

ЭЛЕКТРОНИКА

Ярочкина Г.В. Основы электротехники.

Глава 3. Электромагнетизм и электромагнитная индукция

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

К

В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- находить параметры элементов магнитной цепи по их характеристикам;
- применять закон полного тока;
- определять индуцированную ЭДС;
- определять индуктивность катушки;

■ **знать:**

- параметры, характеризующие магнитное поле;
- элементы магнитных цепей;
- уравнение закона полного тока;
- воздействие магнитного поля на проводник с током;
- закон электромагнитной индукции;
- величину и направление ЭДС самоиндукции;
- взаимную индукцию и применение этого явления в промышленности;
- вихревые токи;
- области применения магнитных полей в технике.

3.1. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

3.1.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ

→

Магнитным полем называется особый, отличный от вещества, вид материи, через которую передается действие магнита на другие тела.

Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем движущиеся электрические заряды и постоянные магниты. Оно воз-

действует только на движущиеся заряды. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути в направлении, перпендикулярном полю.

Магнитное и электрические поля неразрывны и образуют совместно единое **электромагнитное поле**. Всякое изменение электрического поля приводит к появлению магнитного поля, и, наоборот, всякое изменение магнитного поля сопровождается возникновением электрического поля. Электромагнитное поле распространяется со скоростью света, т. е. 300 000 км/с.

Общеизвестно действие постоянных магнитов и электромагнитов на ферромагнитные тела, существование и неразрывное единство полюсов магнитов и их взаимодействие (разноименные полюсы притягиваются, одноименные отталкиваются). По аналогии с магнитными полюсами Земли полюсы магнитов называют **северным** и **южным**.

Магнитное поле наглядно изображается **магнитными силовыми линиями**, которые задают направление магнитного поля в пространстве (рис. 3.1). Эти линии не имеют ни начала, ни конца, т. е. являются **замкнутыми**.

Силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника представляют собой концентрические окружности, охватывающие провод. Чем сильнее ток, тем сильнее магнитное поле вокруг провода. При удалении от провода с током магнитное поле ослабевает.

В пространстве, окружающем магнит или электромагнит, за положительное направление магнитных силовых линий условно принято направление **от северного полюса к южному**. Чем ин-

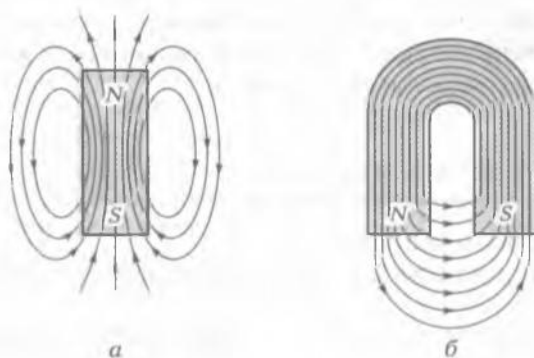


Рис. 3.1. Магнитное поле магнитов:
а — прямого; б — подковообразного

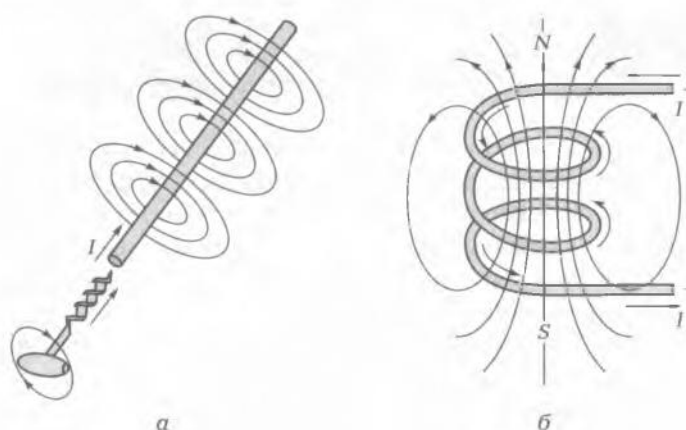


Рис. 3.2. Магнитное поле:

а — прямого провода; б — индуктивной катушки

тенсивнее магнитное поле, тем выше плотность силовых линий. Направление магнитных силовых линий определяется **правилом буравчика**.

