

Лекция №5. Магнитное поле

Цель: ознакомиться с понятием магнитного поля, его характеристиками и законами

Основные характеристики магнитного поля

Магнитное поле – одна из двух сторон электромагнитного поля, характеризующаяся воздействием на электрически заряженную частицу с силой, пропорциональной заряду частицы и ее скорости.

Магнитное поле изображается силовыми линиями, касательные к которым совпадают с ориентацией магнитных стрелок, внесенных в поле. Таким образом, магнитные стрелки как бы являются пробными элементами для магнитного поля.

За положительное направление магнитного поля условно принимают направление северного полюса магнитной стрелки.

Магнитное поле и электрический ток – взаимосвязанные явления.

Вокруг проводника, в котором существует ток, всегда имеется магнитное поле, и, наоборот, в замкнутом проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает ток.

Основными векторными величинами, характеризующими магнитное поле, являются магнитная индукция \mathbf{B} и намагниченность \mathbf{J} .

Магнитная индукция \mathbf{B} – это векторная величина, определяемая по силовому воздействию магнитного поля на ток.

Намагниченность \mathbf{J} – магнитный момент единицы объема вещества.

Кроме этих двух величин магнитное поле характеризуется *напряженностью магнитного поля \mathbf{H}* .

Три величины – \mathbf{B} , \mathbf{J} , \mathbf{H} – связаны друг с другом следующей зависимостью:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}).$$

В СИ единица индукции \mathbf{B} – тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = 1 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = 1 \text{ Вб}/\text{м}^2$.

Единица намагниченности \mathbf{J} и напряженности поля \mathbf{H} – ампер на метр (А/м).

Намагниченность \mathbf{J} представляет собой вектор, направление которого полагают совпадающим с направлением \mathbf{H} в данной точке:

$$\mathbf{J} = \chi\mathbf{H}.$$

Коэффициент χ для ферромагнитных веществ является функцией \mathbf{H} .

Величины \mathbf{B} и \mathbf{H} связаны формулой

$$\mathbf{B} = \mu_0\mu\mathbf{H},$$

где μ_0 – постоянная, характеризующая магнитные свойства вакуума; μ – абсолютная магнитная проницаемость.

В СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Для ферромагнитных веществ μ является функцией H .

Магнитный поток Φ через некоторую поверхность S – это поток вектора магнитной индукции через эту поверхность:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S},$$

где $d\mathbf{S}$ – элемент поверхности S .

В СИ единица магнитного потока – вебер (Вб).

При расчетах магнитных цепей обычно применяют две величины: магнитную индукцию B и напряженность магнитного поля H .

Намагниченность J в расчетах, как правило, не используют [при необходимости значение J , отвечающее соответствующим значениям B и H , всегда можно найти].

Закон полного тока

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов $\sum I$, охваченных этим контуром, определяется законом полного тока

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I.$$

Положительное направление интегрирования $d\mathbf{l}$ связано с положительным направлением тока I правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков w , по которой проходит ток I , то $\sum I = Iw$ и $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = Iw$.

Закон полного тока является опытным законом. Его можно экспериментально проверить путем измерения $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l}$ с помощью специального устройства, называемого *магнитным поясом*.

С помощью закона полного тока вычисляются индукции или напряженности магнитных полей, создаваемых симметричными магнитными системами.

Приведем в качестве примера формулы индукции магнитного поля, создаваемого некоторыми проводниками с током.

Магнитное поле прямолинейного проводника с током имеет вид концентрических окружностей (см. рис.). Направление поля определяют по

правилу буравчика. Вследствие симметрии напряженность поля во всех точках, равноудаленных от оси проводника, одинакова.

Напряженность поля, создаваемого током I , текущим по бесконечному прямому проводу, в точке, находящейся на расстоянии r от провода равно

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

Эта формула справедлива для проводника бесконечной длины, но практически ею пользуются и тогда, когда длина проводника значительно больше расстояния r .

