

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

1. Основные физические величины и соотношения

Цель лекции: ознакомиться с основными определениями, соотношениями и анализом магнитных цепей.

Нагрузкой электрических цепей, в силовой её части, являются электромагнитные устройства. Их работа основана на использовании электромагнитного поля. К таким устройствам относятся: электрические машины, трансформаторы, преобразователи, реле, муфты, электромагниты и др.

Как известно из курса физики, вокруг проводника с током появляется магнитное поле. *Интенсивность* магнитного поля характеризуется векторной величиной: **напряженностью магнитного поля** \vec{H} , измеряемой в *Амперах*, деленных на *метр* [А/м]. Интенсивность магнитного поля характеризуется также вектором магнитной **индукции** \vec{B} , измеряемой в *Теслах* [Тл].

Магнитная индукция B определяется силой, испытываемой единичным зарядом Q , движущимся в магнитном поле со скоростью V :

$$\vec{B} = \vec{F} / Q \cdot \vec{V} . \quad (1)$$

Магнитный поток $\vec{\Phi}$ - это поток вектора магнитной индукции через площадь S :

$$\vec{\Phi} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

В однородном магнитном поле, перпендикулярном площади S , магнитный поток:

$$\Phi = B \cdot S . \quad (3)$$

Магнитный поток измеряется в веберах [Вб]:

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

Намагниченность есть магнитный момент единицы объема вещества:

$$\vec{M} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{m}}{V}, \quad (4)$$

где \vec{m} - вектор магнитного момента элементарного контура:

$$m = I \cdot S.$$

Напряженность магнитного поля H связана с магнитной индукцией B и намагниченностью M зависимостью:

$$\vec{B} = \mu_0 [\vec{H} + \vec{M}], \quad (5)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, причем:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ [Гн/м]}.$$

Напряженность магнитного поля измеряется в [А/м].

Для ферромагнитных материалов:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (6)$$

где μ_r - относительная магнитная проницаемость.

В зависимости от величины относительной магнитной проницаемости, все вещества делятся на три группы:

первая группа – *диамагнетики* – вещества, у которых $\mu_r < 1$;

вторая группа – *парамагнетики*, вещества с $\mu_r > 1$;

третья группа – *ферромагнетики*, вещества с $\mu_r \gg 1$.

Простейшим *диамагнетиком* является плазма, т. е. газ свободных заряженных частиц (инертные газы, сверхпроводники и др.). Собственное магнитное поле *диамагнетиков направлено против внешнего поля, тем самым ослабляя его.*

Парамагнетик (например, натрий) *усиливает внешнее магнитное поле вследствие частичной ориентации его магнитных моментов по полю. В этом отношении он аналогичен диэлектрику.*

К *ферромагнетикам* принадлежат железо, никель, кобальт и многие сплавы из неферромагнитных веществ.

Воздействие магнитного поля бывает двух видов:

1. Индуктивное воздействие.

В этом случае в перемещаемом в магнитном поле проводнике возникает электродвижущая сила. Если же это поле переменное, то э.д.с. возникает в неподвижном проводнике.

2. Электромагнитное воздействие.

В этом случае на проводник с током в магнитном поле действует сила со стороны поля.

2. Характеристика магнитных свойств ферромагнитных материалов

Ферромагнитные материалы характеризуют зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля:

$$B = f(H).$$

Эта зависимость устанавливается опытным путем. На рис. 1 приведено ферромагнитное кольцо с обмоткой в виде витков провода.

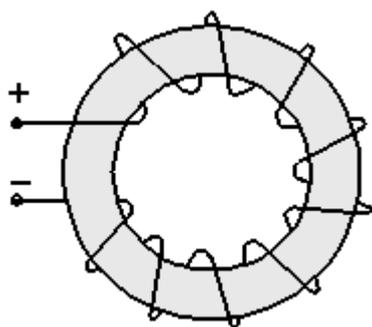


Рис. 1

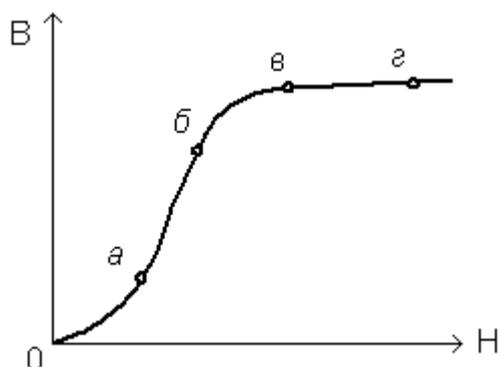


Рис. 2

Если увеличивать ток в витках, то H и B будут возрастать от нулевых значений по кривой *начальной намагниченности* (рис. 2).