Если ввинчивать винт по направлению тока, то магнитные силовые линии будут направлены по ходу винта (рис. 3.2, а).

Для получения более сильного магнитного поля применяют индуктивные катушки с обмоткой из проволоки. В этом случае магнитные поля отдельных витков индуктивной катушки складываются и их силовые линии сливаются в общий магнитный поток.

Магнитные силовые линии выходят из индуктивной катушки на том конце, где ток направлен против хода часовой стрелки, т. е. этот конец является северным магнитным полюсом (рис. 3.2, б). При изменении направления тока в индуктивной катушке изменится и направление магнитного поля.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитное поле?
2. Может ли существовать магнитное поле независимо от электрического поля?
3. Каким правилом определяются направления силовых магнитных линий?
4. Знаете ли вы, как выглядят силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника? Нарисуйте их.

3.1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитная индукция. Интенсивность магнитного поля характеризуется магнитной индукцией B . Чем сильнее магнитное поле, созданное постоянным магнитом или электромагнитом, тем большую индукцию оно имеет. Направление действия электромагнитной силы F на проводник определяется **правилом левой руки** (рис. 3.3).

Если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии пронизывали ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление действия электромагнитной силы.

По этой силе можно судить об **интенсивности магнитного поля**, т. е. о его **магнитной индукции**. Если на проводник длиной 1 м с током 1 А, расположенный перпендикулярно магнитным линиям в равномерном магнитном поле, действует сила в 1 Н, то магнитная индукция такого поля равна 1 Тл (тесла).



Запомните

Магнитная индукция — векторная величина: в каждой точке поля вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитным силовым линиям.

Магнитный поток. Величина, измеряемая произведением магнитной индукции B на площадь S , перпендикулярную вектору магнитной индукции, называется **магнитным потоком** Φ :

$$\Phi = BS.$$

Магнитную индукцию выражают в теслах, а площадь — в квадратных метрах, поэтому единица магнитного потока — вебер:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Магнитодвижущая сила. Способность тока возбуждать магнитное поле характеризуется **магнитодвижущей силой** (МДС), действующей вдоль замкнутой магнитной силовой линии. Магнитодвижущая сила равна току, создающему магнитное поле, и выражается в амперах.

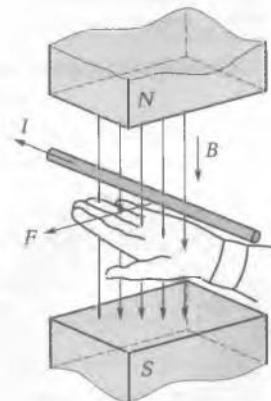


Рис. 3.3. Определение направления действия электромагнитной силы на проводник с током согласно правилу левой руки

Для проводника с током I МДС равна току I . В общем случае, когда замкнутый контур магнитной силовой линии охватывает несколько токов, суммарная МДС равна сумме токов.

Для катушки с числом витков w и током I (рис. 3.4) МДС равна:

$$\sum I = Iw.$$

Напряженность магнитного поля. Магнитодвижущая сила, приходящаяся на единицу длины магнитной силовой линии, называется **напряженностью магнитного поля** H и выражается в амперах на метр (А/м).

Если физические условия вдоль всей длины l магнитной линии одинаковы, то

$$H = \frac{\sum I}{l}.$$

Например, вокруг прямолинейного проводника с током I линии магнитного поля представляют собой концентрические окружности переменного радиуса x , длина каждой из которых $l = 2\pi x$. В этом случае напряженность

$$H = \frac{I}{2\pi x}.$$



Запомните

По мере удаления от проводника напряженность поля снижается.

