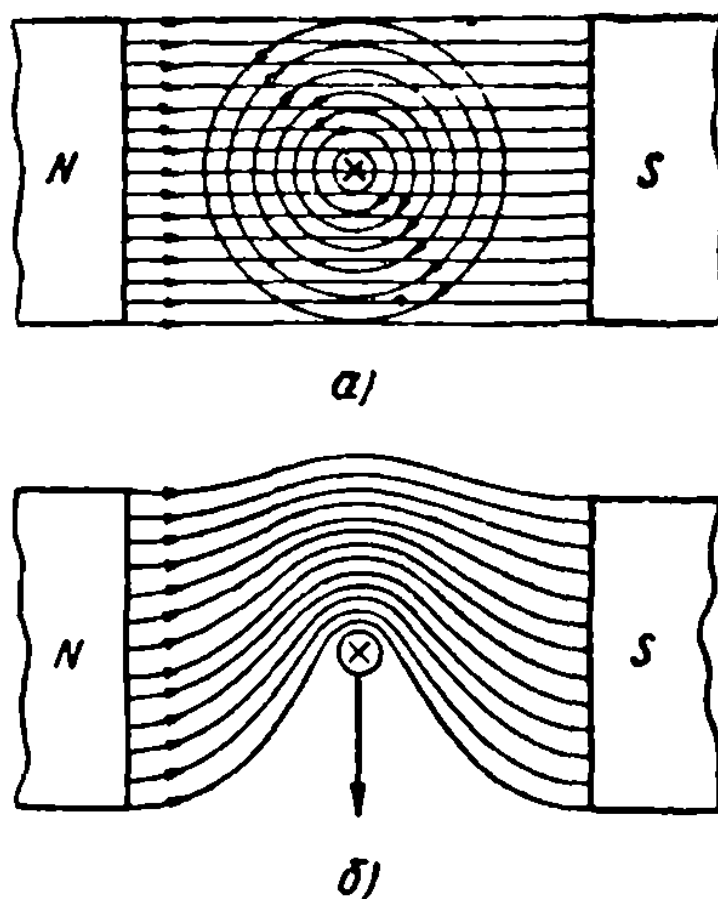


Рис. 19. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля

В результате действия двух магнитных полей произойдет искривление магнитных линий и они, стремясь сократиться, будут выталкивать проводник вниз (рис. 19, б).

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить по «правилу левой руки». Если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса, как бы входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то большой отогнутый палец руки покажет направление действия силы (рис. 20).

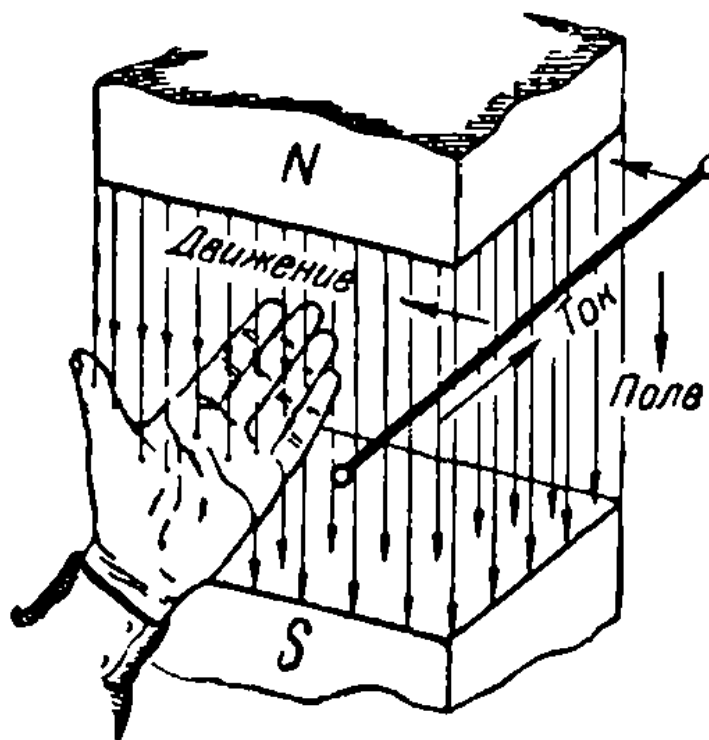


Рис. 20. *Определение направления силы, действующей на проводник по «правилу левой руки»*

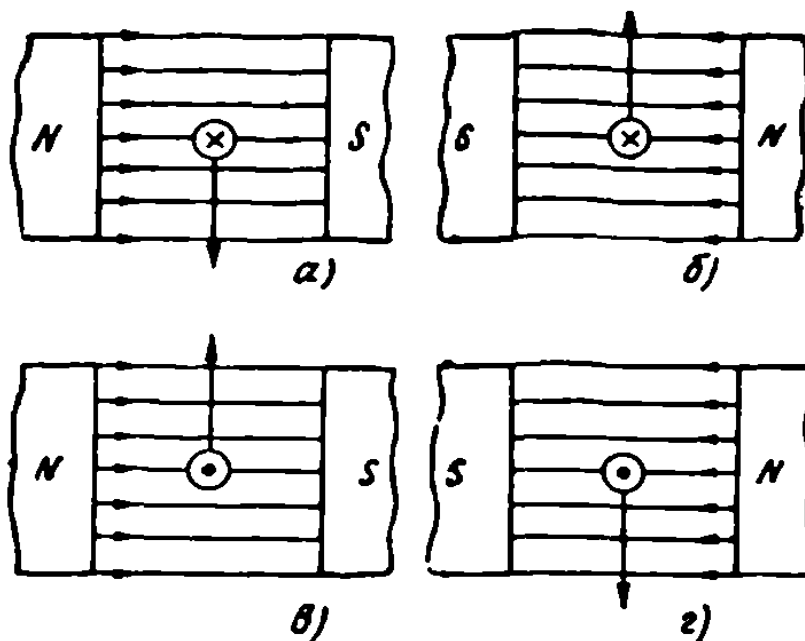


Рис. 21. Зависимость направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, от направления поля и направления тока в проводнике.

Из рис. 21 видно, что направление силы, действующей на проводник, можно изменить, либо меняя полюсы и изменяя этим направление магнитного поля (рис. 21, *а* и *б*, а также *в* и *г*), либо меняя направление тока в проводнике (рис. 21, *а* и *в*, *б* и *г*).

Если же поменять и полюсы и направление тока в проводнике одновременно, то направление силы, действующей на проводник, не изменится (рис. 21, *а* и *г*, а также *б* и *в*).

Сила ΔF , действующая на элемент длины Δl проводника, зависит: от величины магнитной индукции B , величины тока в проводнике I , от элемента длины Δl проводника и от синуса угла α между направлением элемента длины Δl проводника и

направлением магнитного поля. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$\Delta F = BI\Delta l \sin \alpha$$

Для прямолинейного проводника конечной длины, помещенного перпендикулярно к направлению равномерного магнитного поля, сила, действующая на проводник, будет равна:

$$F = BIl.$$

Из последней формулы определим размерность магнитной индукции.

Так как размерность силы

$$[F] = \frac{\text{дж}}{\text{м}} = \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{м}} = \frac{\text{в} \cdot \text{а} \cdot \text{сек}}{\text{м}}$$

то размерность магнитной индукции

$$[B] = \frac{[F]}{[I][l]} = \frac{\frac{\text{в} \cdot \text{а} \cdot \text{сек}}{\text{м}}}{\text{а} \cdot \text{м}} = \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$$

т. е. размерность индукции такая же, какая была получена нами из закона Био и Савара.

1. 11. Принцип действия электродвигателя

Электродвигателем называется машина, которая преобразовывает электрическую энергию в механическую. Первый электрический двигатель был построен в 1838 г. русским академиком Б. С. Якоби. Все электродвигатели работают на принципе взаимодействия проводника с током и магнитного поля. На рис.

22 показана схема устройства электродвигателя постоянного тока. Магнитное поле здесь создают полюсы 1 и 2 электромагнита.

Проводники, по которым пропускается ток, расположены в пазах стального барабана якоря 3.

Если пропустить по проводникам верхней половины якоря ток «от нас», а в нижней половине якоря — «к нам», то по «правилу левой руки» проводники верхней половины якоря будут выталкиваться из магнитного поля влево, а проводники нижней половины — вправо. Так как проводники якоря лежат в пазах его, то, выталкиваясь из магнитного поля, они будут поворачивать якорь.

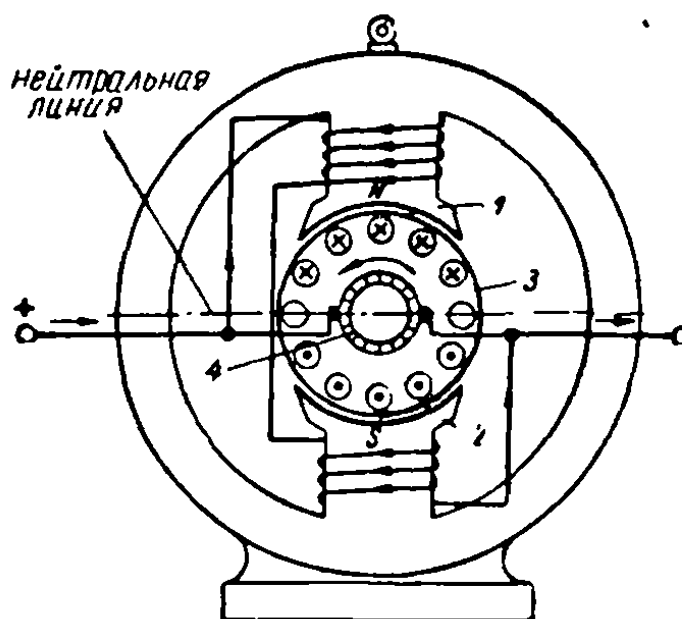


Рис. 22. Схема электрического двигателя

Из рисунка видно, что если проводник с направлением тока «от нас» перейдет вниз и станет против южного полюса электромагнита, то он начнет выталкиваться влево, что будет мешать

якорю поворачиваться. То же самое случится, если проводник с направлением тока «к нам» из нижней половины якоря перейдет наверх и станет против северного полюса электромагнита.

Поэтому нужно сделать так, чтобы, как только проводник в своем движении перейдет нейтральную линию, направление тока в нем изменилось. В электродвигателях постоянного тока это достигается с помощью специального устройства — коллектора 4, к которому подведены концы проводников якоря.

1.12. Взаимодействие проводников с током

Если близко один к другому расположены проводники с токами одного направления, то магнитные линии этих проводников, охватывающие оба проводника, обладая свойством продольного натяжения и стремясь сократиться, будут заставлять проводники притягиваться (рис. 23, а).

