

Работа 2.06

ФЕРРОМАГНЕТИК В ПЕРЕМЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Задача

1. По предельной петле гистерезиса найти для испытуемого материала индукцию насыщения, остаточную индукцию и коэрцитивную силу.
2. Получить основную кривую намагничивания.
3. Вычислить начальную и максимальную магнитную проницаемость материала, индукцию и напряженность магнитного поля, соответствующие максимальной магнитной проницаемости.

Введение

Ферромагнетиками называют вещества с магнитной проницаемостью, много большей единицы. Типичными их представителями являются железо, никель, кобальт, их сплавы между собой и с некоторыми другими металлами. Сходными с ферромагнетиками свойствами обладают так называемые антиферромагнетики, среди них неметаллические вещества ферриты [3, с.228-229].

Ферромагнетики широко применяются в технике, например, для изготовления сердечников трансформаторов, деталей электромашин (т.е. для уменьшения размеров электромагнитных устройств), а также для запоминающих устройств счетной техники, звуко- и телезаписи.

Индукция \vec{B} магнитного поля в некотором материале складывается из индукции $\mu_0 \vec{H}$ поля, созданного макроскопическими токами, и индукции $\mu_0 \vec{J}$ поля, созданного самим материалом [3, с.210-211], [4, с.154-158],

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}). \quad (1)$$

Здесь \vec{H} - напряженность магнитного поля; \vec{J} - намагниченность материала - отношение магнитного момента некоторого небольшого объема вещества к самому этому объему; μ_0 - магнитная постоянная. Магнитной проницаемостью материала называют отношение индукции магнитного поля к части ее, созданной макроскопическими токами:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2)$$

Большая намагниченность, достигаемая в ферромагнетиках, и соответственно большая их магнитная проницаемость обусловлены наличием так называемых магнитных доменов - областей самопроизвольного (спонтанного) намагничения. Их собственные магнитные моменты во много раз превосходят магнитные моменты молекул, так как размеры доменов обычно имеют порядок 10^{-6} м или больше. В ненамагниченном материале магнитные моменты доменов ориентированы хаотично, поэтому суммарное поле доменов отсутствует. Если создать в ферромагнетике магнитное поле макроскопических токов (например, поместив образец внутри катушки с током), магнитные моменты доменов частично ориентируются по этому полю и существенно его усилят.

Большие магнитные моменты доменов и тот факт, что домены возникают лишь в некоторых кристаллических структурах, определяют ряд особенных свойств ферромагнетиков [3, с.221-225; 4, с.176-180]. Намагниченность не только велика, но и нелинейно зависит от напряженности поля. При большей напряженности практически все магнитные моменты доменов ориентированы по внешнему магнитному полю; дальнейший рост напряженности не ведет и увеличению намагниченности, а рост индукции становится весьма слабым (см. формулу (1)). Это явление называют магнитным насыщением. При уменьшении напряженности (т. е. токов, создающих магнитное поле) материал "помнит" предыдущее магнитное состояние. Такое явление называют магнитным гистерезисом. Вблизи режима насыщения восходящая и нисходящая ветви петли гистерезиса сближаются.

Это показано на рис. 1. По горизонтальной оси отложена напряженность магнитного поля H , а по вертикальной - его индукция B . Первоначально образец не намагничен (точка O). Постепенный рост напряженности ведет к нелинейному увеличению индукции. При напряженности, соответствующей точке E , достигается насыщение. При уменьшении напряженности кривая EO не воспроизводится; даже при напряженности, равной нулю, образец обладает остаточной

индукцией B_r . Для того чтобы размагнитить образец (сделать индукцию равной нулю, точка F на рис. 1), нужно создать магнитное поле напряженностью $-H_c$: её модуль называют коэрцитивной силой ферромагнетика. Названные выше параметры ферромагнетика зависят от частоты изменения магнитного поля.