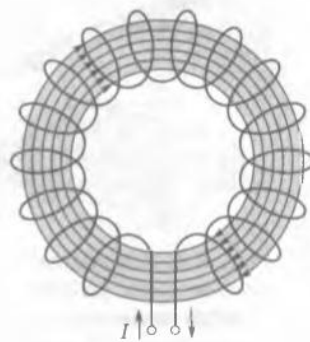


Рис. 3.4. Торoidalная катушка

Магнитная проницаемость. Магнитная индукция зависит не только от силы тока, проходящего по прямолинейному проводнику или индуктивной катушке, но и от свойств среды, в которой создается магнитное поле. Величиной, характеризующей магнитные свойства среды, служит **абсолютная магнитная проницаемость** μ_a . Она определяется отношением магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H и измеряется в генри на метр (Гн/м):

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

Абсолютная магнитная проницаемость вакуума $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для воздуха и других неферромагнитных материалов она незначительно отличается от магнитной проницаемости вакуума и при технических расчетах принимается равной $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Так как абсолютная магнитная проницаемость для вакуума и указанных ранее материалов практически одинакова, то μ_a называется **магнитной постоянной** μ_0 .

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a ферромагнитных материалов непостоянна и во много раз превышает магнитную проницаемость вакуума.

Число, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость μ_a ферромагнитного материала больше магнитной постоянной μ_0 , называется **относительной магнитной проницаемостью** μ , или (сокращенно) магнитной проницаемостью:

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

Пример 3.1. Сталь при определенных условиях обладает абсолютной магнитной проницаемостью μ_a , равной 0,0008792 Гн/м. Определить относительную магнитную проницаемость μ этой стали.

Решение

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{0,0008792}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 700.$$

Семейство кривых намагничивания технически чистого железа (1), электротехнической стали (2) и пермаллоя (3) приведено на рис. 3.5. Эти материалы широко применяются в трансформаторах, электротехнических машинах и аппаратах.

Как видно из кривых намагничивания (см. рис. 3.5), способность материалов намагничиваться (их магнитная проницаемость) в сла-

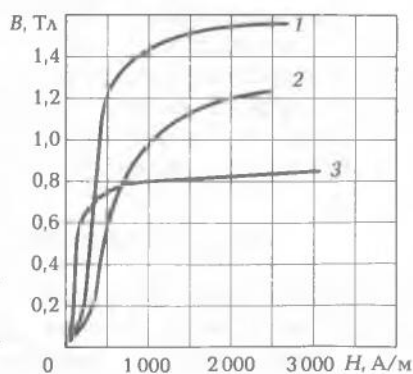


Рис. 3.5. Семейство кривых намагничивания:
1 — технически чистого железа; 2 — электротехнической стали; 3 — пермаллоя

бых полях велика, а затем с ростом индукции постепенно уменьшается.

Магнитная проницаемость магнитных материалов — величина изменяющаяся, зависящая от степени их намагничивания.

При одной и той же напряженности магнитного поля (см. рис. 3.5) магнитная индукция в чистом железе больше, чем в электротехнической стали. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость чистого железа больше магнитной проницаемости электротехнической стали.

Пример 3.2. Напряженность магнитного поля катушки $H = 750$ А/м, абсолютная проницаемость сердечника $\mu_a = 0,0008792$ Гн/м. Определить магнитную индукцию сердечника.

Решение

Магнитная индукция сердечника

$$B = \mu_a H = 0,0008792 \cdot 750 = 0,65 \text{ Тл.}$$

? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких величин зависит напряженность магнитного поля?
2. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
3. Что называется относительной магнитной проницаемостью μ ?
4. От каких параметров зависит магнитная индукция?
5. В каких единицах измеряется магнитный поток?

П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Магнитная индукция электротехнической стали составляет 1,5 Тл, площадь поперечного сечения сердечника, изготовленного из этой стали, — 0,003 м². Определите магнитный поток, пронизывающий сердечник.
2. Найдите магнитную индукцию в сердечнике из альсифера магнитной проницаемостью 10,5, если он помещен в магнитное поле напряженностью 1 000 А/м.
3. Рассчитайте магнитный поток, проходящий в куске никеля, помещенном в однородное магнитное поле напряженностью 1 200 А/м. Площадь поперечного сечения куска никеля составляет 25 см (относительная магнитная проницаемость никеля $\mu = 300$).