Вычислим напряженность магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным соленоидом. Соленоид представляет собой тонкий провод, навитый плотно, виток к витку, на цилиндрический каркас. В любой точке внутри соленоида вектор напряженности имеет направление, параллельное его оси и имеет величину

$$H = nI,$$

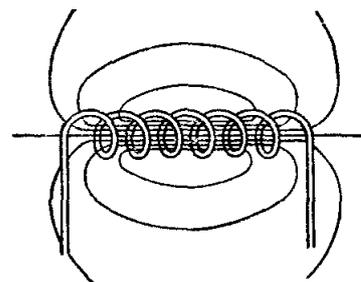
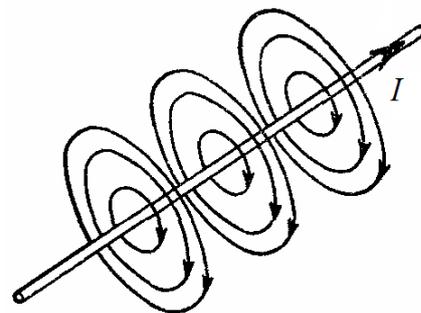
где n – число витков соленоида, приходящееся на единицу его длины, I – сила тока в соленоиде.

Вне бесконечно длинного соленоида магнитная индукция равна нулю,

Если длина соленоида конечна, то в средней части соленоида напряженность определяется по формуле $H = nI$, а вблизи его концов она равна

$$H = \frac{1}{2}nI.$$

На рисунке показана примерная картина линий магнитной индукции для соленоида конечной длины.



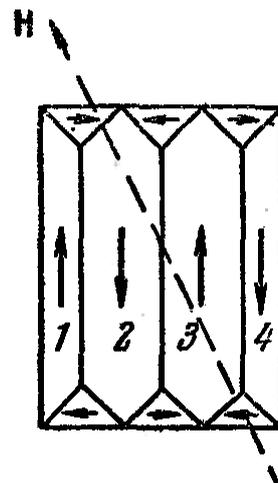
Намагничивание ферромагнитных материалов

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, называют ферромагнитными. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы. Оказавшись во внешнем магнитном поле, эти материалы значительно усиливают его. Это явление можно объяснить таким образом.

Ферромагнитные материалы имеют области самопроизвольного намагничивания. Магнитное состояние каждой из таких областей характеризуется вектором намагниченности. Векторы намагниченности отдельных областей (доменов) ориентированы случайным образом. Поэтому

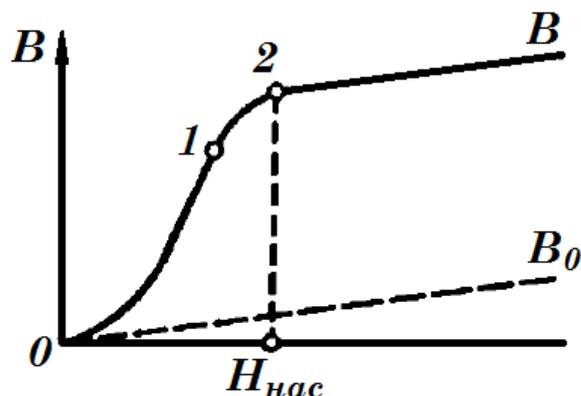
намагниченность ферромагнитных тел в отсутствие внешнего магнитного поля не проявляется.

Если ферромагнитное тело поместить во внешнее магнитное поле (см. рис.), то под его воздействием произойдут изменения, в результате которых векторы намагниченности отдельных областей самопроизвольного намагничивания будут ориентированы в направлении внешнего поля. Индукция результирующего магнитного поля будет определяться как индукцией внешнего поля, так и магнитной индукцией отдельных доменов, т. е. результирующее значение индукции будет намного превышать ее начальное значение. Таким образом, суммарное магнитное поле значительно превысит внешнее поле.



Магнитное состояние ферромагнитного поля и характеризуется кривой намагничивания. Рассмотрим процесс намагничивания ферромагнитного сердечника, помещенного в катушку с током.

Предположим сначала, что сердечник отсутствует. Тогда при увеличении тока в катушке магнитная индукция меняется по линейному закону, так как $B_0 = \mu_0 H$ (см. рис.).



