

15-16 Электромагнитные аппараты. Магнитные системы электрических аппаратов

Магнитная система является одним из основных элементов электротехнических устройств и электрических аппаратов. В нее входят источники магнитного поля (обмотка с током, возбуждающая магнитное поле, постоянный магнит) и система магнитопроводов из ферромагнитного материала, по которым замыкается магнитный поток.

Магнитные системы широко используются в аппаратостроении как элемент привода аппаратов (электромагнитные контакторы, пускатели, реле, выключатели) и как устройство, создающее электромагнитные силы, например, в электромагнитных муфтах и тормозных электромагнитах.

Конфигурация магнитной цепи электромагнитных устройств зависит от назначения аппарата. Она может быть разнообразной: однородной и неоднородной, неразветвленной и разветвленной, симметричной и несимметричной.

Неразветвленной магнитной цепью называют цепь, через элементы которой замыкается один и тот же магнитный поток. В разветвленной магнитной цепи содержатся ветви, в каждой из которых замыкаются свои магнитные потоки. В однородной магнитной цепи, которую образует замкнутый магнитопровод, магнитный поток находится в однородной среде. Неоднородной называется магнитная цепь, состоящая из участков, которые имеют разные сечения, воздушные зазоры, ферромагнитные тела с различными магнитными свойствами [4]. Из курса физики известна способность вещества под воздействием напряженности внешнего магнитного поля H создавать собственное поле, называемое намагниченностью M , которая характеризуется магнитной восприимчивостью χ . Вещества, имеющие высокое значение магнитной восприимчивости, называются ферромагнитными или магнитными. К ним относятся железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), редкоземельные элементы: гадолиний (Gd), диспрозий (Dy), а также сплавы, созданные на основе этих элементов.

Магнитная индукция в веществе определяется по формуле

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_r \mu_0 H = \mu_a H, \quad (3.1)$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость вакуума, которая называется магнитной постоянной, Гн/м ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$); μ_a — абсолютная магнитная проницаемость; $\mu_r = 1 + \chi$ — относительная магнитная проницаемость; χ — магнитная восприимчивость.

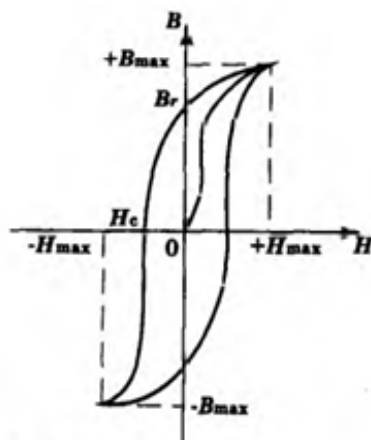


Рис. 3.1. Петля гистерезиса

Если элемент магнитной цепи, например цилиндр из ферромагнитного материала, поместить в однородное магнитное поле, он намагничивается. Если после его намагничивания до состояния насыщения внешнее поле убрать (уменьшить до нуля), то цилиндр явится источником магнитного поля за счет намагниченности материала — остаточной намагниченности. Чтобы разрушить эту остаточную намагниченность, нужно создать поле, которое будет направлено противоположно полю, создаваемому цилиндром, для преодоления задерживающей, так называемой коэрцитивной силы H_c , которая стремится сохранить созданную микротоками намагниченность.

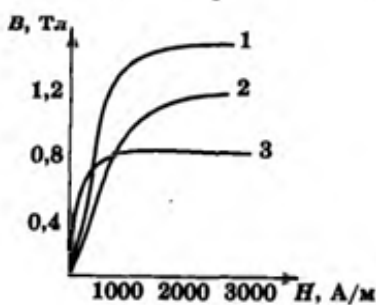


Рис. 3.2. Кривые намагничивания:

- 1 — технически чистое золото;
- 2 — электротехническая сталь;
- 3 — пермаллой

электротехнической стали 2 и пермаллоя 3.

Магнитомягкие материалы применяются для устройства магнитных цепей электрических машин, аппаратов, электромагнитов и т.п.

Зависимость магнитной индукции B в веществе (материале) от магнитного поля H носит нелинейный характер: по мере увеличения напряженности H индукция B вначале резко возрастает, а затем, приближаясь к области насыщения, процесс намагничивания материала замедляется и прекращается, когда резервы ферромагнетика исчерпаны.

