

38 Магнитное поле в ферромагнитной среде

Любое вещество, находящееся в магнитном поле внешних токов, приходит в особое состояние намагничённости, характеризуемое возникновением в нем добавочного магнитного поля.

Движение заряженных частиц внутри атома можно рассматривать как элементарные внутриатомные токи, поэтому добавочное магнитное поле, возникшее в результате намагничивания, будем называть *полем элементарных (внутренних) токов*.

Магнитные свойства элементарного кругового тока (рис. 5.10) можно характеризовать вектором магнитного момента, величина которого определяется произведением элементарного кругового тока и площади описанного им круга, а направление – по правилу буравчика:

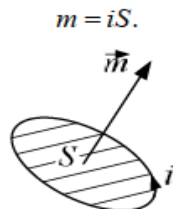


Рис. 5.10. Магнитный момент элементарного кругового тока

При отсутствии магнитного поля внешних токов элементарные токи внутри вещества ориентированы беспорядочно, поэтому суммарный магнитный момент оказывается равным нулю, а магнитное поле элементарных токов не обнаруживается.

Под влиянием магнитного поля внешних токов меняется ориентация осей вращения элементарных токов и их магнитные моменты направлены в одну сторону. Это явление называют *намагничиванием вещества*.

Интенсивность и характер намагничивания у различных веществ в одинаковом магнитном поле внешних токов значительно отличаются.

Вещества, в которых магнитное поле элементарных токов направлено против поля внешних токов, т. е. ослабляющие внешнее магнитное поле, называют *диамагнетиками*. У них относительная магнитная проницаемость $\mu_r < 1$, например у висмута $\mu_r = 0,99983$.

Вещества, усиливающие магнитное поле, называют *парамагнетиками* ($\mu_r > 1$, например, у платины $\mu_r = 1,00036$). Существуют вещества (железо, никель, кобальт и некоторые сплавы), способные вызывать большое усиление внешнего магнитного поля. Это *ферромагнитные материалы*, имеющие $\mu_r = 10^3 \dots 10^6$.

Особенность ферромагнитных веществ – наличие сильных магнитных связей молекул, вследствие чего в них образуются весьма малые (**микроскопические**) области, **внутри которых магнитные моменты молекул ориентированы в одну сторону**. Такие области имеют значительный общий магнитный момент и называются *самопроизвольно намагниченными*.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты самопроизвольно намагниченных областей направлены беспорядочно, и ферромагнитные вещества не проявляют своих магнитных свойств.

Если же ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле, то под его действием векторы намагниченности отдельных областей будут поворачиваться по внешнему полю. В результате индукция результирующего магнитного поля оказывается **во много раз больше**, чем магнитная индукция внешнего поля до помещения в него ферромагнитного тела.

Электрические машины, трансформаторы и многие электротехнические устройства создают на основе **ферромагнитных материалов** для увеличения магнитного потока и для сосредоточения магнитного поля в заданной области пространства.

5.11. Характеристики ферромагнитных материалов

Свойства ферромагнитных материалов принято характеризовать **зависимостью магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H** .

Различают **два основных типа** зависимости $B(H)$: **кривые намагничивания** и **гистерезисные петли**.

Под *кривыми намагничивания* понимают однозначную зависимость между B и H , т. е. каждому значению B соответствует определенное значение H .

Если ток в обмотке кольцевого магнитопровода (см. рис. 5.8), изготовленного из ферромагнитного материала, **плавно изменять от положительного максимального значения $+I_{\max}$ до отрицательного максимального значения $-I_{\max}$ и затем в обратной последовательности**, то зависимость $B(H)$ после ряда циклов перемагничивания

ния при значениях B и H меньше тех, которые соответствуют полному насыщению, получается в виде симметричных петель магнитного гистерезиса (рис. 5.11).



Рис. 5.11. Симметричные петли гистерезиса

Кривую, проведенную через вершины всех симметричных гистерезисных петель, называют *основной кривой намагничивания*.

Каждый из отрезков, отсекаемых петлей гистерезиса на оси ординат (при $H = 0$), определяет *остаточную индукцию* (B_r и $-B_r$), а каждый отрезок, отсекаемый той же петлей на оси абсцисс (при $B = 0$), — *коэрцитивную* (задерживающую) *силу* (H_c и $-H_c$).

Таким образом, *гистерезисная петля* представляет собой неоднозначную зависимость $B(H)$ и характеризует отставание изменения магнитной индукции B от изменения напряженности магнитного поля H .

Предельной гистерезисной петлей или *предельным циклом* называют симметричную гистерезисную петлю, снятую при очень больших значениях напряженности H_{\max} . Участок предельного цикла $B_r H_c$ (см. рис. 5.11) принято называть *кривой размагничивания* или *«спинкой» гистерезисной петли*. Этой кривой пользуются

при расчете постоянных магнитов и магнитных элементов запоминающих устройств вычислительной техники.