3.1.3. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Энергия, заключенная в магнитном поле, может проявлять себя в виде электромагнитных сил, которые возникают при взаимодействии магнитного поля с движущимися электрическими зарядами.

Если поместить в магнитное поле проводник с током I , то между электронами, проходящими по проводнику, и магнитным полем возникнут электромагнитные силы, которые, складываясь, образуют результирующую силу F , стремящуюся вытолкнуть проводник из магнитного поля. Электромагнитная сила F , действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле и расположенный перпендикулярно направлению поля, равна произведению силы тока I , индукции магнитного поля B и длины проводника l :

$$F = BIl.$$

Если проводник расположен под углом α к силовым магнитным, то сила, H ,

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Направление действия силы F обычно определяют по правилу левой руки (см. рис. 3.3). В результате воздействия таких механических сил при одинаковом направлении тока лежащие рядом проводники будут **притягиваться** друг к другу (рис. 3.6, а), при разном направлении тока — **отталкиваться** (рис. 3.6, б).

На явлении взаимодействия магнитного поля и проводника с током основано устройство различных электрических машин и приборов, например измерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Особенно большие силы между проводниками возникают в электрических цепях при коротких замыканиях.

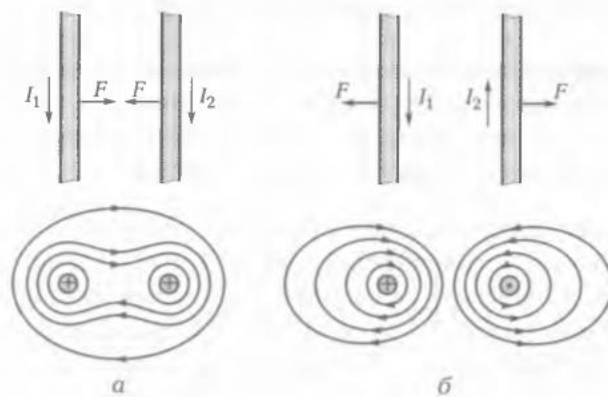


Рис. 3.6. Взаимодействие двух проводников с током:

а — при одинаковом направлении тока; б — при разном направлении тока

Пример 3.3. Определить, с какой силой магнитное поле, созданное током, действует на проводник, если магнитная индукция поля $B = 1,5$ Тл, рабочая длина проводника $l = 0,5$ м и по нему протекает ток $I = 0,4$ А.

Решение

Сила, действующая на проводник:

$$F = BIl = 1,5 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,3 \text{ Н.}$$



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково правило определения направления силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле?
2. От каких параметров зависит сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле?
3. Будет ли действовать сила на проводник, помещенный в магнитное поле параллельно силовым магнитным линиям?



ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите магнитную индукцию поля, если оно действует на проводник с силой 6 Н. Рабочая длина проводника, помещенного в магнитное поле, составляет 0,4 м, а ток, протекающий по нему, — 15 А.
2. Вычислите, с какой силой магнитное поле, созданное проводником с током, действует на проводник, если магнитная индукция поля равна 1,5 Тл, рабочая длина проводника — 0,6 м и по нему протекает ток 5 А.

3.1.4. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ



Магнитной цепью называется совокупность источника МДС (электромагнита или постоянного магнита), а также ряда тел и сред (магнитопровода), по которым замыкается основная часть магнитных линий созданного поля.

Магнитная цепь электромагнитного реле (рис. 3.7) состоит из трех участков: сердечника 2, якоря 4 и воздушного зазора 6. По замкнутому контуру, образованному этими участками, проходит магнитный поток 3, создаваемый током индуктивной катушки 1. При переходе через воздушные зазоры, разделяющие сердечник и якорь, часть магнитного потока замыкается по воздуху, т. е. не проходит через якорь, — возникает поток рассеяния 5.