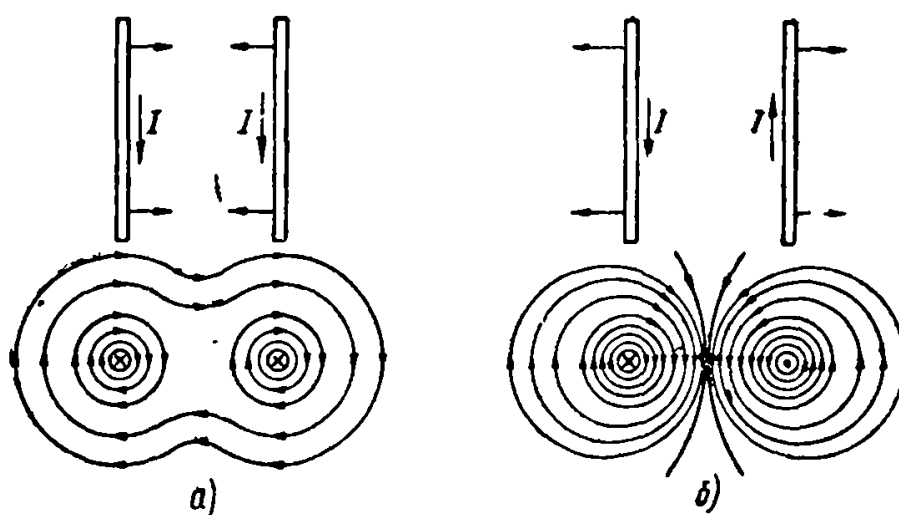


Рис. 23. Взаимодействие двух проводников с токами: а – протекающими в одну сторону, б – протекающими в разные стороны

Магнитные линии двух проводников с токами разных направлений в пространстве между проводниками направлены в одну сторону. Магнитные линии, имеющие одинаковое направление, обладают свойством бокового распора. Поэтому проводники с токами противоположного направления отталкиваются один от другого (рис. 23, б).

Рассмотрим взаимодействие двух параллельных проводов с токами, расположенными на расстоянии a один от другого. Пусть длина проводов равна l .

Магнитная индукция, созданная током I_1 , на линии расположения второго проводника, равна:

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi a}$$

На второй проводник будет действовать сила

$$F_2 = lI_2B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}$$

Магнитная индукция, созданная током I_2 на линии расположения первого проводника, будет равна:

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi a}$$

и на первый проводник действует сила

$$F_1 = B_2 l I_1 = \frac{\mu \mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}$$

равная по величине силе F_2 .

1.13. Магнитные и немагнитные материалы

В магнитных цепях различных электрических машин, трансформаторов, приборов и аппаратов электротехники, радиотехники и других отраслей техники встречаются разнообразные магнитные и немагнитные материалы.

Свойства магнитного материала характеризуются величинами напряженности магнитного поля, магнитного потока, магнитной индукции и магнитной проницаемости.

Зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля, выраженная графически, образует кривую, называемую петлей гистерезиса. Пользуясь этой кривой, можно получить ряд данных, характеризующих магнитные свойства материала.

Переменное магнитное поле вызывает появление в магнитных материалах вихревых токов. Эти токи нагревают сердечники (магнитопроводы), что приводит к затрате некоторой мощности.

Для характеристики материала, работающего в переменном магнитном поле, суммарное значение мощности, затрачиваемой на гистерезис и вихревые токи при частоте 50 *гц*, относят к 1 *кг*

веса материала. Эта величина называется удельными потерями и выражается в *вт/кг*.

Магнитная индукция того или иного магнитного материала не должна превышать некоторой максимальной величины в зависимости от вида и качества данного материала. Попытки увеличить индукцию приводят к увеличению потерь энергии в данном материале и нагреву его.

Магнитные материалы делятся на две группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы. Магнитно-мягкие материалы должны отвечать следующим требованиям:

- 1) обладать большой относительной магнитной проницаемостью μ , позволяющей получать большую магнитную индукцию B при возможно малом числе ампер-витков;
- 2) иметь возможно меньшие потери на гистерезис и вихревые токи;
- 3) обладать стабильностью магнитных свойств.

Магнитно-мягкие материалы используются в качестве магнитопроводов электрических машин, сердечников трансформаторов, дросселей, электромагнитов реле, электроизмерительных приборов и т. п. Рассмотрим некоторые магнитно-мягкие материалы.

Электролитическое железо получают путем электролиза сернокислого или хлористого железа с последующей плавкой в вакууме продуктов электролиза. Измельченное в порошок

электролитическое железо идет на изготовление магнитных деталей по типу изготовления керамики или пластмасс.

Карбонильное железо получается в виде порошка в результате термического разложения вещества, в состав которого входит железо, углерод и кислород $[\text{Fe}(\text{CO})_5]$. При температуре 1200° порошок карбонильного железа спекается и идет на изготовление таких же деталей, которые выполняются из электролитического железа. Карбонильное железо отличается высокой чистотой и пластичностью; применяется в электровакуумной промышленности, а также в приборостроении для изготовления лабораторных инструментов и приборов.

Рассмотренные нами два вида особо чистого железа (электролитическое и карбонильное) содержат не более 0,05% примесей.

Листовая электротехническая сталь является наиболее распространенным материалом в электромашиностроении и трансформаторостроении. Электротехническая сталь легируется кремнием для улучшения ее магнитных свойств и уменьшения потерь на гистерезис. Кроме того, в результате введения кремния в состав стали увеличивается ее удельное сопротивление, что приводит к уменьшению потерь на вихревые токи. Толщина листа в зависимости от марки стали 0,3 и 0,5 мм. Электротехническая сталь, прокатанная в холодном состоянии с последующим отжигом в атмосфере водорода, имеет особо высокие магнитные свойства. Это объясняется тем, что «кристаллы металла

располагаются параллельно направлению прокатки. Такая сталь обозначается буквами ХВП (холоднокатаная высокой проицаемости, текстурованная). Листы стали имеют размеры от 1000x700 до 2000x1000 мм.

Марки электротехнической стали раньше обозначались, например, так: ЭЗА, Э1АБ, Э4АА. Буква Э означает — электротехническая сталь; буква А — пониженные потери мощности в переменном магнитном поле; буквы АА—особо низкие потери; буква Б — повышенная магнитная индукция; цифры 1—4 показывают количество содержащегося в -стали кремния в процентах.

Согласно ГОСТ 802—54, введены новые обозначения марок электротехнической стали, например: ЭИ, Э21, Э320, Э370, Э43. Здесь буква Э означает — электротехническая сталь; первые цифры: 1—слаболегированная кремнием; 2 — среднелегированная кремнием; 3 — повышении легированная кремнием и 4 — высоколегированная кремнием. Вторые цифры в обозначении марок указывают на следующие гарантированные магнитные и электрические свойства сталей: 1, 2, 3—удельные потери при перемагничивании сталей при частоте 50 гц и магнитная индукция в сильных полях; 4 — удельные потерн при перемагничивании сталей при частоте 400 гц и магнитная индукция в средних полях; 5, 6 — магнитная проицаемость в слабых полях (H менее 0,01 а/см); 7, 8 — магнитная проицаемость в средних полях (H от 0,1 до 1 а/см). Третья цифра 0 указывает на то, что сталь холоднокатаная, текстурованная.

Пермаллой — сплав железа и никеля. Примерный состав пермаллоя: 30—80% никеля, 10—18% железа, остальное — медь, молибден, марганец, хром. Пермаллой хорошо обрабатывается и выпускается в виде листов. Обладает очень высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (до 200000 *гн/см*). Пермаллой применяется для изготовления деталей телефонной и радиотехнической связи, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, реле, деталей электроизмерительных приборов.

Альсифер — сплав алюминия, кремния и железа. Примерный состав альсифера: 9,5% кремния, 5,6% алюминия, остальное — железо. Альсифер — твердый и хрупкий сплав, поэтому он обрабатывается с трудом. Преимущества альсифера — высокая магнитная проницаемость в слабых магнитных полях (до 110 000 *гн/см*), большое удельное сопротивление ($\rho = 0,81 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), отсутствие в его составе дефицитных металлов. Применяется для изготовления сердечников, работающих в высокочастотных установках.

Пермендюр — сплав железа с кобальтом и ванадием (50% кобальта, 1,8% ванадия, остальное — железо). Пермендюр выпускается в виде листов, полос и лент. Применяется для изготовления сердечников электромагнитов, динамических репродукторов, мембран, телефонов, осциллографов и т. п.

Магнитодиэлектрики — магнитно-мягкие материалы, раздробленные в мелкие зерна (порошок), которые изолируются одно от другого смолами или другими связками. В качестве

порошка магнитного материала применяется электролитическое железо, карбонильное железо, пермаллой, альсифер, магнетит (минерал $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Изолирующими связками являются: шеллак, фенолоформальдегидные смолы, полистирол, жидкое стекло и др. Порошок магнитного материала смешивают с изолирующей связкой, тщательно перемешивают и из полученной массы прессуют под давлением сердечники трансформаторов, дросселей, детали радиоаппаратуры. Зернистое строение магнитоэлектрических материалов обуславливает малые потери на вихревые токи при работе этих материалов в магнитных полях токов высокой частоты.

Магнитно-твердые материалы. Магнитно-твердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов. Эти материалы должны отвечать следующим требованиям:

- 1) обладать большой остаточной индукцией;
- 2) иметь большую максимальную магнитную энергию;
- 3) обладать стабильностью магнитных свойств.

Самым дешевым материалом для постоянных магнитов является углеродистая сталь (0,4—1,7% углерода, остальное — железо). Магниты, изготовленные из углеродистой стали, обладают невысокими магнитными свойствами и быстро теряют их под влиянием нагрева, ударов и сотрясений.

Легированные стали обладают лучшими магнитными свойствами и применяются для изготовления постоянных магнитов

чаще, чем углеродистая сталь. К таким сталям относятся хромистая, вольфрамовая, кобальтовая и кобальто-молибденовая.

Для изготовления постоянных магнитов в технике разработаны сплавы на основе железа—никеля — алюминия. Эти сплавы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, поэтому они могут обрабатываться только шлифованием. Сплавы обладают исключительно высокими магнитными свойствами и большой магнитной энергией в единице объема.

В табл. 2 приведены данные о составе некоторых магнитно-твердых материалов для изготовления постоянных магнитов.

Таблица 2

Химический состав магнитно-твердых материалов

Наименование материала	Химический состав в весовых процентах	Относительный вес на единицу магнитной энергии
Углеродистая сталь	0,45 С остальное Fe	26,7
Хромистая сталь	2—3 Cr; 1 С	17,2
Вольфрамовая сталь	5W; 1 С	15,8
Кобальтовая сталь	5—30 Со; 5—8 Cr; 1,5—5W	5,1—12,6
Кобальто-молибденовая сталь	13—17 Мо; 10—12 Со	3,8
Альни	12,5 Al; 25 Ni; 5 Си	3,6
Альниси	14 Al; 34 Ni; 1 Si	3,4
Альнико	10Al; 17Ni; 12 Со; 6 Си	3,1
Магнико	24 Со; 13 Si; 8 Al; 3 Си	1

Немагнитные материалы. В различных приборах и аппаратах, применяемых в электротехнике, необходимо иметь материал, не обладающий магнитными свойствами. Для таких целей пригодны пластмасса и цветные металлы (алюминий, латунь, бронза). Однако эти материалы обладают малой механической

прочностью, а некоторые из них дефицитны. В связи с этим они заменяются немагнитной сталью и немагнитным чугуном.

Примерный состав немагнитной стали: 0,25—0,35% углерода, 22—25% никеля, 2—3% хрома, остальное — железо. Немагнитная сталь применяется для стяжки и крепления трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности и т. п.

Примерный состав немагнитного чугуна: 2,6—3% углерода, 2,5% кремния, 5,6% марганца, 9—12% никеля, остальное — железо.

Немагнитный чугун применяется для изготовления крышек, кожухов, втулок, масляных выключателей, кабельных муфт, кожухов сварочных трансформаторов.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 100 А , проходящим по длинному прямолинейному проводнику в точке, удаленной от проводника на 10 см . **(Ответ: 159 А/м)**

2. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 20 А , проходящим по кольцевому проводнику радиусом 5 см в точке, расположенной в центре витка.