Если элемент магнитной цепи, например цилиндр из ферромагнитного материала, поместить в однородное магнитное поле, он намагничивается. Если после его намагничивания до состояния насыщения внешнее поле убрать (уменьшить до

нуля), то цилиндр явится источником магнитного поля за счет намагниченности материала — остаточной намагниченности. Чтобы разрушить эту остаточную намагниченность, нужно создать поле, которое будет направлено противоположно полю, создаваемому цилиндром, для преодоления задерживающей, так называемой коэрцитивной силы H_c , которая стремится сохранить созданную микротоками намагниченность.

В зависимости от значения коэрцитивной силы H_c все магнитные материалы подразделяются на магнитомягкие и магнитотвердые. Магнитомягкие материалы отличаются малой коэрцитивной силой H_c (круто поднимающаяся основная кривая намагничивания и относительно малая площадь петли гистерезиса) (рис. 3.1). К ним относятся электротехническая сталь, технически чистое железо, сплавы железа и никеля (пермаллой) и т.д. Эти материалы размагничиваются даже в магнитном поле Земли. На рис. 3.2 приведены кривые намагничивания технически чистого железа 1, электротехнической стали 2 и пермаллоя 3.

Магнитотвердые материалы также изготавливаются из сплавов на основе железа, кобальта, никеля по специальной технологии. Они отличаются большой коэрцитивной силой H_c и имеют широкую петлю гистерезиса. В намагниченном состоянии сохраняют намагниченность и после снятия намагничивающего поля. Из таких материалов изготавливают постоянные магниты, которые используются в качестве источников магнитного поля в магнитных системах различных электротехнических устройств.

Рассмотрим магнитную цепь на примере клапанной системы, изображенной на рис. 3.3. Подвижная часть магнитной цепи называется якорем 1. Часть магнитной цепи, на которой установлена намагничивающая обмотка 2, называется сердечником 3. Вертикальные и параллельные части магнитопровода 3, 4 называются стержнями. Намагничивающая обмотка создает магнитодвижущую силу МДС, под действием которой возбуждается магнитный поток. Этот поток замыкается как через зазор δ , так и между другими частями магнитной цепи, которые имеют различные магнитные потенциалы.

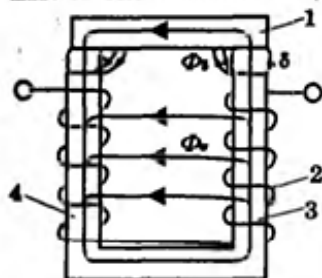


Рис. 3.3. Магнитная цепь клапанной системы

Воздушный зазор δ , изменяющийся при перемещении якоря, называется рабочим зазором. Соответственно поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим потоком и обозначается Φ_r . Все остальные потоки в магнитной цепи называются потоками рассеяния Φ_r . Сила, которую развивает якорь электромагнита, как правило, определяется потоком в рабочем зазоре δ .

Магнитный поток создается током I , протекающим по обмотке катушки. Произведение тока на количество витков катушки W определяет намагничивающую силу IW .

Задачей расчета магнитной цепи является определение МДС катушки, необходимой для создания рабочего потока заданной величины (прямая задача) или рабочего потока по известной МДС катушки (обратная задача) [2]. Эти задачи можно решить с помощью законов Кирхгофа применительно к магнитной цепи.

Как и в электрических цепях, используются уравнения магнитного состояния:

алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в любом узле, всегда равна нулю (первый закон Кирхгофа):

$$\sum \Phi = 0; \quad (3.2)$$

алгебраическая сумма снижения магнитного потенциала по замкнутому контуру равна намагничивающей силе этого контура (второй закон Кирхгофа):

$$\sum \Phi dR_m = IW, \quad (3.3)$$

где R_m — магнитное сопротивление, $1/\text{Гн}$.

$$S_1 = 3,14 \cdot 0,03^2 / 4 = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$l_1 = 0,086 \text{ м};$$

ярмо прямоугольного сечения:

$$S_2 = 0,075 \cdot 0,012 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$l_2 = 0,149 \text{ м};$$

якорь прямоугольного сечения:

$$S_3 = 0,075 \cdot 0,012 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$l_3 = 0,061 \text{ м};$$

воздушный зазор, сечение которого принимаем равным сечению сердечника:

$$S_\delta = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$\delta = 0,002 \text{ м}.$$