При расчете магнитной цепи могут быть поставлены две задачи:

1) **прямая**, когда известны геометрические размеры и магнитные свойства материала магнитопровода, а также значение магнитного потока Φ — определяются магнитодвижущая сила и ток I в витках обмотки;

2) **обратная**, когда задается МДС, геометрические размеры и материалы магнитопровода — определяется магнитный поток Φ .

Расчет магнитных цепей производится на основе закона полного тока с помощью уравнений магнитного состояния. Как и в электрических цепях, здесь используют уравнения магнитного состояния.

Узловое уравнение — алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в любом узле (поток через замкнутую поверхность), всегда равна нулю:

$$\sum \Phi = 0.$$

Контурное уравнение — алгебраическая сумма падений магнитных напряжений в любом замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС в контуре:

$$\sum U_\mu = \sum wI.$$

Падение магнитного напряжения на заданном участке магнитной цепи определяют как произведение напряженности магнитного поля на длину участка цепи (или магнитного сопротивления участка на магнитный поток) и выражают в амперах:

$$U_\mu = Hl = \frac{\Phi l}{\mu_0 \mu_a S} = R_\mu \Phi,$$

где R_μ — магнитное сопротивление участка, $R_\mu = \frac{l}{\mu_0 \mu_a S}$.

Например, для магнитной схемы, содержащей источник МДС и два участка с магнитными сопротивлениями $R_{\mu м}$ и $R_{\mu в}$ (рис. 3.8), можно записать следующее уравнение магнитного состояния:

$$wI = U_{\mu м} + U_{\mu в},$$

где $U_{\mu м}$ — магнитное напряжение на участке ферромагнетика;
 $U_{\mu в}$ — магнитное напряжение на участке воздушного зазора.

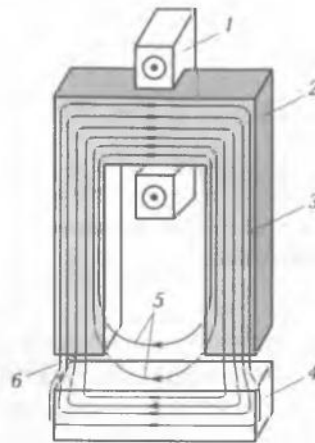


Рис. 3.7. Магнитная цепь электромагнитного реле:

1 — индуктивная катушка; 2 — сердечник; 3 — магнитный поток; 4 — якорь; 5 — поток рассеяния; 6 — воздушный зазор

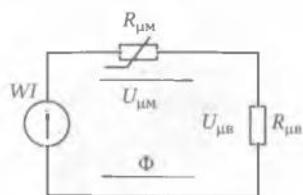


Рис. 3.8. Эквивалентная схема магнитной цепи

Аналогия электрических и магнитных цепей формальна. По своему внутреннему содержанию они существенно различаются: ЭДС источника существует и остается неизменной при любом режиме электрической цепи (при холостом ходе, номинальном режиме и коротком замыкании), МДС всегда связана с одновременным существованием магнитного потока. Тем не менее аналогия позволяет для каждой

магнитной цепи составить эквивалентную схему замещения.

Области применения магнитных полей в технике разнообразны и все более расширяются. Магнитные поля используют в электрических машинах и трансформаторах, электрических аппаратах, измерительных приборах и других электротехнических устройствах. Магниты необходимы в магнитофонах и проигрывателях, радиоприемниках и телевизорах, электробритвах и пылесосах.

Мощные магнитные поля необходимы в современных энергетических и физических установках: например, для формирования потока заряженных частиц в ускорителях, удержания плазмы в камерах магнитных ловушек в физических установках. Сильное магнитное поле создают в *магнетогидродинамических генераторах*, с которыми связано прогрессивное направление в развитии электроэнергетики.

Электромагниты являются элементами конструкций многих технологических установок и механизмов. Так, для подъема и транспортировки ферромагнитных материалов применяют *подъемные электромагниты*; для пуска, торможения и переключения скоростей в кинематических цепях станков широкое распространение получили *электромагнитные муфты*; для удержания деталей на плоскошлифовальных станках — *электромагнитные плиты*; для извлечения стальных и чугунных тел из массы сыпучего обрабатываемого материала — *магнитные сепараторы*; для управления потоками газов и жидкостей — *электромагнитные краны и клапаны*. Электромагнитное поле используют и непосредственно в технологических процессах.