(Ответ: 200 А/м)

3. Определить магнитный поток, проходящий в куске никеля, помещенного в однородное магнитное поле напряженностью 500 А/м . Площадь поперечного сечения куска

никеля 25 см^2 . Относительная магнитная проницаемость никеля 300. (Ответ: $15\pi \cdot 10^{-5} \text{ Вб}$)

4. Прямолинейный проводник длиной 40 см помещен в равномерное магнитное поле под углом 30° к направлению магнитного поля. По проводнику проходит ток 50 А. Индукция поля равна 5000 Гс. Определить силу, с которой проводник выталкивается из магнитного поля. (Ответ: 5Н)

5. Определить силу, с которой два прямолинейных, параллельно расположенных в воздухе проводника отталкиваются один от другою. Длина проводников 2 м, расстояние между ними 20 см. Токи в проводниках по 10 А. (Ответ: $2 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$)

Контрольные вопросы

1. На каком опыте можно убедиться, что вокруг проводника с током образуется магнитное поле?
2. Каковы свойства магнитных линий?
3. Как определить направление магнитных линий?
4. Что называется соленоидом и каково его магнитное поле?
5. Как определить полюсы соленоида?
6. Что называется электромагнитом и как определить его полюсы?
7. Что такое гистерезис?
8. Какие бывают формы электромагнитов?
9. Как взаимодействуют между собой проводники, по которым течет электрический ток?

10. Что действует на проводник с током в магнитном поле?
11. Как определить направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
12. На каком принципе основана работа электродвигателей?
13. Какие тела называются ферромагнитными, парамагнитными и диамагнитными?

ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

2.1. Получение индуктированной электродвижущей силы (ЭДС)

Возьмем постоянный магнит 1 (рис. 24, *a*) и будем опускать его в катушку 2 (соленоид). Мы увидим, что стрелка гальванометра 3 , включенного в цепь, отклонится (например, вправо). Это указывает на появление ЭДС и тока в соленоиде.

Если прекратить движение магнита, то стрелка гальванометра вернется в нулевое положение (рис. 24, *б*).

Это показывает, что для появления индуктированной ЭДС, нужно иметь не только магнитное поле и проводник, но и движение их относительно друг друга.

Вынимая магнит из катушки (рис. 24, *в*), можно заметить, что стрелка гальванометра отклонится, но уже в другую сторону (влево). Это показывает, что направление индуктированной ЭДС зависит от направления движения магнитного поля,

пересекающего неподвижный проводник, или от направления движения проводника, пересекающего магнитное поле.

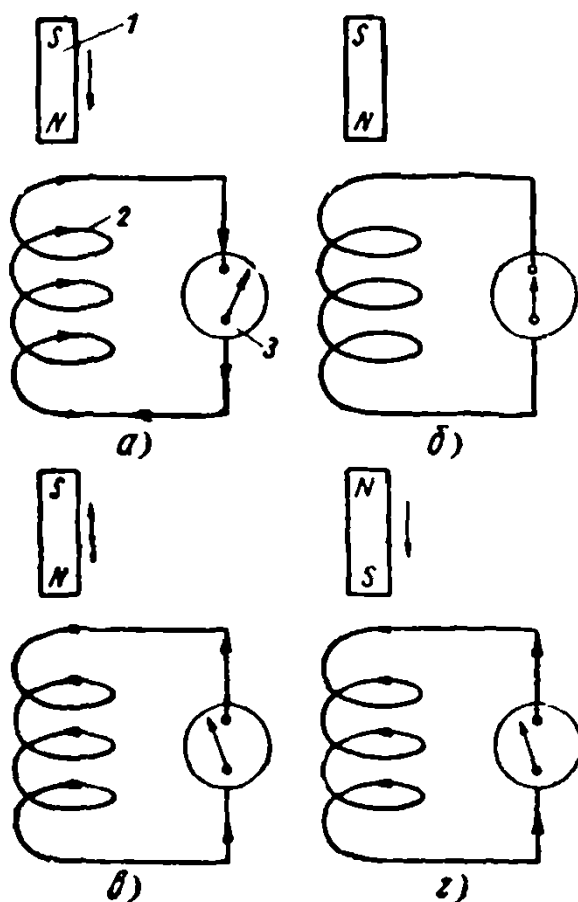


Рис. 24. Зависимость направления индуцированной ЭДС от направления магнитного поля и направления движения магнитного поля по отношению к проводнику

В приведенном опыте мы видели, что при опускании постоянного магнита в катушку стрелка гальванометра отклонялась вправо в том случае, когда магнит был расположен северным полюсом вниз (рис. 24, а). Если повернуть магнит северным полюсом вверх и снова опускать в катушку, то стрелка гальванометра отклонится в другую сторону, т. е. влево (рис. 24,

г). Это показывает, что направление индуцированной ЭДС зависит еще от направления магнитного поля.

Явление возникновения ЭДС в контуре при пересечении его магнитным полем называется электромагнитной индукцией и было открыто английским физиком М. Фарадеем в 1831 г.

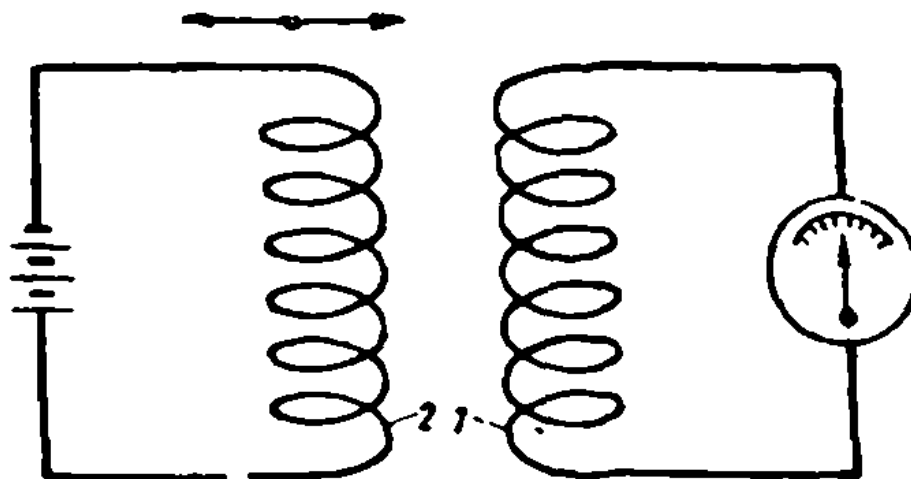


Рис. 25. Взаимоиндукция

Если к замкнутому проводнику 1 (рис. 25), не имеющему тока, приближать или удалять проводник 2, по которому проходит электрический ток, то в проводнике 1 будет индуцироваться э. д. с. Точно так же, если оба проводника 1 и 2 оставлять неподвижными, но менять ток либо разрывать или замыкать цепь, в которую входит проводник 2, то в проводнике 1 будет появляться индуцированная ЭДС. Возникновение ЭДС во втором контуре вследствие изменения тока в первом контуре называется взаимной индукцией. Она имеет место в трансформаторах,

индукционных катушках и т. д. Индуцированную ЭДС можно получить еще следующим образом.

Известно, что проводник, по которому течет электрический ток, окружен магнитным полем. Если изменять величину или направление тока в проводнике или размыкать и замыкать электрическую цепь, питающую проводник током, то магнитное поле, окружающее проводник, будет изменяться. Изменяясь, магнитное поле проводника пересекает этот же самый проводник и наводит в нем ЭДС. Это явление называется самоиндукцией. Сама индуцированная ЭДС, называется ЭДС самоиндукции.

2.2. Направление и величина индуцированной ЭДС

Индуцированная ЭДС возникает в следующих трех случаях:

1. Когда движущийся проводник пересекает неподвижное магнитное поле или, наоборот, перемещающееся магнитное поле пересекает неподвижный проводник; или когда проводник и магнитное поле, двигаясь в пространстве, перемещаются одни относительно другого.

2. Когда переменное магнитное поле одного проводника, действуя на другой проводник, индуцирует в нем ЭДС (взаимоиндукция).

3. Когда изменяющееся магнитное поле проводника индуцирует в нем самом ЭДС (самоиндукция).

Таким образом, всякое изменение во времени величины магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур (виток, рамку), сопровождается появлением в проводнике индуктированной ЭДС.

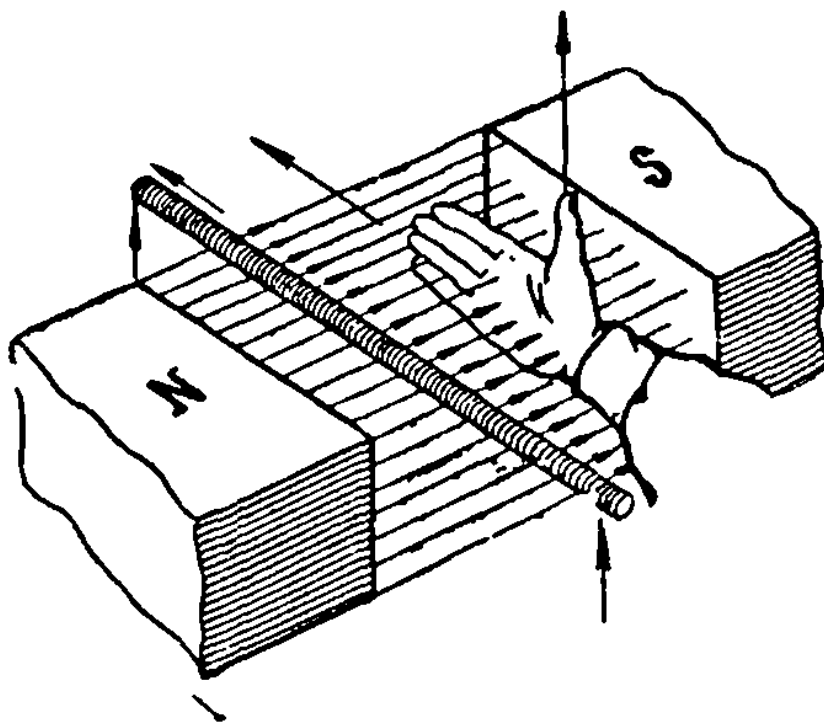


Рис. 26. Определение направления индуктированной ЭДС в проводнике по «правилу левой руки»

Как было отмечено выше, направление индуктированной ЭДС зависит от направления движения проводника и от направления магнитного поля.

Для определения направления индуктированной ЭДС в проводнике служит «правило правой руки». Оно заключается в следующем: если мысленно расположить правую руку в магнитном поле вдоль проводника так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса, входили в ладонь, а большой

отогнутый палец совпадал с направлением движения проводника, то четыре вытянутых пальца будут показывать направление индуцированной ЭДС в проводнике (рис. 26).

В случаях, когда проводник остается неподвижным, а магнитное поле движется, для определения направления индуцированной ЭДС нужно предположить, что поле остается неподвижным, а проводник движется в сторону, обратную движению поля, и применить также «правило правой руки».

Явление индуцированной ЭДС можно также объяснить при помощи электронной теории.