Магнитная индукция в участках цепи $B = \Phi / S$:

$$B_1 = 1,2 \cdot 10^{-3} / 7,1 \cdot 10^{-4} = 1,69 \text{ Тл},$$

$$B_2 = 1,2 \cdot 10^{-3} / 9 \cdot 10^{-4} = 1,33 \text{ Тл},$$

$$B_3 = 1,2 \cdot 10^{-3} / 9 \cdot 10^{-4} = 1,33 \text{ Тл},$$

$$B_\delta = 1,2 \cdot 10^{-3} / 7,1 \cdot 10^{-4} = 1,69 \text{ Тл}.$$

Напряженность магнитного поля на стальных участках можно определить по кривой намагничивания литой стали:

$$H_1 = 5700 \text{ А/м}; H_2 = 1800 \text{ А/м}; H_3 = 1800 \text{ А/м}.$$

В воздушном зазоре

$$H_\delta = B_\delta / \mu_0 = 1,69 / 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} = 135 \cdot 10^4 \text{ А/м}.$$

Составляем уравнение по закону полного тока:

$$IW = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_\delta \delta;$$

$$IW = 5700 \cdot 0,086 + 1800 \cdot 0,149 + 1800 \cdot 0,061 + 135 \cdot 10^4 \cdot 0,002 = 3586 \text{ А}.$$

Количество витков обмотки

$$W = IW / I = 3586 / 0,2 = 17840.$$

Магнитная цепь с постоянным магнитом. В электрической аппаратуре и других устройствах в качестве источников намагничивающей силы широко используются постоянные магниты. Они обладают свойством длительно сохранять остаточную намагниченность, изготавливаются из магнитотвердых материалов, которые характеризуются широкой петлей магнитного гистерезиса и имеют в намагниченном состоянии большой запас магнитной энергии.

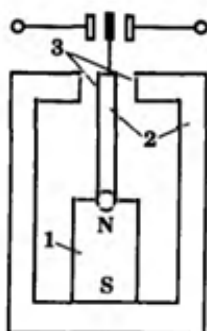


Рис. 3.5. Магнитная система поляризованного реле

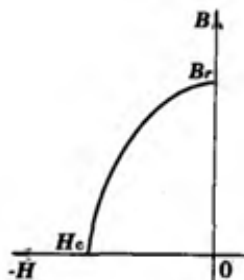


Рис. 3.6. Характеристика размагничивания постоянного магнита

На рис. 3.5 схематично изображена магнитная система поляризованного реле. Система состоит из нескольких участков: из магнитотвердого материала — постоянного магнита 1, из магнитомягкого материала 2, который служит магнитопроводом, и воздушного зазора 3, форма и размеры которого определяются конструкцией и назначением устройства.

Важнейшей характеристикой таких материалов является участок петли гистерезиса, который расположен во втором квадранте (между положительной осью индукции B и отрицательной осью напряженности поля H) и называется кривой размагничивания (рис. 3.6). Эта характеристика используется при расчете постоянных магнитов.

Согласно закону полного тока сумма магнитных напряжений участков магнитной цепи равна нулю, так как внешняя намагничивающая сила (ампер-витки) отсутствует:

$$H_T l_T + \sum Hl = 0$$

или

$$U_{MT} = -\sum U_M. \quad (3.7)$$

Здесь U_{MT} — магнитное напряжение постоянного магнита;
 $\sum U_{MT} = \sum (U_{M.c} + U_{M.o})$ — сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи, включая воздушные зазоры, но без постоянного магнита.

Особенности электромагнитных цепей переменного тока. Магнитные цепи на переменном токе обладают следующими особенностями:

ток в катушке электромагнита зависит главным образом от ее индуктивного сопротивления;

магнитное сопротивление цепи зависит не только от абсолютной магнитной проницаемости μ_a , длины l , сечения S сердечника, но и от потерь в стали, наличия короткозамкнутых обмоток (витков), расположенных на сердечнике;

для снижения потерь на вихревые токи магнитопровод изготавливают шихтованным, прямоугольного поперечного сечения [2].

Шихтованные сердечники электромагнитов на переменном токе выполняются из листов электротехнической стали, причем чем выше частота тока, тем меньше должна быть толщина листа.

Короткозамкнутые витки магнитопроводов. Сила тяги электромагнита переменного тока изменяется во времени по закону

$$F_z = F_m \sin^2 \omega t, \quad (3.8)$$

где F_m — амплитудное значение силы тяги электромагнита.

Следовательно, для притяжения якоря нужно, чтобы среднее значение силы было больше противодействующего усилия. В определенные моменты времени сила противодействующих пружин становится больше силы электромагнита, при этом происходит отрыв якоря от сердечника. По мере увеличения силы электромагнита якорь снова притягивается к сердечнику. В результате он будет непрерывно вибрировать, создавая шум и ненормальные условия работы для механизма и контактов.