Запомните

- Расчет магнитных цепей с ферромагнитными материалами аналогичен расчету электрических цепей постоянного тока.
- При расчете магнитных цепей, как и электрических, используют узловые и контурные уравнения.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют магнитной цепью?
2. В чем различие между уравнением участка электрической ветви и его аналогом для магнитной цепи?
3. Как определить магнитное сопротивление участка магнитной цепи?

3.2.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

3.2.1. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В основе работы многих электротехнических устройств (электро-механических генераторов, трансформаторов) лежит явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем в 1831 г. Несколько позже российский академик Э. Ленц определил направление электродвижущей силы, а количественную зависимость индуцированной ЭДС от скорости изменения магнитного потока установил Дж. Максвелл.

Явление **электромагнитной индукции** заключается в том, что изменение магнитного поля вокруг проводника, связанное с пересечением проводника магнитными силовыми линиями, вызывает появление ЭДС в этом проводнике. При этом безразлично, будет ли изменяться магнитное поле относительно проводника или проводник будет перемещаться в магнитном поле. Значение индуцированной ЭДС определяется **законом электромагнитной индукции М. Фарадея**. Он формулируется следующим образом.



Индуцированная ЭДС прямо пропорциональна индукции B , активной длине проводника l и скорости v его перемещения в направлении, перпендикулярном линиям магнитного поля:

$$e = Blv \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями скорости v и поля. Если $\alpha = 90^\circ$ (что бывает часто), то $e = Blv$.

Направление ЭДС определяют согласно **правилу правой руки** (рис. 3.9).

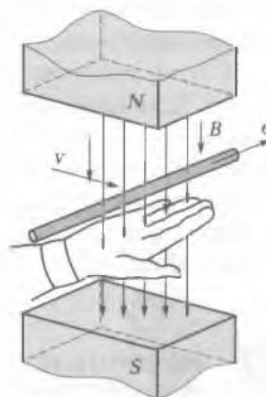


Рис. 3.9. Определение направления ЭДС согласно правилу правой руки

Если поставить правую руку так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, а отставленный большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление индуцируемой ЭДС.

При изменении магнитного потока, охватываемого замкнутым контуром, в нем индуцируется ЭДС

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

где Δt — промежуток времени, в течение которого магнитный поток изменяется на $\Delta \Phi$.

В катушке с w витками $e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$. Знак «-» отражает **правило Ленца**:

Индукцированная ЭДС имеет такое направление, при котором созданный ею ток противодействует причине, вызвавшей появление ЭДС, т.е. противодействует изменению магнитного потока.



Запомните

- Явление электромагнитной индукции широко используется в различных электрических машинах и устройствах. На этом принципе основано устройство электрических генераторов, двигателей и трансформаторов.
- Направление ЭДС определяют согласно правилу правой руки.
- Индуцирование ЭДС в проводнике происходит независимо от того, включен ли он в какую-либо электрическую цепь или нет. Если присоединить концы этого проводника к какому-либо приемнику электрической энергии, то под влиянием разности потенциалов на концах проводника по замкнутой цепи потечет электрический ток.
- Индуцируемая ЭДС стремится противодействовать причине, ее вызывающей.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит суть закона электромагнитной индукции? Сформулируйте его.
2. От каких параметров зависит ЭДС индукции?

3. Как определить направление индуцированной ЭДС в проводнике?
4. Где в технике используется явление электромагнитной индукции?

3.2.2. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

При изменении тока в проводнике, витке или индуктивной катушке изменяется магнитный поток, создаваемый этим током. Изменение магнитного потока индуцирует в проводнике (витке, индуктивной катушке) ЭДС, действие которой направлено на поддержание предшествующего состояния поля. Такое явление называется *самоиндукцией*. Направление ЭДС самоиндукции определяется по **правилу Ленца**.