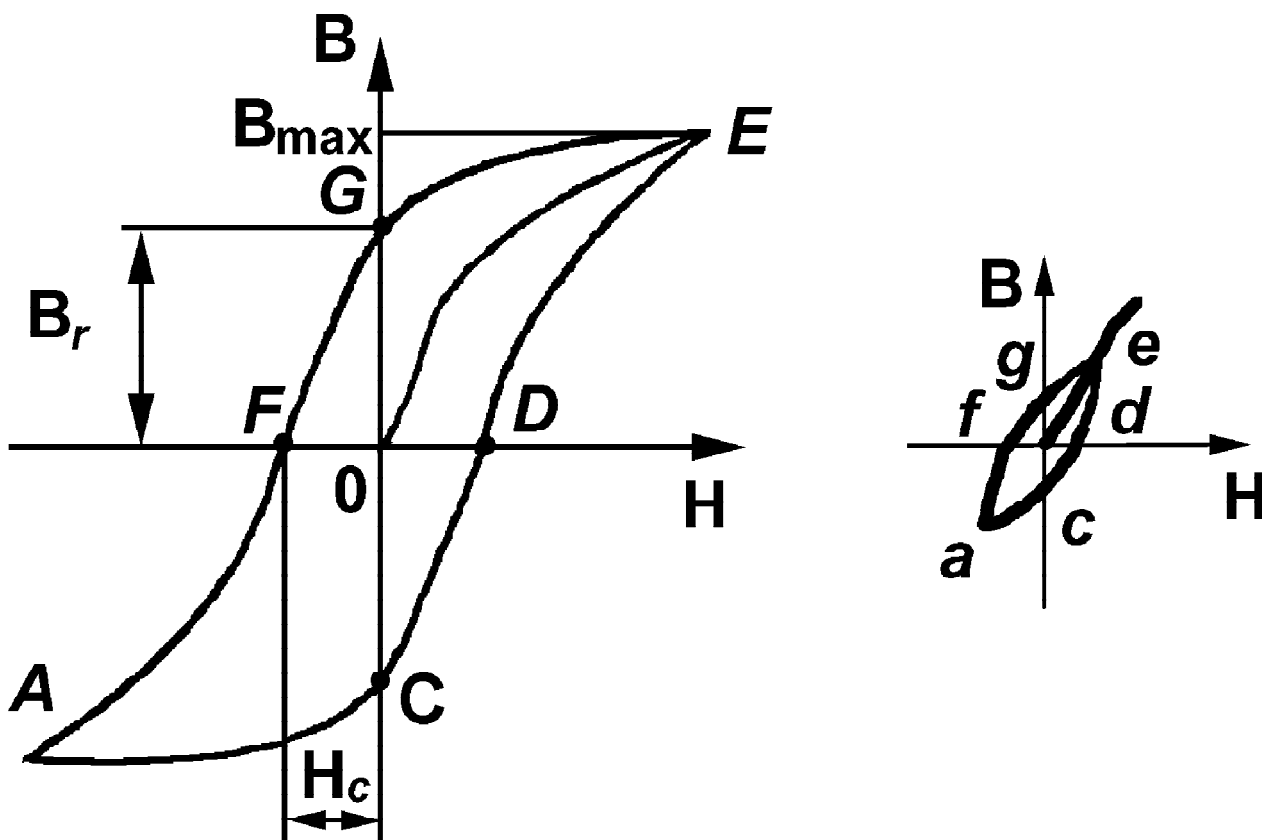


Рис. 1.

Если напряженность изменять в пределах $\pm H_{нас}$, процесс перемагничивания будет протекать так, как это изображает кривая $EGFACDE$.

Ее называют предельной петлей гистерезиса. При меньших пределах изменения напряженности поля получится частная петля гистерезиса, изображенная на рис. 1 кривой $egfacde$ (в правом углу). Вершины петель гистерезиса образуют основную кривую намагничения; она близка к изображенной на рис. 1 кривой первоначального намагничивания.

Установка

В этой работе испытуемый образец имеет форму кольца с прямоугольным поперечным сечением (рис. 2). Средний радиус $r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$ и площадь поперечного сечения кольца S указаны на установке. Намагничивающая (первичная) обмотка на образце имеет n_1 витков, и при силе тока в ней i создает поле напряженностью