Участок « oa » кривой есть начальная область.

Участок « ab » - область интенсивного намагничивания.

Участок « bc » - колено кривой.

Участок « cd » - участок насыщения, на котором намагниченность постоянная.

Отношение $B/H = \mu_a$ есть абсолютная магнитная проницаемость, причем

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r,$$

где $\mu_r = \mu_a / \mu_0 = B/(\mu_0 \cdot H)$ - как было показано ранее, относительная магнитная проницаемость.

Относительная магнитная проницаемость μ_r зависит от H и может изменяться от единиц до десятков тысяч. Она показывает, во сколько раз магнитная проницаемость материала больше магнитной проницаемости вакуума.

При намагничивании магнитопровода, сначала, с увеличением напряженности намагничивающего поля, магнитная индукция быстро возрастает. Затем, из-за *насыщения* материала магнитопровода, при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля магнитная индукция почти не меняется. При уменьшении напряженности намагничивающего поля кривая размагничивания не совпадает с кривой намагничивания из-за явления гистерезиса.

Явление гистерезиса заключается в том, что изменение магнитной индукции запаздывает от изменения напряженности намагничивающего поля. Намагничивание сопровождается отставанием изменения \vec{B} от \vec{H} . Это объясняется изменением спинового момента электрона и плотностью электронов, участвующих в создании спонтанной намагниченности. Поэтому при циклическом изменении H зависимость $B = f(H)$ приобретает вид петли гистерезиса (рис. 3).

На рисунке B_r - остаточная намагниченность, H_c - коэрцитивная сила. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, выделяющейся в единице объема ферромагнитного материала за один цикл перемагничивания.

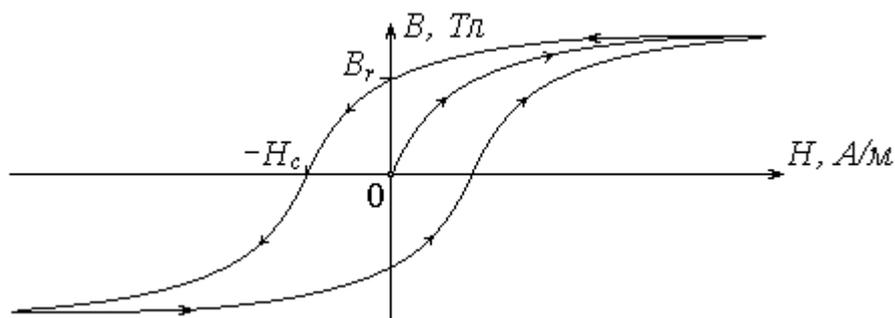


Рис. 3

Ферромагнитные материалы бывают *магнитотвердые* и *магнитомягкие*.

Ферромагнитные материалы с большим значением коэрцитивной силы ($H_c > 4000, A/m$) называются *магнитотвердыми*. Из этих материалов изготавливают *постоянные магниты*.

Ферромагнитные материалы с малым значением коэрцитивной силы ($H_c < 200, A/m$) называются *магнитомягкими*. Из этих материалов изготавливают *магнитопроводы* электрических машин и трансформаторов реле и др..

Зависимости $B = f(H)$ у ферромагнитных материалов *нелинейные*. Эти зависимости приводятся в справочниках в табличной форме или в виде кривых, называемых кривыми намагничивания.

К таким материалам относятся:

- технически чистое железо,
- листовая электротехническая сталь (железосилицистая),
- железоникелевые стали (пермаллой).

Кривые намагничивания этих материалов приведены на рис. 4.

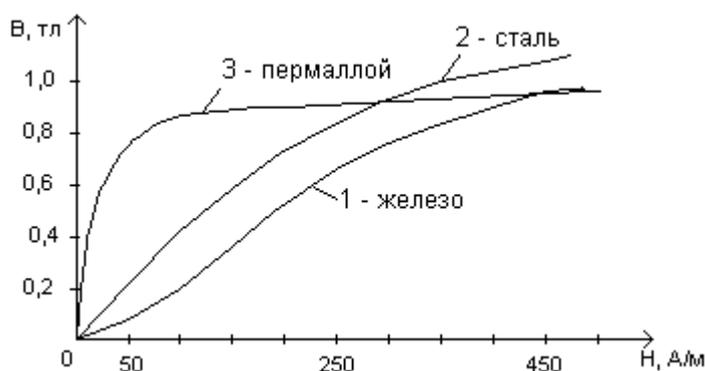


Рис. 4

Графики кривых намагничивания (рис. 4) используется для выбора материалов магнитопроводов при расчете различных электромагнитных устройств.