Поместим проводник в магнитное поле. Свободные электроны проводника будут находиться в беспорядочном тепловом движении. Положительные и отрицательные заряды равномерно расположены по всему объему проводника и взаимно нейтрализуют друг друга. Будем перемещать проводник с определенной скоростью в однородном магнитном поле в направлении n (рис. 27) перпендикулярно вектору магнитной индукции. Магнитные линии, показанные точками, направлены из-за плоскости чертежа к читателю. Вместе с проводником перемещаются его атомы и их ядра и электроны.

На электрические заряды проводника в этом случае будет действовать сила, под действием которой свободные электроны получат добавочную составляющую скорости и будут двигаться вдоль проводника.

В то время как положительные заряды, связанные с кристаллической решеткой проводника, относительно проводника не смещаются, движущиеся вместе с проводником свободные электроны могут перемещаться относительно него.

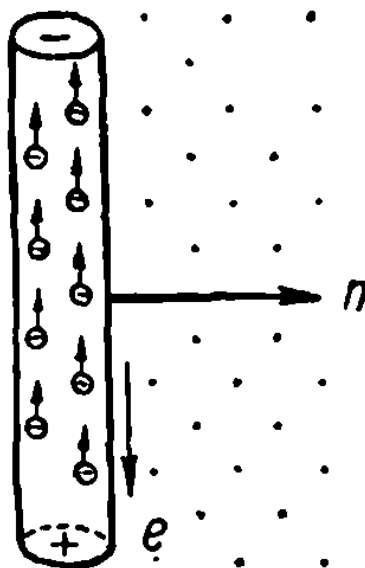


Рис. 27. Электромагнитная индукция в проводнике.

В нашем примере электроны движутся от нижнего края проводника к его верхнему краю, что соответствует направлению тока сверху вниз. Направление индуцированной ЭДС и тока в проводнике, как легко убедиться, согласуется с правилом правой руки.

Величина индуцированной ЭДС в проводнике зависит:

- ▶ от величины индукции B магнитного поля, так как чем гуще расположены магнитные индукционные линии,

- ▶ тем большее число их пересечет проводник за единицу времени (секунду);
- ▶ от скорости движения проводника v в магнитном поле,
- ▶ так как при большой скорости движения проводник может больше пересечь индукционных линий в секунду;
- ▶ от рабочей (находящейся в магнитном поле) длины проводника l , так как длинный проводник может больше пересечь индукционных линий в секунду;

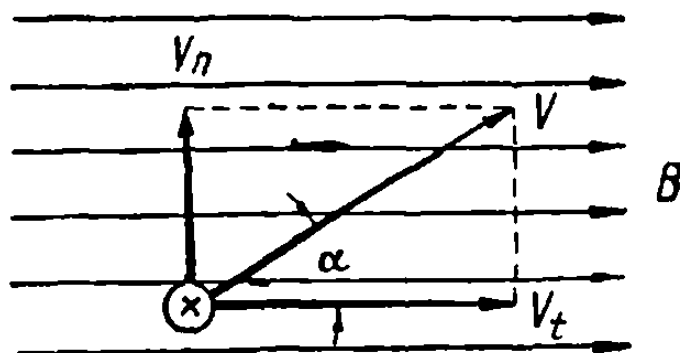


Рис. 28. Разложение скорости движения проводника в магнитном поле.

- ▶ от величины синуса угла α между направлением движения проводника и направлением магнитного поля (рис. 28).

Раскладываем вектор скорости движения проводника в магнитном поле на две составляющие: v_n — составляющую нормальную к направлению поля ($v_n = v \cdot \sin \alpha$) и v_t — тангенциальную составляющую ($v_t = v \cdot \cos \alpha$), которая не принимает участия в создании э. д. с., так как при движении под воздействием тангенциальной составляющей проводник двигался бы параллельно вектору B и не пересекал бы линий магнитной

индукции. Величина индуцированной ЭДС может быть найдена по формуле

$$e = Blv \sin \alpha, (B)$$

Познакомившись с явлением электромагнитной индукции, рассмотрим еще раз процесс преобразования электрической энергии в механическую.

Пусть прямолинейный проводник AB (рис. 29), по которому проходит ток от источника напряжения, помещен во внешнее магнитное поле. Если проводник неподвижен, то энергия источника напряжения расходуется исключительно на нагрев проводника:

$$A = UIt = I^2rt \text{ Дж}$$

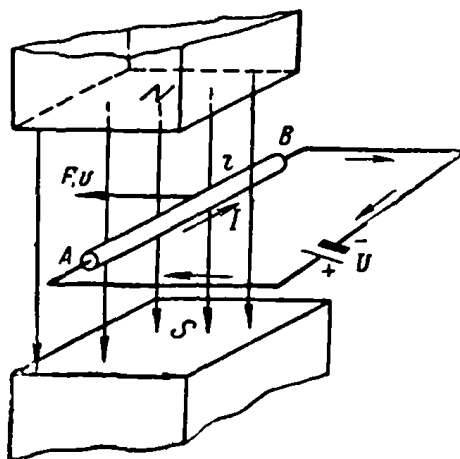


Рис. 29. Преобразование электрической энергии в механическую

Затрачиваемая мощность будет равна:

$$P_{эл} = UI = I^2 r \text{ (Вт)}$$

откуда определяем ток в цепи:

$$I = \frac{U}{r} \quad (\text{А})$$

Однако нам известно, что проводник с током, помещенный в магнитное поле, будет испытывать силу со стороны поля, стремящуюся перемещать проводник в магнитном поле в направлении, определяемом правилом левой руки. При своем движении проводник будет пересекать магнитные линии поля и в нем по закону электромагнитной индукции возникнет индуцированная э. д. с. Направление этой ЭДС, определенное по правилу правой руки, будет обратным току I . Назовем ее обратной ЭДС $E_{обр}$.

Величина $E_{обр}$ согласно закону электромагнитной индукции будет равна:

$$E_{обр} = Blv \text{ В}$$

По второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи имеем:

$$U - E_{обр} = Ir$$

Или

$$U = E_{\text{обр}} + Ir \quad (\text{B})$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E_{\text{обр}}}{r} \quad (\text{A})$$

Сравнивая выражения (а) и (в), видим, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, при одних и тех же значениях U и r ток будет меньше, чем при неподвижном проводнике.

Умножаем полученное выражение (б) на 1, получим:

$$UI = E_{\text{обр}}I + I^2r$$

Так как

$$E_{\text{обр}} = Blv,$$

то

$$UI = BlvI + I^2r$$

Учитывая, что

$$BlI = F \text{ и } Fv = P_{\text{мех}},$$

имеем:

$$UI = Fv + I^2r$$

или

$$P = P_{\text{мех}} + P_{\text{эл}}$$

Последнее выражение показывает, что при движении проводника с током в магнитном поле мощность источника напряжения преобразуется в тепловую и механическую мощности.

2.3. Принцип действия генератора

Генератором называется машина, преобразующая механическую энергию в электрическую. Работа генератора основана на использовании явления электромагнитной индукции. В генераторе якорь 1 (рис. 30) с обмоткой вращается первичным двигателем в магнитном поле полюсов N и S электромагнитов 2. Электродвижущая сила, индуцируемая в проводниках обмотки якоря при помощи коллектора 3 и щеток, отводится во внешнюю цепь. Благодаря наличию коллектора ток, отдаваемый обмоткой якоря во внешнюю цепь, будет постоянным.

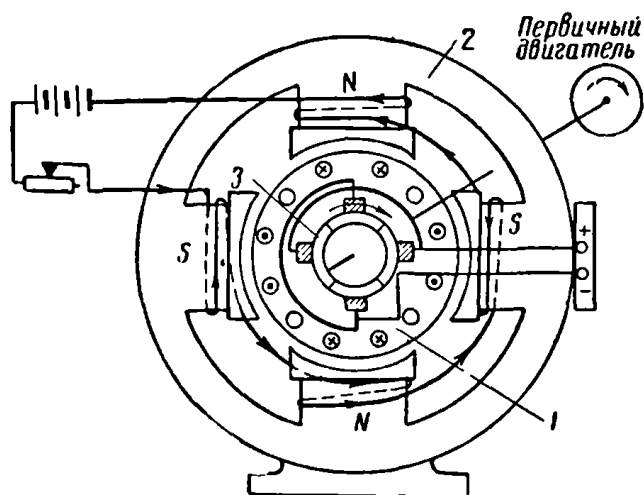


Рис. 30. Схема генератора постоянного тока.

Для вращения генератора в качестве первичного двигателя можно применить паровую машину, паровую турбину, водяную турбину, двигатель внутреннего сгорания, ветряной двигатель, электрический двигатель.

2.4. Правило Ленца

В 1834 г. русский академик Э. Х. Ленц, известный своими многочисленными исследованиями в области электромагнитных явлений, дал универсальное правило для определения направления индуктированной э. д. с. в проводнике. Это правило, известное как правило Ленца, может быть сформулировано так: Направление индуктированной э. д. с. всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуктированную э. д. с.

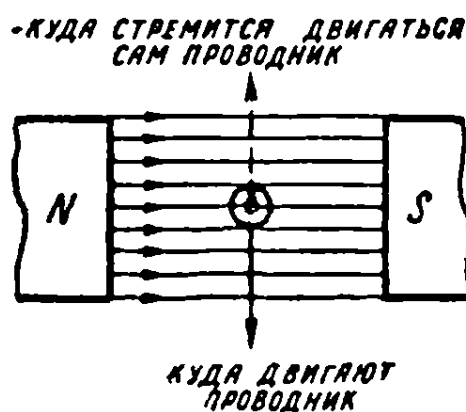


Рис. 31. Противодействие проводника с индуктированным током своему движению.

Справедливость правила Ленца подтверждается следующим:

1. Если расположить проводник в магнитном поле так, как показано на рис. 31, то при движении вниз проводник будет пересекать это магнитное поле. Тогда в проводнике

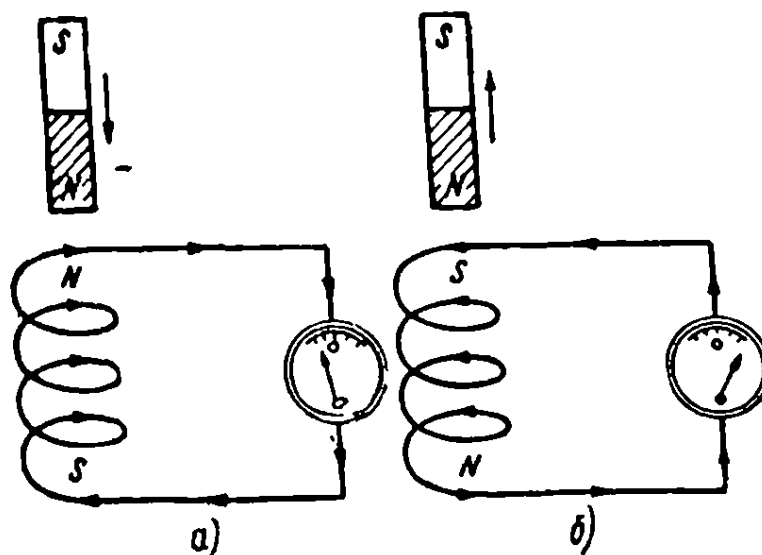
индуцируется ЭДС, направление которой можно определить по правилу правой руки. В нашем случае направление индуцированной ЭДС, и тока будет «к нам».