Электродвижущая сила самоиндукции имеет всегда такое направление, при котором она препятствует изменению вызвавшего ее тока.

Следовательно, при возрастании тока в проводнике (индуктивной катушке) индуцированная в ней ЭДС самоиндукции будет направлена против тока, т. е. будет препятствовать его возрастанию (рис. 3.10, а), и, наоборот, при уменьшении тока в проводнике (индуктивной катушке) возникает ЭДС самоиндукции, совпадающая по направлению с током, т. е. препятствующая его убыванию (рис. 3.10, б).

Способность различных проводников (индуктивных катушек) индуцировать ЭДС самоиндукции оценивается **индуктивностью** L . Единица индуктивности — генри (Гн). Такой индуктивностью обладает проводник, в котором возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В, при изменении тока на 1 А за 1 с:

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

Знак «-» в формуле отражает правило Ленца.

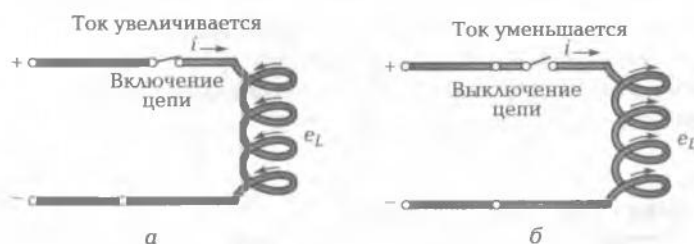


Рис. 3.10. Направление ЭДС самоиндукции в индуктивной катушке:
а — при увеличении тока; б — при уменьшении тока

На практике индуктивность часто измеряют в тысячных долях генри — миллигенри (мГн) и в миллионных долях генри — микрогенри (мкГн).

Значение индуктивности L зависит от конструкции элементов цепи. Так, для индуктивной катушки с числом витков w , магнитопроводом длины l , сечения S и магнитной проницаемостью μ индуктивность

$$L = \frac{w^2 \mu_a \delta}{l}$$

Если катушки своими полями не влияют друга на друга, то при **последовательном соединении** индуктивных катушек с индуктивностями $L_1, L_2, L_3 \dots$ общая индуктивность

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

При **параллельном соединении**

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

! Запомните

- Если ток в индуктивной катушке не изменяется, то ЭДС самоиндукции не возникает.
- Явление самоиндукции в тех или иных проводниках характеризуется индуктивностью L .
- Индуктивность — это размерный коэффициент пропорциональности между скоростью изменения тока во времени и индуцируемой при этом ЭДС.

? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
2. В каких единицах измеряется индуктивность?
3. Как изменится ЭДС самоиндукции, если скорость изменения тока, проходящего через индуктивную катушку, возросла?

П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите индуктивность индуктивной катушки, если при скорости изменения тока 2 А/с в ней индуцируется ЭДС самоиндукции 1,5 В.

2. В индуктивной катушке ток равномерно изменился на 20 мА за 0,01 с. Рассчитайте ЭДС самоиндукции, если индуктивность индуктивной катушки составляет 5 мГн.
3. В индуктивной катушке, обладающей индуктивностью 12 мГн, протекает ток, сила которого изменяется за 2 с на 10 мА. Вычислите ЭДС самоиндукции, возникающей в индуктивной катушке.

3.2.3. ВЗАИМОИНДУКЦИЯ

Если две индуктивные катушки находятся на некотором расстоянии друг от друга (рис. 3.11) и по одной из них (1) проходит изменяющийся ток, то часть магнитного потока, возбуждаемая этим током, пронизывает витки второй индуктивной катушки (2) и в ней возникает ЭДС, называемая **ЭДС взаимной индукции**.

Если два замкнутых контура или две индуктивные катушки 1 и 2 (см. рис. 3.11) сцеплены с общим магнитным потоком Φ_{12} , то такие контуры и индуктивные катушки называют **индуктивно-** или **магнитно-связанными**.