3. Анализ магнитных цепей

Практическим результатом теории магнитного поля является математический аппарат и методы расчета электромагнитных устройств. Любое электромагнитное устройство состоит из намагничивающих элементов (катушек, постоянных магнитов) и магнитопровода. Расчет заключается в определении материалов и геометрических размеров магнитопровода, тока катушки, числа ее витков и ее размеров. Намагничивающая катушка создает магнитное поле в магнитопроводе и в окружающем пространстве. Так как μ_r ферромагнитных материалов много больше μ_0 , то основная часть линий магнитного поля проходит по магнитопроводу.

Совокупность ферромагнитных тел и сред, по которым замыкается магнитный поток, называется магнитной цепью.

При анализе магнитных цепей допускаются следующие упрощения:

1. Магнитное поле изображается распределением магнитных силовых линий в магнитопроводе. Если поле равномерно распределено по сечению магнитопровода, то его изображают параллельными линиями.

2. Магнитная индукция и напряженность считаются равномерно распределенными по объему магнитопровода.

3. Магнитный поток считается сосредоточенным только в магнитопроводе.

Магнитные цепи делятся на однородные и неоднородные, разветвленные и неразветвленные. Однородная магнитная цепь приведена на рис. 1. Это замкнутый магнитопровод с равномерной обмоткой. Каждый виток обмотки создает линии магнитного потока, которые замыкаются по магнитопроводу. Совокупность витков создает общий магнитный поток.

На практике широко применяются неоднородные магнитные цепи. В них цепях обмотка сосредоточена в одном месте, а магнитопровод имеет стержни с различной магнитной проницаемостью μ_r (рис. 5).

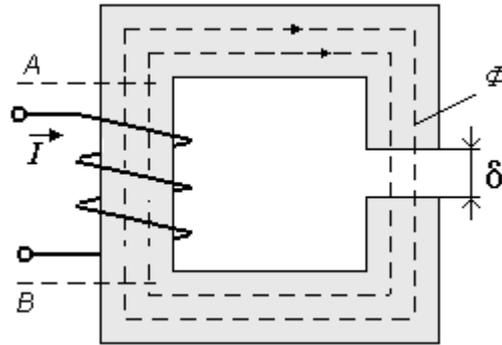


Рис. 5

С учетом перечисленных упрощений считается, что весь магнитный поток Φ проходит по магнитопроводу. Он постоянный как в ферромагнитном материале, так и в воздушном зазоре δ . Площадь воздушного зазора S_δ равна площади сечения ферромагнитного материала S_F . Поэтому и магнитная индукция $B = \Phi/S$ также постоянна. Однако напряженность магнитного поля H в ферромагнитном материале и воздушном зазоре различна. Поэтому такая цепь называется неоднородной.

Примерами разветвленных магнитных цепей могут служить цепи электрических машин, трансформаторов, поляризованных реле.

4. Анализ магнитных цепей постоянного тока

Суть анализа сводится к определению основных параметров магнитных цепей: магнитного потока Φ , напряженности магнитного поля H , магнитной индукции B , сечения магнитопровода S , тока катушки I и др. При этом пользуются понятиями магнитодвижущей силы, закона полного тока, магнитного напряжения U_M и магнитного сопротивления R_M .

Прямая задача расчета магнитной цепи заключается в том, что задан магнитный поток Φ и требуется определить магнитодвижущую силу F . Сначала определим магнитную индукцию в магнитопроводе $B = \Phi/S$. По кривой намагничивания $B = f(H)$ материала магнитопровода найдем значение напряженности магнитного поля H в магнитопроводе, соответствующее найденной величине индукции B .

Индукция магнитного поля в воздушном зазоре имеет ту же величину, что и в магнитопроводе, так как линии индукции непрерывны и поэтому ее величина не зависит от магнитных свойств среды. Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре $H_0 = B/\mu_0 = B/(4\pi 10^{-7})$.

$$\text{Магнитодвижущая сила обмотки } F = H \cdot l_{CP} + H_0 \cdot \delta .$$

Обратная задача расчета магнитной цепи заключается в том, что по заданному значению МДС требуется определить магнитный поток. Расчет такой задачи выполняется графоаналитическими методами, аналогичными тем, что использовались для расчета нелинейных цепей постоянного тока. Сначала задаются несколькими значениями потока Φ и строят магнитную характеристику цепи $F = f(\Phi) = H \cdot l_{CP} + H_0 \cdot \delta$. Затем по ней для заданной магнитодвижущей силы F определяют магнитный поток Φ .