Посмотрим теперь, как будет вести себя наш проводник с током в магнитном поле. Из предыдущего нам известно, что проводник с током из магнитного поля будет выталкиваться. Направление выталкивания определяется по правилу левой руки. В нашем случае сила выталкивания направлена вверх. Таким образом, индуцированный ток, взаимодействуя с магнитным полем, мешает движению проводника, т. е. противодействует причине, которая его вызвала.

2. Для опыта соберем цепь, показанную на рис. 32. Опуская постоянный магнит в катушку (северным полюсом вниз), заметим отклонение стрелки гальванометра. Опыт показывает, что направление индуцированного тока в катушке будет такое, как показано стрелками на рис. 32, а. Пусть ему соответствует отклонение стрелки влево от среднего нулевого положения. Следовательно, катушка как бы превратилась в соленоид и указанное направление тока создает наверху ее северный полюс, а внизу— южный. Так как одноименные полюса магнита и соленоида будут отталкиваться, то индуцированный ток в катушке будет мешать движению постоянного магнита, т. е. будет противодействовать причине, которая его вызвала.

Если мы будем вынимать постоянный магнит из катушки, то стрелка гальванометра отклонится вправо (рис. 32, б). Этому

отклонению стрелки гальванометра, как показывает опыт, соответствует направление индуктированного тока, показанное стрелками на рис. 32, б, и противоположное направлению тока на рис. 32, а.



**Рис. 32. Противодействие соленоида движению магнита:
а – вниз, б – вверх**

Определяя полюса катушки по «правилу буравчика», найдем, что южный полюс будет теперь наверху катушки, а северный внизу. Разноименные полюса магнита и соленоида, притягиваясь, будут тормозить движение магнита. Значит, индуктированный ток опять будет противодействовать причине, которая его вызвала.

3. Замыкая цепь I (рис. 33, а), пропустим ток по проводнику АБ. Направление тока показано на рисунке стрелками. Магнитное поле проводника АБ, созданное появившимся током, распространяясь во все стороны, будет пересекать проводник ВГ, и в цепи II возникает индуктированная э. д. с. Поскольку цепь II

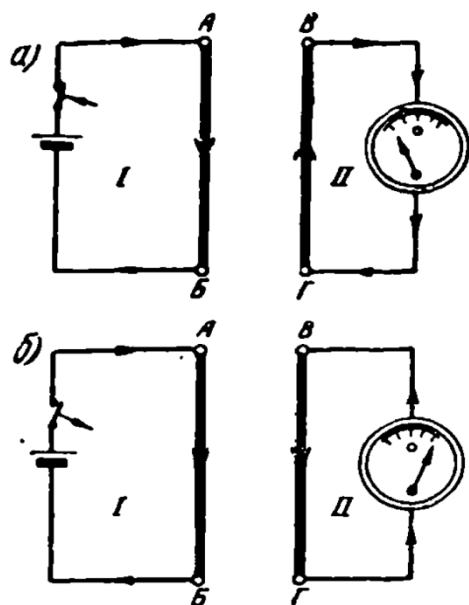


Рис. 33. Возникновение индуктированного тока по цепи II: а – в момент замыкания цепи I, б – в момент размыкания цепи.

замкнута на гальванометр, в ней появится ток. Гальванометр в этом случае включен так же, как и в предыдущем опыте.

Стрелка гальванометра, отклонившись влево, покажет, что ток через прибор идет сверху вниз. Сравнивая направление токов в проводниках AB и $BГ$, мы видим, что токи их направлены в разные стороны.

Как мы уже знаем, проводники, токи в которых направлены в разные стороны, отталкиваются один от другого. Поэтому проводник $BГ$ с индуктированным током будет стремиться оттолкнуться от проводника AB (так же, как и проводник AB от $BГ$), устранить влияние поля проводника AB и тем самым препятствовать причине, вызвавшей индуктированный ток.

Индуктированный ток в цепи II будет проходить непродолжительное время. Как только магнитный поток проводника AB установится, прекратится пересечение проводника $BГ$ магнитным полем проводника AB , ток в цепи II пропадет.

При размыкании цепи I исчезающий ток вызовет уменьшение магнитного поля, индукционные линии которого, пересекая проводник $BГ$, создадут в нем индуктированный ток того же направления, что и в проводнике AB (рис. 33, б).

Нам известно, что проводники, в которых ток идет в одном направлении, притягиваются один к другому. Поэтому проводник *ВГ* будет стремиться протянуться к проводнику *АБ*, чтобы поддержать его убывающее магнитное поле.

4. Возьмем катушку, имеющую круглый сердечник, набранный из нарубленной стальной проволоки, на который свободно надето легкое алюминиевое кольцо (рис. 34). В момент замыкания цепи по обмотке катушки начинает проходить электрический ток, создающий магнитное поле, индукционные линии которого, пересекая алюминиевое кольцо, индуктируют в нем ток. В момент включения катушки в алюминиевом кольце возникает индуктированный ток, направленный обратно току в витках катушки. Проводники с разными направлениями токов отталкиваются. Поэтому в момент включения катушки алюминиевое кольцо подскакивает вверх.

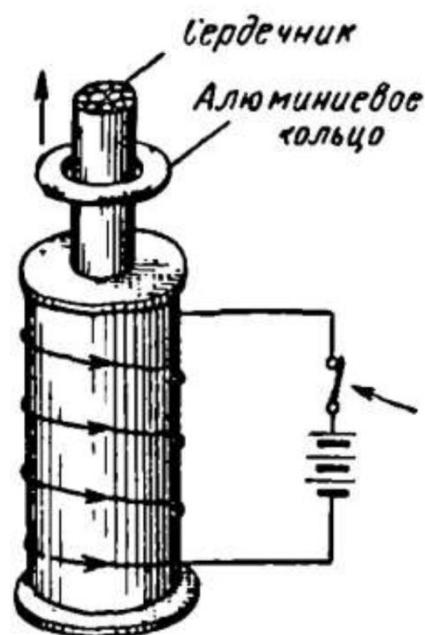


Рис. 34. Алюминиевое кольцо, свободно надетое на стальной сердечник катушки, подскакивает вверх в момент включения тока.

Нам теперь известно, что при всяком изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур, в нем появляется индуктированная э. д. с., определяемая равенством:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Выражение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ представляет собою среднюю скорость изменения магнитного потока по времени. Чем меньше промежуток времени Δt , тем меньше вышеуказанная ЭДС отличается от ее действительного значения в данный момент времени. Знак минус, стоящий перед выражением $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ будет положительным, а ЭДС — отрицательной. В этом и заключается правило Ленца: ЭДС и созданный ею ток противодействуют причине, которая их вызвала.

При равномерном изменении во времени магнитного потока выражении $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ будет постоянно. Тогда абсолютное значение э.д.с. в проводнике будет равно:

$$e = -\frac{\Phi}{t}$$

Размерность магнитного потока будет:

$$[\Phi] = [e \cdot t] = \text{В} \cdot \text{сек или Вебер.}$$

Если мы имеем не один проводник, а катушку, состоящую из w витков, то величина индуцированной ЭДС будет:

$$e = -w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Произведение числа витков катушки на сцепленный с ними магнитный поток называется потокосцеплением катушки и обозначается буквой ψ .

Поэтому закон электромагнитной индукции можно записать и в другой форме:

$$e = - \frac{\Delta\psi}{\Delta t}$$

2.5. Вихревые токи

Рассматривая принцип действия генератора, мы видели, что при его вращении в проводниках обмотки якоря, пересекающих магнитное поле, индуцируется ЭДС. Так как и сам стальной якорь пересекает те же магнитные индукционные линии, то в нем, так же как и в проводнике, должны индуцироваться токи. Токи, которые индуцируются в металлических телах при пересечении их магнитными линиями, называются вихревыми токами, или токами Фуко.

На рис. 35 схематически изображен якорь, вращающийся в магнитном поле. Вихревые токи в якоре, условно показанные пунктирными стрелками, проходя по телу якоря, будут нагревать его, на что затрачивается энергия. Если не принять мер к уменьшению вихревых токов, они, сильно нагревая якорь, могут привести к порче изоляции его обмотки. Уничтожить совсем потери на вихревые токи нельзя, но уменьшить их можно и нужно.

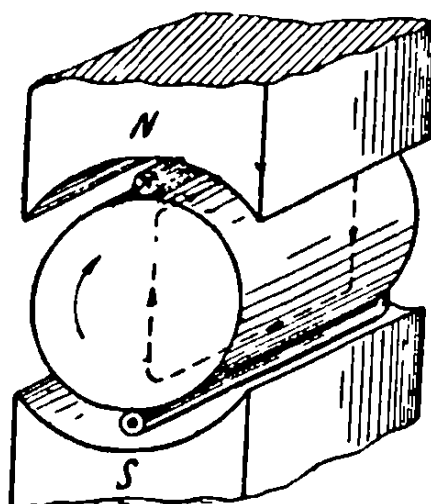


Рис. 35. Возникновение вихревых токов в сплошном стальном якоре электрической машины.

Для уменьшения потерь на вихревые токи якоря генераторов, электрических двигателей и сердечники трансформаторов собирают из отдельных тонких (0,35—0,5 мм) штампованных листов мягкой стали, расположенных по направлению линий магнитного потока и изолированных одни от другого лаком или тонкой бумагой. Это делается для того, чтобы вследствие малого поперечного

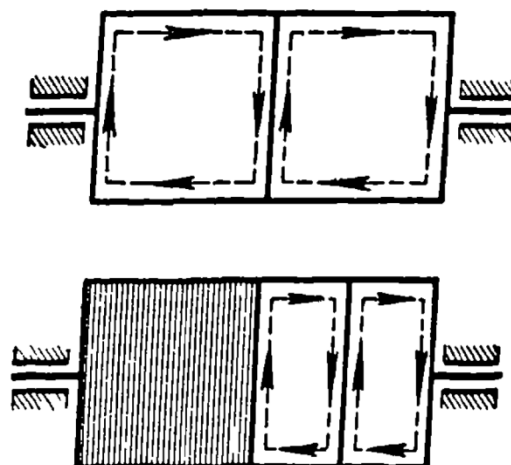


Рис. 36. Изменение пути вихревых токов при разделении стального якоря электрической машины на изолированные участки. Стрелками показаны направления индукционных токов.

сечения каждого стального листа уменьшить величину проходящего через него магнитного потока, а стало быть уменьшить индуцируемые в нем ЭДС и ток.

Путь вихревых токов в теле якоря при разделении последнего на отдельные изолированные участки схематически показан на рис. 36.

Чтобы еще больше ослабить вихревые токи, увеличивают удельное сопротивление стали путем добавления в нее около 4% кремния. Такая сталь называется легированной.

Однако не всегда вихревые токи являются вредными; в некоторых случаях они находят и полезное применение. Так, например, эти токи используют для закалки стальных изделий токами высокой частоты в работе индукционных электроизмерительных приборов, счетчиков и реле переменного тока (описанных ниже).

В индукционных печах (рис. 37) вихревые токи, наводимые первичной обмоткой *I* во вторичной обмотке *II*, которой является масса металла, настолько сильны и количество тепла, выделяемое ими, так велико, что металл плавится.