Участок основной кривой намагничивания при очень больших H , вблизи $\pm H_{\max}$, где восходящая и нисходящая части предельной петли практически сливаются, называется *областью магнитного насыщения*. Это означает, что все магнитные моменты самопроизвольно намагниченных областей ориентированы по направлению внешнего поля.

Остаточный магнетизм ($\pm B_r$) объясняется тем, что при снятии внешнего поля определенная часть магнитных моментов сохраняет приобретенное при намагничивании направление, поэтому магнитная индукция и магнитный поток в сердечнике не уменьшаются до нуля некоторое время.

Напряженность $\pm H_c$, названная коэрцитивной (задерживающей) силой, компенсирует поле намагниченности сердечника. В результате ее действия магнитная индукция B и магнитный поток Φ в сердечнике уменьшаются до нуля.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a ферромагнитного вещества в каждой точке основной кривой намагничивания определяется отношением

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

Как видим (см. рис. 5.11), с ростом напряженности поля H магнитная проницаемость вначале увеличивается, а при переходе в область насыщения уменьшается, т. е. относительная магнитная проницаемость ферромагнитных веществ μ_r – величина непостоянная и зависит от напряженности магнитного поля.

Основную кривую намагничивания используют при расчетах магнитных цепей.

Петлю гистерезиса приходится учитывать при расчетах электрических цепей синусоидального тока, содержащих катушки с ферромагнитным сердечником.

Для всех ферромагнитных материалов, используемых в электротехнике, кривые намагничивания и петли гистерезиса приводятся в справочниках в виде графиков или таблиц.

Для примера на рисунке 5.12 приведены основные кривые намагничивания некоторых марок сталей.

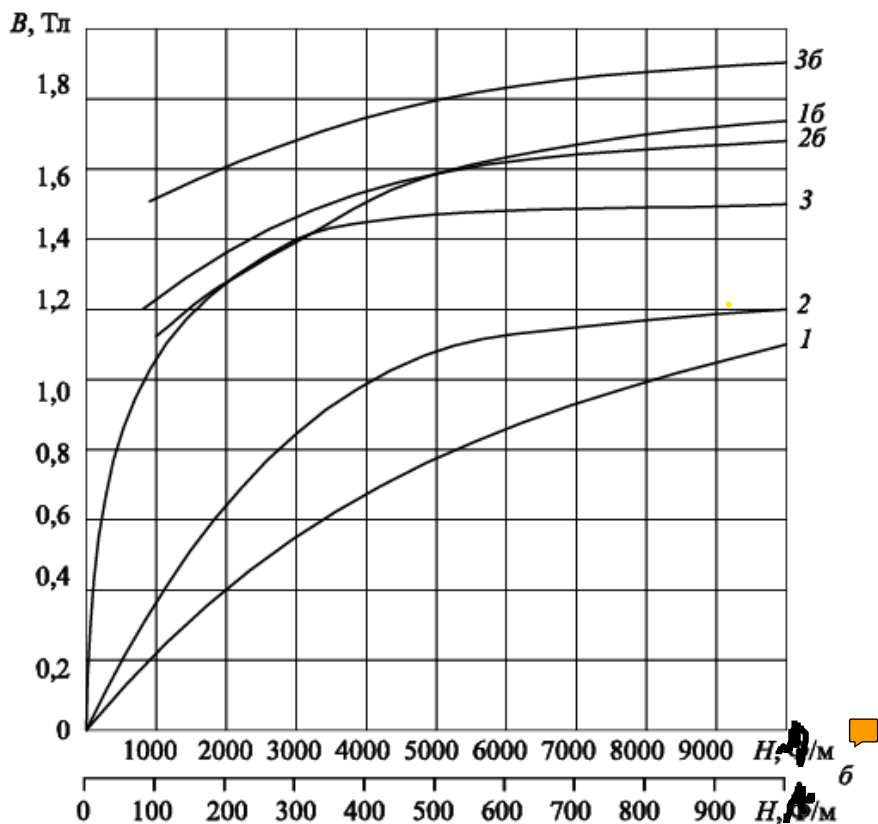


Рис. 5.12. Основные кривые намагничивания $B(H)$ различных марок сталей:
 1 – литая сталь; 2 – листовая электротехническая сталь 1512 (горячекатаная);
 3 – листовая электротехническая сталь 3411 (холоднокатаная)

5.12. Виды ферромагнитных материалов

Ферромагнитные материалы можно классифицировать по магнитным свойствам. Различают магнитомягкие, магнитотвердые материалы, магнитодиэлектрики и ферриты.

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимающейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. Их применяют во всех устройствах, которые работают или могут работать при периодически изменяющихся магнитных потоках (трансформаторах, электрических двигателях, генераторах, индуктивных катушках и т. п.). Поскольку потери энергии на перемагничивание пропорциональны площади гистерезисной петли, то у магнитомягких материалов (электротехнические стали, железоникелевые сплавы типа пермаллоя, перминвара и др.) эти потери небольшие.