Если по намагничивающей обмотке протекает ток I , то магнитодвижущей силой обмотки F называют произведение величины тока на число витков обмотки w :

$$F = I \cdot w . \quad (7)$$

Связь между магнитодвижущей силой F и напряженностью магнитного поля H устанавливает закон полного тока:

$$\oint_l H \cdot dl = w \cdot I = F \quad (8)$$

При анализе магнитных цепей пользуются значением средней линии магнитопровода, поэтому:

$$H \cdot l_{CP} = F . \quad (9)$$

Выделим в магнитопроводе рис. 5 участок длиной «AB».

Произведение:

$$H \cdot l_{AB} = U_{M.AB} \quad (10)$$

называют магнитным напряжением.

Если магнитная цепь содержит два неоднородных участка длиной l_F и l_δ , (рис. 5) то:

$$H_F \cdot l_F + H_\delta \cdot l_\delta = w \cdot I$$

или:

$$U_{M.F} + U_{M.\delta} = w \cdot I = F. \quad (11)$$

Таким образом, *алгебраическая сумма магнитных напряжений на участках цепи равна магнитодвижущей силе обмотки*. Выражение (11) представляет собой **второй закон Кирхгофа для магнитной цепи**.

Аналогом первого закона Кирхгофа является **теорема Гаусса**: *поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю*:

$$\vec{\Phi} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mathbf{0} \quad (12)$$

Рассмотрим выражение для магнитного напряжения:

$$U_M = H \cdot l_{CP} = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot l_{CP} = \Phi \frac{l_{CP}}{\mu_0 \mu_r \cdot S}.$$

Обозначим выражение:

$$\frac{l_{CP}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = R_M,$$

где R_M - магнитное сопротивление.

Тогда:

$$U_M = \Phi \cdot R_M. \quad (13)$$

Равенство (13) **представляет собой закон Ома для магнитной цепи**.

Если основной характеристикой электрической цепи является вольт-амперная характеристика, то для магнитной цепи - это ампер-веберная характеристика - зависимость между магнитным потоком и намагничивающим то-

ком, т.е. $\Phi = f(I)$ (рис. 6). Ампер – выборные характеристики часто применяют для анализа сложных магнитных цепей. На рис. 6 Φ_F - поток в ферромагнитном материале, Φ_δ - поток в воздушном зазоре, Φ_Σ - результирующий поток.

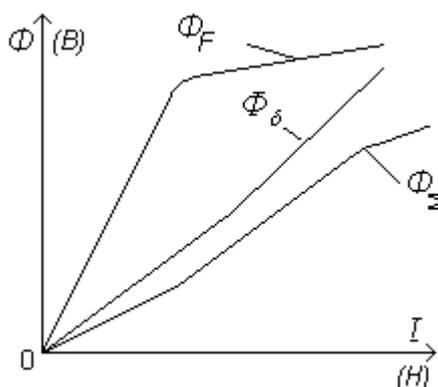


Рис. 6

Вебер-амперные характеристики адекватны гистерезисным $B = f(H)$, так как магнитный поток Φ прямопропорционален магнитной индукции (3), а ток намагничивающей катушки I – напряженности магнитного поля H :

$$I = \frac{H \cdot l_{CP}}{w}$$

Пример расчёта магнитной цепи постоянного тока

Найти намагничивающий ток I электромагнита с П – образным сердечником (1) и якорем (2), (рис. 7), обеспечивающий в воздушном зазоре магнитный поток $\Phi = 10^{-4}$ Вб. Геометрические размеры магнитопровода, число витков катушки w и материал, из которого изготовлен магнитопровод, известны:

Площадь сечения сердечника $S_1 = 2 \text{ см}^2$;

Площадь сечения якоря $S_2 = 1,2 \text{ см}^2$;

Длина сердечника $l_1 = 18 \text{ см}$;

Длина якоря $l_2 = 5 \text{ см}$;

Длина воздушного зазора $l_B = 0,1 \text{ см}$;

Число витков катушки $w = 1000$

Материал сердечника и якоря – технически чистое железо.