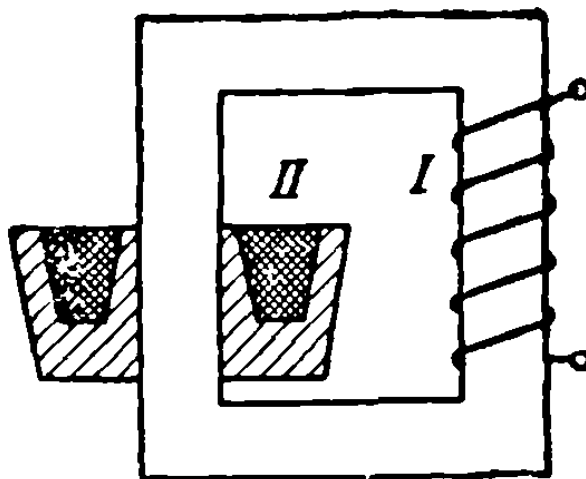


Рис. 37. Схема устройства индукционной печи.

В измерительных приборах часто устраивают магнитоиндукционные тормозы (рис. 38). При колебаниях стрелки (рис. 38, а) или при вращении диска (рис. 38, б) они пересекают поле магнита M и в них индуцируются вихревые токи, которые по правилу Ленца имеют такое направление, что противодействуют вызвавшей их причине. Таким образом, эти токи будут тормозить вращение диска и уменьшать колебания стрелки, быстро ее успокаивая.

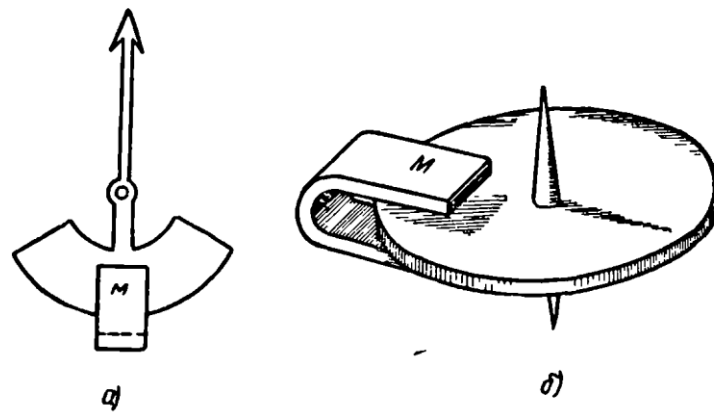


Рис. 38. Магнитоиндукционные тормозы.

2.6. ЭДС самоиндукции и индуктивность цепи

При замыкании выключателя в цепи, представленной на рис. 39, возникнет электрический ток, направление которого показано одинарными стрелками. С появлением тока возникает магнитное поле, индукционные линии которого пересекают проводник и индуцируют в нем ЭДС. Как было указано выше, эта ЭДС называется ЭДС самоиндукции. Так как всякая

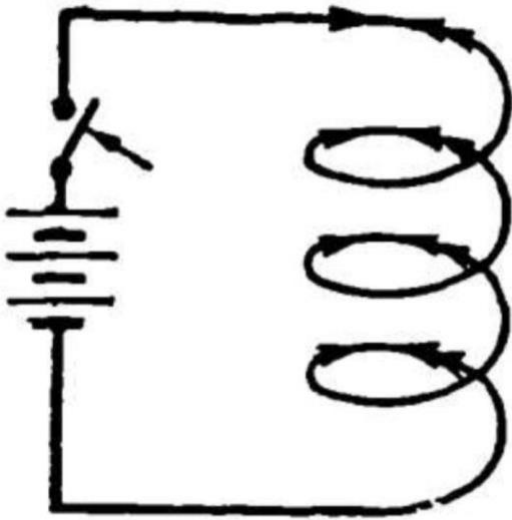


Рис. 39.

Электродвижущая сила самоиндукции в момент замыкания цепи направлена против ЭДС источника напряжения.

индуктированная ЭДС по правилу Ленца направлена против причины, ее вызвавшей, а этой причиной будет ЭДС батареи элементов, то ЭДС самоиндукции будет направлена против ЭДС батареи. Направление ЭДС самоиндукции на рис. 39 показано двойными стрелками.

Таким образом, ток устанавливается в цепи не сразу. Только когда магнитный поток установится, пересечение проводника

магнитными линиями прекратится и ЭДС самоиндукции исчезнет. Тогда в цепи будет протекать постоянный ток.

На рис. 40 дано графическое изображение постоянного тока.

По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной оси — ток. Из рисунка видно, что если в первый момент времени ток равен 6 А, то в третий, седьмой и т. д. моменты времени он также будет равен 6 А.

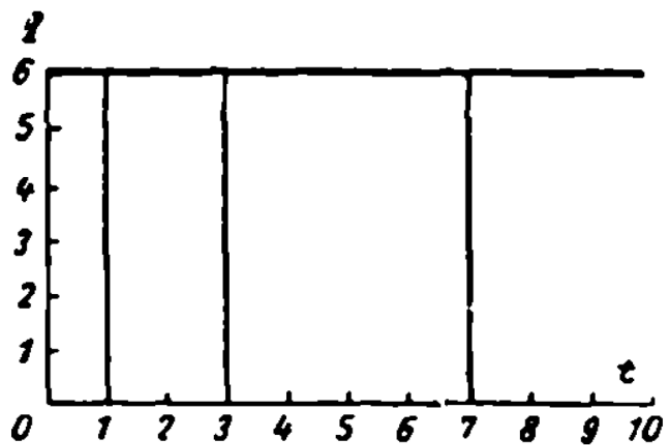


Рис. 40. График постоянного тока.

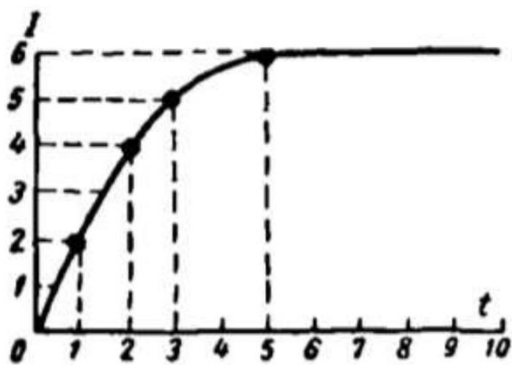


Рис. 41. График нарастания тока в цепи с учетом ЭДС самоиндукции.

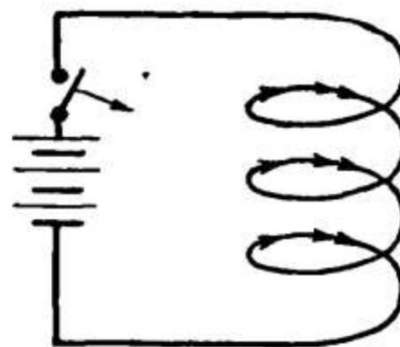


Рис. 42. ЭДС самоиндукции в момент размыкания цепи направлена одинаково с ЭДС источника напряжения.

На рис. 41. По показано, как устанавливается ток в цепи после включения. ЭДС самоиндукции, направленная в момент включения против ЭДС батареи элементов, ослабляет ток в цепи, и поэтому в момент включения ток равен нулю. Далее в первый момент времени ток равен 2 A , во второй момент времени — 4 A , в третий — 5 A , и только спустя некоторое время в цепи устанавливается ток 6 A .

При размыкании цепи (рис. 42) исчезающий ток, направление которого показано одинарной стрелкой, будет уменьшать свое магнитное поле. Это поле, уменьшаясь от некоторой величины до нуля, будет вновь пересекать проводник и индуцировать в нем ЭДС самоиндукции.

При выключении цепи ЭДС самоиндукции будет направлена в ту же сторону, что и ЭДС источника напряжения. Направление ЭДС самоиндукции показано на рис. 42 двойной стрелкой. В

результате действия ЭДС самоиндукции ток в цепи при ее замыкании исчезает не сразу.

Таким образом, ЭДС самоиндукции всегда направлена против причины, ее вызвавшей. Отмечая это ее свойство, говорят, что ЭДС самоиндукции имеет реактивный характер.

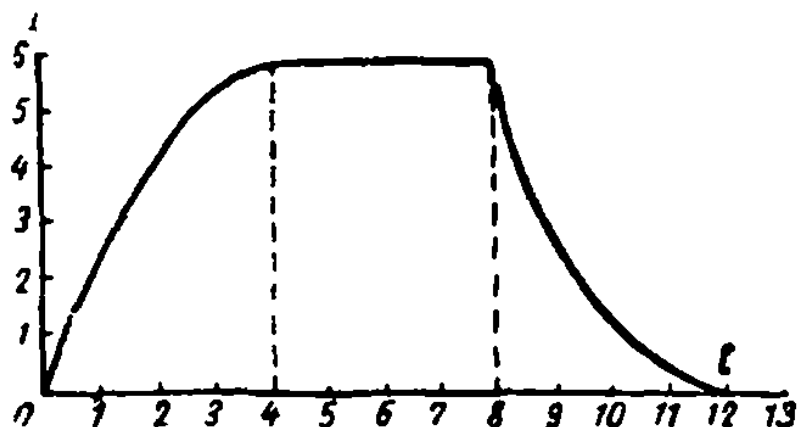


Рис. 43. График нарастания и исчезновения тока в цепи с учетом ЭДС самоиндукции.

Графически изменение тока в нашей цепи с учетом ЭДС

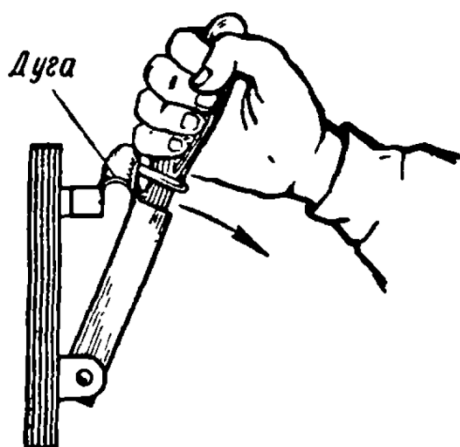


Рис. 44. Индукционные токи при размыкании цепи.

самоиндукции при замыкании ее и при последующем размыкании в восьмой момент времени показано на рис. 43.

При размыкании цепей, содержащих большое количество витков и массивные стальные сердечники или, как говорят, обладающих большой

индуктивностью, ЭДС самоиндукции может быть во много раз

больше ЭДС источника напряжения. Тогда в момент размыкания воздушный промежуток между ножом и неподвижным зажимом рубильника будет пробит и появившаяся электрическая дуга будет плавить медные части рубильника, а при отсутствии кожуха на рубильнике может ожечь руку человека (рис. 44).

В самой цепи ЭДС самоиндукции может пробить изоляцию витков катушек, электромагнитов и т. д. Во избежание этого в некоторых выключающих приспособлениях устраивают специальный контакт, который замыкает накоротко обмотку электромагнита при выключении.

Следует учитывать, что ЭДС самоиндукции проявляет себя не только в моменты включения и выключения цепи, но также и при всяких изменениях тока.

Величина ЭДС самоиндукции зависит от скорости изменения тока в цепи. Так, например, если для одной и той же цепи в одном случае в течение 1 сек. ток в цепи изменился с 50 до 40А (т. е. на 10 А), а в другом случае с 50 до 20 А (т. е. на 30 А), то во втором случае в цепи будет индуцироваться втрое большая ЭДС самоиндукции.

Величина ЭДС самоиндукции зависит также от индуктивности самой цепи. Цепями с большой индуктивностью являются обмотки генераторов, электродвигателей, трансформаторов и индукционных катушек, обладающих стальными сердечниками. Меньшей индуктивностью обладают прямолинейные проводники. Короткие прямолинейные проводники, лампы накаливания

и электронагревательные приборы (печи, плитки) индуктивностью практически не обладают и появления ЭДС самоиндукции в них почти не наблюдается.