Некоторые магнитомягкие материалы (например, перминвар, сплавы 68НМП и др.) обладают петлей гистерезиса по форме, близкой к прямоугольной (рис. 5.13, кривая 1). Такие материалы получили распространение в устройствах автоматики и вычислительной техники.

Магнитотвердые материалы имеют полого поднимающуюся основную кривую намагничивания и большую площадь гистерезисной петли (рис. 5.13, кривая 2). Чаще всего их используют для изготовления постоянных магнитов. В группу магнитотвердых материалов входят углеродистые стали, сплавы магнито, вольфрамовые, платиново-кобальтовые и сплавы на основе редкоземельных элементов.

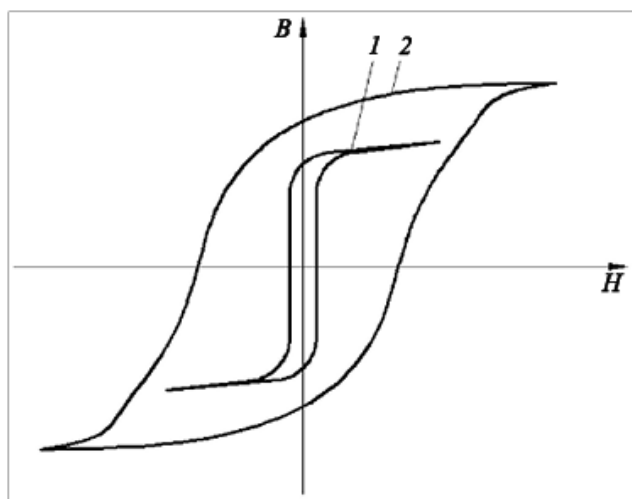


Рис. 5.13. Гистерезисные петли магнитомягкого 1 и магнитотвердого 2 материалов

В радиотехнических, телевизионных и других устройствах, где используют высокочастотные сигналы, сердечники индуктивных катушек изготавливают из магнитодиэлектриков или ферритов.

Магнитодиэлектрики получают путем смешивания, формования и запекания мелкоизмельченного порошка магнетита, железа или пермаллоя с диэлектриком. Так как каждую ферромагнитную крупинку обволакивает пленка из диэлектрика, то сердечники из магнитодиэлектриков не насыщаются.

Ферриты – это ферромагнитные материалы. Магнитомягкие ферриты изготавливают из оксидов железа, марганца и цинка или из оксидов железа, никеля и цинка путем формования и обжига. Магнитотвердые ферриты получают на основе феррита бария.

В отличие от магнитодиэлектриков ферриты могут насыщаться.



Вопросы и задачи для самоконтроля

1. Назовите величины, характеризующие магнитное поле, запишите, как они связаны между собой.

2. Сформулируйте и запишите закон Ампера.

3. Сформулируйте и запишите закон полного тока.

4. Поясните, испытывает ли уединенный провод механические усилия при прохождении по нему тока.

5. Поясните, при помощи каких величин определяют значение индуктивности.

6. Объясните, как изменится индуктивность L катушки на кольцевом сердечнике, если неферромагнитный сердечник заменить стальным с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 800$.
Ответ: увеличится в 800 раз.

7. В равномерном магнитном поле с индукцией $B = 1,2$ Тл помещен прямолинейный проводник длиной $l = 50$ см с током $I = 10$ А. Определите силу, действующую на проводник, если он расположен перпендикулярно направлению линий магнитной индукции. Ответ: $F = 6$ Н.

8. Определите магнитную индукцию B , если в равномерном магнитном поле контур площадью $S = 10$ см², расположенной перпен-

дикулярно линиям магнитной индукции, пронизывает магнитный поток $\Phi = 10 \cdot 10^{-4}$ Вб. Ответ: $B = 1$ Тл.

9. На поверхности проводника с током, расположенного в воздухе, напряженность магнитного поля $H = 100$ А/м. Определите магнитную индукцию B . Ответ: $B = 1,256 \cdot 10^{-4}$ Тл.

10. По прямому цилиндрическому проводу радиусом $R_0 = 0,02$ м протекает ток $I = 100$ А. Найдите напряженность магнитного поля на поверхности провода и на расстоянии $R = 0,4$ м от оси провода. Ответ: 796 А/м; 398 А/м.

11. Определите силу взаимодействия двух проводов линии электропередачи постоянного тока $I = 1000$ А, если расстояние между проводами $a = 0,5$ м, длина линии 100 м. Ответ: $F = 40$ Н.

12. Катушка с числом витков $N = 150$ и током $I = 5$ А создает магнитный поток $\Phi = 0,1 \cdot 10^{-4}$ Вб. Определите индуктивность L катушки. Ответ: $L = 3 \cdot 10^{-4}$ Гн.

13. Индуктивности обмоток трансформатора: $L_1 = 0,45$ Гн и $L_2 = 0,2$ Гн. Определите взаимную индуктивность обмоток, если коэффициент связи между ними 0,9. Ответ: $M = 0,27$ Гн.