Для ликвидации этого явления в электромагнитах, работающих в однофазной сети переменного тока, используются короткозамкнутые витки, которые изготовлены из меди или алюминия и встроены в торец якоря.

При правильном подборе короткозамкнутого витка полностью устраняется гудение и дрожание сердечника электромагнитного аппарата.

Ускорение и замедление срабатывания электромагнита. После подачи напряжения на обмотку возрастает поток в магнитной цепи до тех пор, пока сила, которую развивает электромагнит, не станет больше противодействующей силы. После этого якорь начинает свое движение. Ток и магнитный поток, изменяясь, достигают установившихся значений после того, как якорь занимает свое конечное положение.

Величина тока, при котором начинается движение якоря, называется током трогания $i_{тр}$, а время, в течение которого ток увеличивается от нуля до тока трогания $i_{тр}$, временем трогания $t_{тр}$.

Полное время срабатывания состоит из времени трогания и времени движения:

$$t_{срб} = t_{тр} + t_{дв}. \quad (3.9)$$

В большинстве случаев основную часть времени срабатывания составляет время трогания. Поэтому для ускорения и замедления срабатывания электромагнита изменяют время трогания $t_{тр}$.

Скорость увеличения тока в момент включения зависит от питающего напряжения и индуктивности обмотки. Скорость срабатывания возрастает при снижении активного сопротивления

цепи, при этом увеличивается установившийся ток I_y . Однако при уменьшении активного сопротивления обмотки увеличивается потребляемая мощность P :

$$P = U^2 / R, \quad (3.10)$$

что способствует увеличению размеров катушки, магнитопровода и самого аппарата, следовательно, повышается расход материалов.

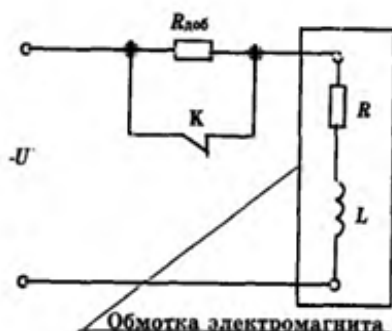


Рис. 3.7. Схема включения обмотки с форсировкой

способствует быстрому увеличению тока до тока трогания якоря. Якорь начинает двигаться, контакт K размыкается и в цепь вводится добавочное сопротивление $R_{доб}$, что снижает мощность, которая выделяется в обмотке.

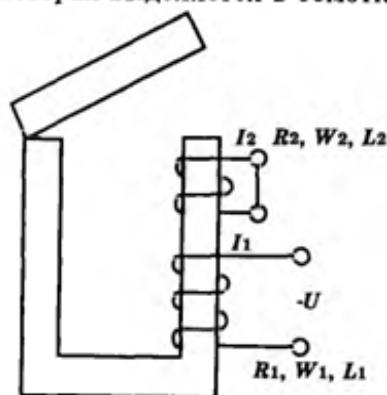


Рис. 3.8. Замедление действия электромагнита

Для сохранения размеров электромагнита используют форсировку, т.е. последовательно с обмоткой катушки подключают добавочное активное сопротивление $R_{доб}$ (рис. 3.7). В отключенном положении добавочное сопротивление $R_{доб}$ шунтируется, т.е. закорачивается контактами K , связанными с якорем электромагнита. После подачи напряжения на обмотку малое активное сопротивление R обмотки

При увеличении натяжения противодействующей пружины возрастает ток трогания $i_{тр}$, следовательно, увеличивается и время трогания $t_{тр}$.

Время отпущания электромагнита состоит из времени снижения потока до потока отпущания, при котором сила тяги электромагнита становится равной противодействующей силе, и времени движения при отпущании. Якорь и подвижные части аппарата движутся равноускоренно под действием силы, равной средней силе пружин.

Для создания электромагнитов замедленного действия используется короткозамкнутая обмотка или медная гильза (рис. 3.8). При подаче напряжения на обмотку увеличивается поток в магнитной цепи. Он наводит ЭДС в короткозамкнутой обмотке. Электродвижущая сила вызывает ток такого направления, при котором поток короткозамкнутой обмотки направлен навстречу намагничивающему потоку и результирующий поток увеличивается медленнее, что обеспечивает замедление срабатывания электромагнита.