Магнитный поток, пронизывающий контур и индуктирующий в нем ЭДС самоиндукции, пропорционален току, протекающему по контуру:

$$\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности. Он называется индуктивностью. Определим размерность индуктивности:

$$[L] = \left[\frac{\Phi}{I} \right] = \frac{\text{В} \cdot \text{сек}}{\text{а}} \text{ ом} \cdot \text{сек}$$

$\text{Ом} \times \text{сек}$ иначе называется генри (Гн).

1 Генри = 10^3 миллигенри (мГн) = 10^6 микрогенри (мкГн).

Индуктивность, кроме генри, измеряют в сантиметрах:

1 Генри = 10^3 см.

Так, например, 1 км линии телеграфа обладает индуктивностью 0,002 Гн. Индуктивность обмоток больших электромагнитов достигает нескольких сотен генри.

Если ток в контуре изменился на Δi , то магнитный поток изменится на величину $\Delta \Phi$:

$$\Delta \Phi = L \Delta i$$

ЭДС самоиндукции, которая появится в контуре, будет равна:

$$e_L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

При равномерном изменении тока по времени выражение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ будет постоянным и его можно заменить выражением $\frac{I}{t}$. Тогда абсолютная величина э. д. с. самоиндукции, возникающая в контуре, может быть найдена так:

$$E_L = L \frac{I}{t}$$

На основании последней формулы можно дать определение единицы индуктивности — генри:

$$1 \text{ в} = 1 \text{ Гн} \times \frac{1 \text{ а}}{1 \text{ сек}}$$

Проводник обладает индуктивностью 1 Гн, если при равномерном изменении тока на 1 А в 1 сек. в нем индуцируется ЭДС самоиндукции 1 в.

Как мы убедились выше, ЭДС самоиндукции возникает в цепи постоянного тока только в моменты его включения, выключения и при всяком его изменении. Если же величина тока в цепи неизменна, то магнитный поток проводника постоянен и ЭДС самоиндукции возникнуть не может (так как $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$). В моменты

изменения тока в цепи ЭДС самоиндукции мешает изменениям тока, т. е. оказывает ему своеобразное сопротивление.

Часто на практике встречаются случаи, когда нужно изготовить катушку, не обладающую индуктивностью (добавочные сопротивления к электроизмерительным приборам, сопротивления штепсельных реостатов и т. п.). В этом случае применяют бифилярную обмотку катушки (рис. 45).

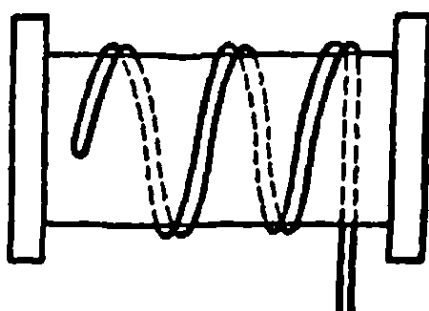


Рис. 45. Бифилярная обмотка катушки.

Как нетрудно видеть из чертежа, в соседних проводниках токи проходят в противоположных направлениях. Следовательно, магнитные поля соседних проводников взаимно уничтожаются. Общий магнитный поток и индуктивность катушки будут равны нулю. Для еще более полного уяснения понятия индуктивности приведем пример из области механики.

Как известно из физики, по второму закону Ньютона ускорение, полученное телом под действием силы, пропорционально самой силе и обратно пропорционально массе тела:

$$\alpha = \frac{F}{m}$$

Или

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Сравним последнюю формулу с формулой ЭДС самоиндукции, взяв абсолютное ЭДС:

$$e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Если в этих формулах изменения скорости во времени $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ уподобить изменению тока во времени $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ механическую силу - электродвижущей силе самоиндукции, то масса тела будет соответствовать индуктивности цепи.

При равномерном прямолинейном движении $a = 0$, поэтому $F = 0$, т. е. если на тело не действуют силы, его движение будет прямолинейным и равномерным (первый закон Ньютона).

В цепях постоянного тока величина тока не меняется ($\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$) и поэтому $e_L = 0$.

2.7. Взаимоиндукция

Взаимоиндукцией называется влияние изменяющегося магнитного поля одного проводника на другой проводник, в результате чего во втором проводнике возникает индуктированная ЭДС. Пусть мы имеем два проводника I и II (рис. 46 или две

катушки, или два контура. Ток в первом проводнике i_1 создается источником напряжения (на чертеже не показанном). Ток I_1 образует магнитный поток Φ_1 одна часть которого Φ_{12} пересекает второй проводник, а другая часть Φ_{11} замыкается помимо второго проводника:

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{11}$$

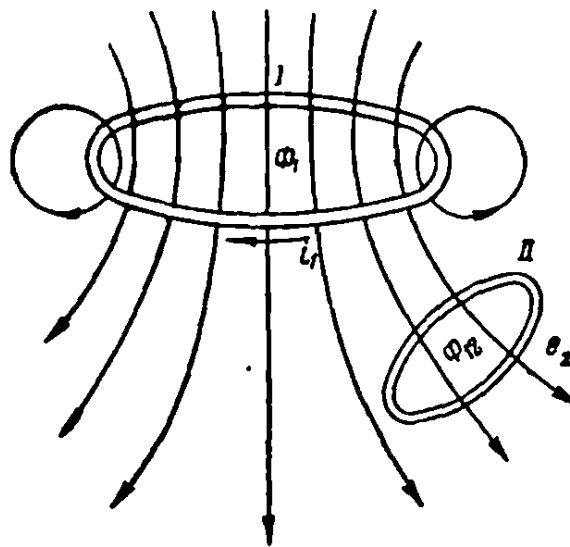


Рис. 46. Явление взаимоиндукции.

Если вместо проводников мы возьмем две катушки с числом витков W_1 и W_2 , то потокосцепление второго контура будет:

$$\psi_{12} = \omega_2 \Phi_{12}$$

Так как поток Φ_{12} пропорционален току i_1 , то зависимость между потокосцеплением ψ_{12} и током i_1 будет:

$$\psi_{12} = M_{12} i_1$$

откуда

$$M_{12} = \frac{\psi_{13}}{i_1} = \frac{\omega_2 \Phi_{13}}{i_1}$$

где M_{12} — коэффициент пропорциональности, называемый взаимной индуктивностью двух катушек (или контуров).

Размерность взаимной индуктивности определяется так:

$$[M] = \left[\frac{\omega \Phi}{i} \right] = \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{а}} = \text{ом} \cdot \text{сек или генри}$$

Таким образом, взаимная индуктивность M измеряется в тех же единицах, что и индуктивность L .

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, их размера, взаимного расположения катушек и магнитной проницаемости среды, в которой находятся катушки.

Если пропустить ток i_2 по второму проводнику, то по аналогии можно написать:

$$\psi_{21} = \omega_1 \Phi_{21}$$

и

$$\psi_{21} = M_{21} i_2$$

откуда

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{\omega_1 \Phi_{21}}{i_2}$$

Пользуясь законом Ома для магнитной цепи, можно доказать, что

$$\Phi_{12} = \frac{l_1 \omega_1}{R_M} \text{ и } \Phi_{21} = \frac{i_2 \omega_2}{R_M}$$

где R_M — магнитное сопротивление замкнутого контура, по которому проходят магнитные потоки Φ_{12} и Φ_{21} .

В выражения

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} \text{ и } M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2}$$

Поставим значения ψ_{12} , ψ_{21} , Φ_{12} , Φ_{21} .

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} = \frac{\omega_2 \Phi_{12}}{i_1} = \frac{\omega_2 i_2 \omega_1}{i_1 R_M} = \frac{\omega_1 \omega_2}{R_M}$$

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{\omega_1 \Phi_{21}}{i_2} = \frac{\omega_1 i_1 \omega_2}{i_2 R_M} = \frac{\omega_1 \omega_2}{R_M}$$

Таким образом, $M_{12}=M_{21} = M$.

Следовательно, взаимная индуктивность двух индуктивно или магнитно связанных цепей не зависит от того, какой цепью будет создаваться магнитный поток.

При изменении тока I магнитные потоки Φ_{11} и Φ_{12} будут изменяться и во втором контуре; возникнет индуцированная э. д. с., величина которой будет равна:

$$e_{M2} = -\frac{\Delta\psi_{13}}{\Delta t} = -\omega_2 \frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t} = -\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$$

Аналогично:

$$e_{M1} = -\frac{\Delta\psi_{31}}{\Delta t} = -\omega_1 \frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t} = -\frac{\Delta i_2}{\Delta t}$$

Эти ЭДС называются ЭДС взаимной индукции. Если первый контур обладает сопротивлением r_1 и индуктивностью L_1 , то напряжение U_1 приложенное к этому контуру, должно уравновесить э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, а также падение напряжения в сопротивлении r_1 контура:

$$U_1 = L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + i_1 r_1$$

Для второго контура:

$$U_2 = L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} + M \frac{\Delta i_1}{\Delta t} + i_2 r_2$$

Между индуктивностями L_1 и L_2 контуров и взаимной индуктивностью M существует следующая зависимость:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

Однако эта формула верна, когда весь поток, создаваемый первым контуром, сцепляется с витками второго контура. На практике M меньше $\sqrt{L_1 L_2}$, т.е.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}; k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Величина k меньше единицы и называется коэффициентом связи катушек. Этот коэффициент равнялся бы единице в том случае, если бы $\Phi_{12} = \Phi_1$ и $\Phi_{21} = \Phi_2$

Электромагнитная связь между двумя контурами может быть изменена, если сближать контуры или удалять их один от другого, а также если менять взаимное расположение контуров.

В технике применяют приборы, работающие по принципу взаимной индукции и служащие для изменения индуктивности цепи. Такие приборы называются вариометрами. Они состоят из двух последовательно соединенных катушек, одна из которых может вращаться внутри другой.

Пусть обе катушки расположены так, чтобы оси их были параллельны одна другой и магнитные поля катушек направлены одинаково (согласное включение). В этом случае:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} + 2M \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$= i(r_1 + r_2) + \frac{\Delta i}{\Delta t} (L_1 L_2 + 2M) = ir + L' \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Где индуктивность системы

$$L' = L_1 + L_2 + 2M$$

Если повернуть внутреннюю катушку на 180° , то в этом случае магнитные потоки будут направлены навстречу один другому (встречное включение).

В этом случае:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1 \frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta i}{\Delta t} - 2M \frac{\Delta i}{\Delta t} = ir + L'' \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Где

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M$$

Вращая внутреннюю катушку между первым и вторым положениями, мы можем менять индуктивность системы в пределах от L' до L'' .

По принципу взаимной индукции работают трансформаторы, нашедшие весьма широкое применение в технике.

Бывает, что взаимная индукция нежелательна: две линии связи (телефон) оказывают взаимное влияние, мешая работе одна другой. Линии сильного тока, расположенные параллельно и

вблизи линии связи, индуктируют в последней токи, вызывающие шум и треск, мешающие телефонным переговорам.

2.8. Принцип действия трансформатора

Трансформатором называется аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же частоты (рис. 47).

Устройство трансформатора следующее. На сердечник из мягкой стали намотаны две обмотки. Обмотка, к которой подводится напряжение, называется-первичной. Ток, проходя по первичной обмотке, создает магнитное поле, индукционные линии которого замыкаются по сердечнику. Обмотка, в которой будет наводиться э. д. с., используемая далее во внешней цепи, называется вторичной обмоткой.