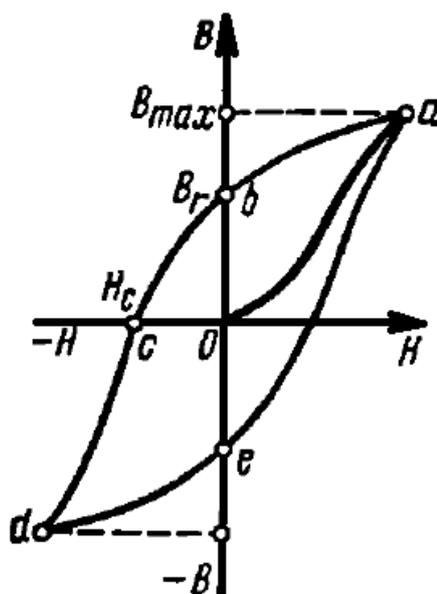
Теперь будем полагать, что катушка имеет сердечник, который в исходном состоянии размагничен. По мере увеличения тока в катушке магнитная индукция в сердечнике быстро возрастает (участок 0–1 кривой намагничивания; см. рис. выше). Это объясняется ориентацией векторов намагниченности ферромагнитного сердечника. Затем интенсивность ориентации замедляется (участок 1–2 кривой намагничивания); точка 2 соответствует магнитному насыщению, т. е. при некотором значении напряженности поля $H_{нас}$ все домены сориентированы и при дальнейшем увеличении тока в катушке индукция поля растет так же, как она росла бы при отсутствии сердечника.

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура T_k , при которой области спонтанного намагничивания распадаются и вещество утрачивает ферромагнитные свойства. Эта температура называется точкой

Кюри. Для железа она равна $768\text{ }^{\circ}\text{C}$, для никеля $365\text{ }^{\circ}\text{C}$. При охлаждении ферромагнетика ниже точки Кюри в нем снова возникают домены.

Циклическое перемагничивание

Если через катушку пропускать ток, меняющий свое направление, то сердечник будет перемагничиваться. Рассмотрим этот процесс (см. рис.). При увеличении тока в катушке магнитная индукция возрастает до индукции насыщения (точка a). При уменьшении тока магнитная индукция снижается, но так, что при тех же значениях H она оказывается больше значений магнитной индукции, соответствующих увеличению тока. Это объясняется тем, что часть доменов еще сохраняет свою ориентацию. Таким образом, при $H = 0$ в сердечнике сохраняется магнитное поле, характеризуемое остаточной индукцией B_r , (точка b). При увеличении тока в противоположном направлении магнитное поле катушки компенсирует магнитное поле, созданное доменами сердечника. При напряженности поля H_c (точка c), которая называется *коэрцитивной силой*, результирующая магнитная индукция окажется равной нулю. Дальнейшее увеличение тока в катушке вызовет перемагничивание сердечника, т. е. поворот векторов намагниченности на 180° . При некотором значении H (точка d) сердечник снова будет насыщаться. При уменьшении тока в катушке до нуля индукция будет уменьшаться до остаточной индукции (точка e). Увеличение тока в положительном направлении вызовет намагничивание сердечника до исходного состояния (точка a). Полученную кривую называют *петлей гистерезиса*. Участок $0-a$ характеристики намагничивания называют *основной кривой намагничивания*.



Процесс перемагничивания связан с затратами энергии и сопровождается выделением теплоты. Энергия, которая затрачивается за один цикл перемагничивания, пропорциональна площади, ограниченной петлей гистерезиса.

В зависимости от вида петли гистерезиса ферромагнитные материалы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы обладают круто поднимающейся основной кривой намагничивания и относительно малыми площадями гистерезисных петель. К магнитомягким материалам, относятся железо, мягкая (незакаленная)

сталь, а также ряд других материалов, которые легко намагничиваются. В них можно получить высокие значения магнитной индукции при сравнительно небольших напряженностях намагничивающего поля. Но зато они легко размагничиваются, и поэтому в них наблюдается очень небольшой остаточный магнетизм.

Для магнитотвердых материалов характерны пологость основной кривой намагничивания и большая площадь гистерезисной петли. Магнитожесткие (или магнитотвердые) материалы намагнитить труднее. К ним относятся закаленная сталь и стальные сплавы, содержащие вольфрам, хром, молибден, алюминий, никель, кобальт и другие металлы. Для их намагничивания необходимо значительно более сильное поле, но зато они характеризуются большей коэрцитивной силой, т. е. их труднее размагнитить. В таких материалах может существовать большой остаточный магнетизм.

Вопросы для самоконтроля:

1. Дайте определение магнитного поля.
2. Что называют силовыми линиями?
3. Как определить направление магнитного поля?
4. Что называется магнитной индукцией, магнитным потоком?
5. Поясните закон полного тока.
6. Что называется соленоидом и каково его магнитное поле?
7. Какие тела называются ферромагнитными?
8. Что такое гистерезис?
9. Какие процессы возникают при перемагничивании стали?
10. В чем различие магнитомягких и магнитотвердых материалов?