Под действием ЭДС взаимной индукции в замкнутой цепи второй индуктивной катушки возникает электрический ток взаимной индукции. Он вызывает появление магнитного поля, которое пронизывает витки первой индуктивной катушки, в результате чего в ней также возникает ЭДС взаимной индукции. Такое явление называется **взаимной индукцией**.

Величина ЭДС взаимной индукции, возникающей во второй индуктивной катушке, зависит от размеров, расположения индуктивных катушек, магнитной проницаемости их сердечников, а также скорости изменения силы тока $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ в первой индуктивной катушке. Эту зависимость можно выразить формулой

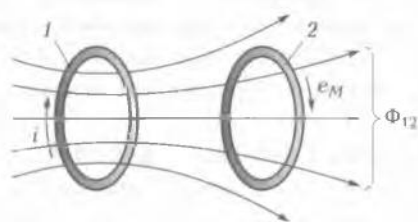


Рис. 3.11. Взаимная индукция:

1, 2 — индуктивно-связанные катушки

$$e_{\text{м}} = -M \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где M — величина, зависящая от размеров индуктивных катушек, их расположения и магнитной проницаемости среды между индуктивными катушками. Она называется **взаимной индуктивностью** и измеряется в генри (Гн). Знак «-» в этой формуле показывает, что ЭДС взаимоиндукции противодействует причине, вызывающей ее.

Взаимоиндукция дает возможность связывать посредством магнитного поля различные электрические цепи. Явление взаимоиндукции широко используют в трансформаторах, радиотехнических устройствах и устройствах автоматики.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление называется взаимоиндукцией?
2. При каких условиях возникает ЭДС взаимоиндукции?
3. Какие катушки называют магнитносвязанными?
4. В каких единицах измеряется взаимная индуктивность?

3.2.4. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Изменяющийся магнитный поток способен индуцировать ЭДС не только в проводах или витках индуктивных катушек, но и в массивных стальных сердечниках, кожухах и других металлических деталях электротехнических установок. Эти ЭДС являются причиной появления индуцированных токов, которые действуют в массивных металлических деталях электротехнических устройств, замыкаясь накоротко в их толще. Такие токи получили название **вихревых токов**.

Природа вихревых токов такая же, как и токов, индуцированных в обычных проводах или индуктивных катушках. Благодаря очень малому сопротивлению массивных проводников вихревые токи даже при небольшой индуцированной ЭДС достигают очень больших значений, вызывая чрезмерное нагревание этих проводников.

Способы уменьшения вредного действия вихревых токов. В электрических машинах и аппаратах вихревые токи обычно нежелательны, так как они вызывают нагрев металлических сердечников, создают потери энергии (так называемые потери от вихревых токов), снижают КПД электрических машин и аппаратов и ока-

зывают согласно правилу Ленца размагничивающее действие. Для уменьшения вредного действия вихревых токов применяют два основных способа.

1. Сердечники электрических машин и аппаратов выполняют из отдельных стальных листов толщиной 0,35—1,0 мм, изолированных один от другого слоем изоляции (лаковой пленкой, окалиной, образующейся при отжиге листов, и пр.). Благодаря этому преграждается путь распространению вихревых токов.

2. В состав электротехнической стали, из которой изготавливают сердечники электрических машин и аппаратов, вводят 1—5 % кремния, что обеспечивает повышение ее электрического сопротивления. Благодаря этому достигается снижение силы вихревых токов, протекающих по сердечникам электрических машин и аппаратов.

Использование вихревых токов. Вихревые токи используют для плавки металлов, с их помощью нагревают металлические детали при сварке, наплавке и пайке, а также осуществляют поверхностный нагрев, необходимый для закалки металлических изделий.



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что является причиной появления вихревых токов?
2. Какие способы уменьшения вредного действия вихревых токов вам известны?
3. Где можно найти полезное применение вихревым токам?



ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Природа магнетизма.
2. Намагничивание ферромагнитных материалов.
3. Применение электромагнитной индукции в технике.
4. Полезное использование вихревых токов в технике.
5. Электромагниты и их применение.