Если первичную обмотку трансформатора питать переменным током, т. е. током, изменяющимся с определенной частотой по величине и направлению, то в замкнутой вторичной обмотке также будет протекать переменный ток и включенные в нее электрические лампы будут гореть ровно, не мигая. Отсюда видно, что работа трансформатора основана на использовании явления взаимной индукции.

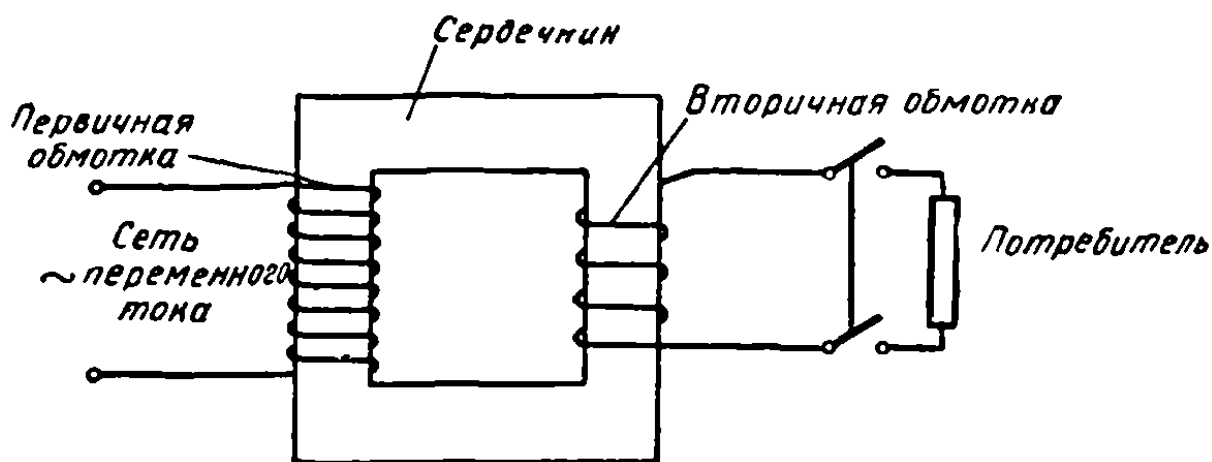


Рис. 47. Схема устройства трансформатора.

2.9. Индукционная катушка

Индукционная катушка (рис. 48) представляет собой частный случай трансформатора. Она состоит из сердечника 1 (набранного из нарезанных кусков стальной проволоки), на который намотано несколько витков толстой изолированной проволоки 2. Эти витки являются первичной обмоткой индукционной катушки. Поверх первичной обмотки наматывается другая обмотка 3 из тонкой изолированной проволоки с большим числом витков (от 16 000 до 1000 000 и более). Это — вторичная обмотка индукционной катушки. Первичная обмотка через механический прерыватель 4 присоединяется к источнику постоянного напряжения \mathcal{E} (батарее элементов, аккумуляторов и т. д.)

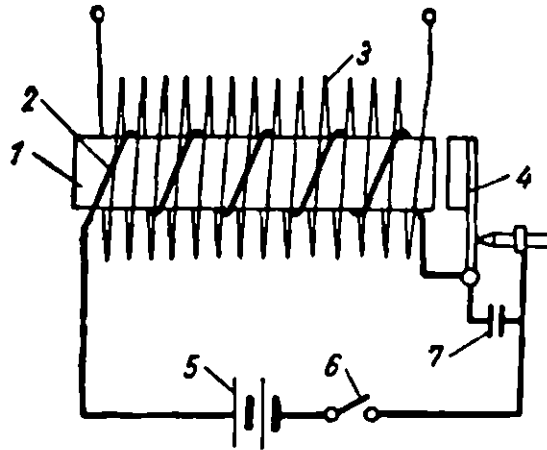


Рис. 48. Схема устройства индукционной катушки.

При замыкании выключателя *б* ток батареи проходит по первичной обмотке катушки и намагничивает ее сердечник. Намагнитившийся сердечник притягивает к себе якорек прерывателя, чем разрывается цепь первичной обмотки. В следующее мгновение размагниченный сердечник отпускает якорек прерывателя. Последний под действием пружины возвращается на прежнее место, замыкает цепь первичной обмотки, и далее процесс повторяется вновь.

В результате непрерывных замыканий и размыканий цепи в первичной обмотке катушки протекает прерывистый ток. Изменяющееся магнитное поле первичной обмотки, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС. При замыкании первичной цепи ЭДС во вторичной обмотке имеет одно направление, при размыкании — другое. Большое число витков дает возможность получать на концах вторичной обмотки напряжение в несколько тысяч, а иногда и сотен тысяч вольт. Слой воздуха

между выводами вторичной обмотки пробивается и проскакивает искра, длина которой в больших индукционных катушках достигает 1 м.

Для получения большой ЭДС во вторичной обмотке необходимо, чтобы ток в первичной цепи изменялся как можно быстрее. Однако искра в механическом прерывателе, появляющаяся при размыкании его контактов, не дает возможности току прекращаться сразу. Для быстрейшего исчезновения искры параллельно месту разрыва включают конденсатор 7.

Первичную обмотку индукционной катушки можно питать также переменным током. Тогда надобность в прерывателе отпадает.

При помощи индукционной катушки было сделано много важнейших физических открытий. Индукционные катушки широко применяются для зажигания рабочей смеси в автомобильных и авиационных двигателях и т. д.

Задачи для самостоятельного решения

1. В равномерном магнитном поле, индукция которого равна 6000 Гс , перемещается проводник под углом 30° к направлению поля. Длина проводника 50 см . Скорость движения его $2,5 \text{ м/сек}$. Определить величину индуктированной ЭДС. **(Ответ: 0,375 В)**

2. Магнитный поток $0,6 \cdot 10^6$ мкс, пронизывающий катушку, состоящую из 200 витков, уменьшается до нуля за 0,05 сек. Определить величину э. д. с., индуктированной в катушке.

(Ответ: 12 В)

3. В катушке за 0,01 сек. ток равномерно изменился на 200 А. Определить величину ЭДС, самоиндукции, если индуктивность катушки 0,05 Гн. **(Ответ: 1 кВ)**

4. Определить индуктивность катушки, состоящей из 100 витков, если при равномерном изменении тока на 20 А магнитный поток изменился за то же время на 0,6 Вб.

(Ответ: 3 Гн)

Контрольные вопросы

1. Что называется электромагнитной индукцией?
2. В каких случаях возникает индуктированная ЭДС?
3. От чего зависит направление индуктированной ЭДС?
4. Как определить направление индуктированной ЭДС в проводнике?
5. От чего зависит величина индуктированной ЭДС в проводнике?
6. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.
7. Как читается правило Ленца и какими опытами оно подтверждается?
8. Что такое взаимная индукция?

9. Объясните принцип действия трансформатора.
10. Что такое индукционная катушка?
11. Что такое вихревые токи и какие меры принимают для их уменьшения?
12. Что называется самоиндукцией?
13. Как проявляет себя самоиндукция в цепях постоянного тока?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии установлено, что взаимодействие магнитных и электрических полей играет ключевую роль во многих физических процессах. Мы выяснили, что электромагнетизм имеет огромное практическое значение в современной технике и технологиях, от электроники до электроэнергетики. Полученные результаты подтверждают важность дальнейших исследований в области электромагнетизма, особенно для улучшения производства электрической энергии, развития беспроводных технологий и совершенствования электрических устройств.

Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать разработке более эффективных энергетических систем, созданию новых материалов со специальными электромагнитными свойствами, а также повышению точности и качества авиационных диагностических методов.

В главе 1 «Магнитное поле постоянного тока» следует отметить, что учебное пособие по магнитному полю постоянного тока представляет собой важный исследовательский материал, необходимый для понимания основ электромагнетизма. Рассматривая основные принципы взаимодействия магнитного поля с электрическим током, а также его влияние на окружающее пространство, обучающиеся приобретают необходимые знания для успешного изучения данной темы. Разнообразие примеров,

графиков и упражнений, представленных в учебном пособии, способствует углубленному пониманию материала и его практическому применению, а также мотивирует к дальнейшему изучению электродинамики.

В главе 2 "Электромагнитная индукция" можно подчеркнуть, что изучение данного важного раздела электромагнетизма позволяет лучше понять законы взаимодействия электрического и магнитного полей, а также их воздействие на окружающую среду. Учебное пособие предлагает обучающимся основные теоретические аспекты электромагнитной индукции, рассматривает различные методы расчетов и применения в реальных ситуациях.

Список использованных источников

1. Гальперин М.В. Электротехника и электроника: учебник / М.В. Гальперин. — 2-е изд. - Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2022. - 480 с. - (Среднее профессиональное образование).

2. Славинский А. К. Электротехника с основами электроники: учебное пособие / А.К. Славинский. И.С. Туревский. — Москва: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М. 2022. — 448с. — (Среднее профессиональное образование).

3. Шестеркин А.Н. Введение в электротехнику. Элементы и устройства вычислительной техники. Учебное пособие для вузов, 2015г» - коллекция Инженерно-технической науки – Издательство Горячая линия – Телеком ЭБС ЛАНЬ.

4. Аполлонский С. М. «Основы электротехники. Практикум» учебное пособие для СПО издательство «Лань» 2021 г.

5. Иванов И. И. Соловьев Г. И. Фролов В. Я. «Электротехника и основы электроники» учебное пособие для СПО издательство «Лань» 2021 г. стр.736

6. Пасынков В. В. Чиркин Л. К. «Полупроводниковые приборы» учебное пособие для СПО издательство «Лань» 2021 г.

Электронные издания (электронные ресурсы)

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника (3-е изд.)

(в электронном формате) 2018

2. Информационно-коммуникационные технологии в образовании

// система федеральных образовательных порталов [Электронный ресурс]-режим доступа <http://www.ict.edu.ru>

3. Книги и журналы по электротехнике и электронике

[Электронный ресурс]-режим доступа <http://www.masterelectronic.ru>

4. Школа для электрика. Все секреты мастерства [Электронный ресурс]-режим доступа <http://www.electrical.info/electrotechru>

Дополнительные источники

1. Миловзоров О.В., Панков И.Г. Основы электроники: Учебник для СПО, 2018
2. Штеренлихт, Д.В. Электротехника и основы электроники: Учебное пособие / Д.В. Штеренлихт. - СПб.: Лань П, 2016. - 432 с.
3. Электротехника и электроника: Уч. / М.В.Гальперин, - 2 изд.-М.: Форум, НИЦ ИНФРА-М,2019-480с(СПО)(П)
4. Электричество шаг за шагом, Скворень Р.А., 2019
5. Березкина Т. Ф. Задачник по общей электротехнике с основами электроники: учебное пособие / Т. Ф. Березкина, Н. Г. Гусев, В. В. Масленников. - Москва: Высшая школа, 2001. – 391 с.
6. Федорченко А.Л. Электротехника с основами электроники: учебник/ А.Л. Федорченко, Ю.Г. Синдеев - М.: Дашков и К, 2009. – 200 с.
7. Задачник по электротехнике: учебное пособие/ П.Н. Новиков, В.Я. Кауфман, О.В. Толчеев и др. – М.: Высшая школа, 1998. – 336с.
8. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах-ГОСТ 2.710-81.
9. Правила выполнения электрических схем – ГОСТ 2.702-75