Решение

Схема замещения магнитной цепи изображена на рис. 8, где воздушным

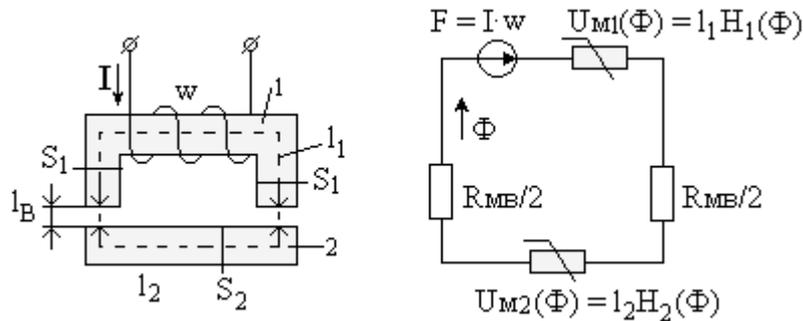


Рис. 7

Рис. 8

зазорам соответствуют линейные магнитные сопротивления R_{MB} , а сердечнику и якорю – нелинейные.

По второму закону Кирхгофа, для магнитной цепи

$$F = I \cdot w = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_B \cdot 2l_B$$

$$\Phi \approx \Phi_F = \Phi$$

При

Магнитная индукция $B_1 = \Phi/S_1 = 0,5 \text{ Тл}$; $B_2 = \Phi/S_2 = 0,833 \text{ Тл}$.

Значения $H_1 = 84 \text{ А/м}$, $H_2 = 98 \text{ А/м}$ находим по кривой намагничивания (рис. 9) для соответствующих значений магнитной индукции.

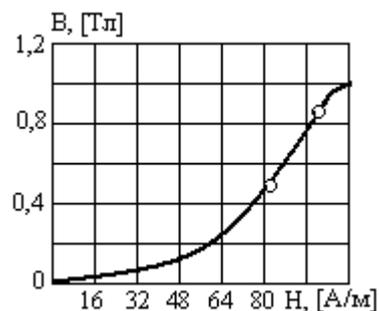


Рис. 9

Для воздушного зазора $B_B = B_1$; $H_B = B_1/\mu_0 = 397887.358 \text{ А/м}$.

($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, [Гн/м]).

Таким образом, $I = (H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_B \cdot 2l_B) / w = 0,816$ [А]

$$I := \frac{84 \cdot \frac{18}{100} + 98 \cdot \frac{5}{100} + \frac{397887.358 \cdot 2 \cdot 0.1}{100}}{1000} = 0.816$$

5. Особенности физических процессов в магнитных цепях переменного тока

При анализе магнитных цепей переменного тока вводят следующие допущения:

- 1) магнитное поле рассеяния отсутствует;
- 2) активное сопротивление обмотки равно нулю.

При таких допущениях можно записать

$$u(t) = e(t)$$

где $e(t) = -d\psi(t) / dt = -wd\Phi(t) / dt$.

Отсюда следует, что магнитный поток в магнитопроводе переменный и определяется напряжением (воздействием), если $u(t) = U_m \cdot \sin \omega \cdot t$, то:

$$\Phi(t) \frac{1}{w} \int u(t) dt = \frac{1}{\omega w} U_m \cdot \cos \omega t. \quad (14)$$

Таким образом, закон изменения магнитного потока $\Phi(t)$ не зависит от параметров цепи. Это первая особенность магнитных цепей переменного тока. Чтобы определить вторую особенность обратимся к известному выражению

$$U(t) = L \cdot i(t).$$

Из него следует, что:

$$L = \frac{\psi(t)}{i(t)}. \quad (15)$$

Но для простейшей магнитной цепи справедливы уравнения:

$$\psi(t) = w \cdot \Phi(t) = w \cdot SB(t);$$

$$i(t) = H(t)l_{CP} / w.$$

Переменные $B(t)$ и $H(t)$ связаны по закону динамической петли гистерезиса. Эта связь нелинейна. Значит зависимость (15) тоже нелинейна и должна иметь вид:

$$L = \frac{d\psi(t)}{di(t)} = L(i).$$

Следовательно, индуктивность обмотки магнитопровода зависит от тока и переменна. Это вторая особенность.

Теперь напряжение на участке магнитной цепи определится выражением

$$u(t) = L(i) \cdot di(t) / dt.$$

Видим, что $u(t)$ нелинейно. Отсюда третья особенность: *магнитные цепи являются нелинейными цепями. Поэтому при синусоидальном напряжении на обмотке ток в ней оказывается несинусоидальным.*

Изменение магнитного потока $\Phi(t)$ с частотой ω приводит к нагреву магнитопровода из-за вихревых токов. Следовательно, в магнитопроводе возникают потери электроэнергии. Их называют магнитными потерями. Это четвертая особенность.