$$H = i \frac{n_1}{2\pi \cdot r} \quad (3)$$

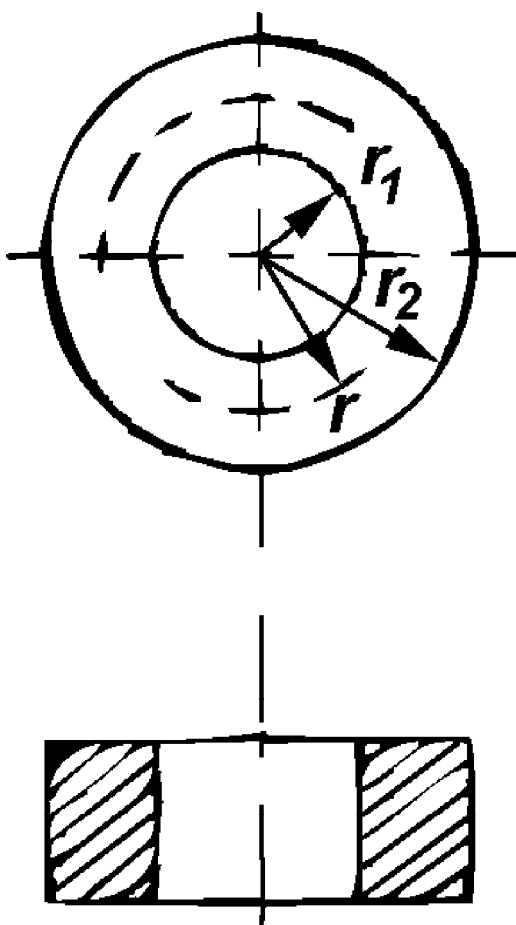


Рис. 2.

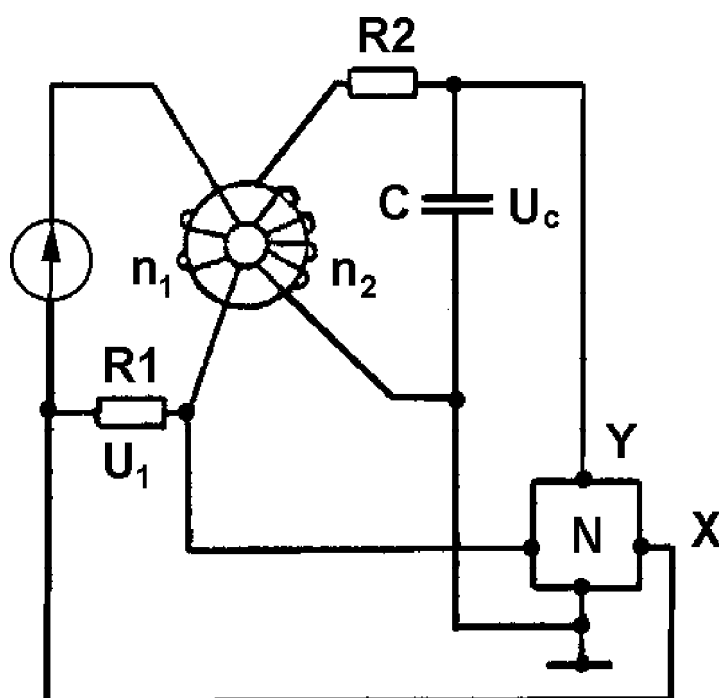


Рис. 3.

Схема установки показана на рис. 3. На первичную обмотку подают сигнал от генератора синусоидального напряжения; частоту и амплитуду тока i регулируют ручками на панели генератора.

Последовательно с первичной обмоткой включен резистор R_1 . Падение напряжения на нем $U = R_1 \cdot i$ пропорционально силе тока катушки i , а значит, и напряженности магнитного поля H (см. (3)). Это напряжение подано на вход усилителя горизонтальной развертки осциллографа, и поэтому горизонтальное отклонение пятна пропорционально i . Цена деления горизонтального отклонения a_x

регулируется ручкой на панели осциллографа и указана на шкале у этой ручки (V/дел, mV/дел; под делением понимается 1 см). По горизонтальному отклонению пятна легко вычислить напряженность

$$H = \frac{n_1 \cdot a_x}{2\pi \cdot r \cdot R_1} x = m_x x \quad (4)$$

Для таких вычислений удобно использовать коэффициент

$$m_x = \frac{n_1 \cdot a_x}{2\pi \cdot r \cdot R_1} \quad (5)$$

На испытуемый образец кроме первичной намотана вторичная обмотка с числом витков n_2 . В ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения индукции магнитного поля в образце:

$$\varepsilon = n_2 \frac{d\Phi}{dt} = n_2 S \frac{dB}{dt} \quad (6)$$

Здесь t - время; $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ - магнитный поток через каждый виток; B - индукция магнитного поля в образце. Из (6) следует

$$B = \frac{1}{n_2 S} \int \varepsilon \cdot dt \quad (7)$$

Для отыскания индукции B нужно интегрировать по времени ЭДС во вторичной обмотке испытуемого образца.

Для такой операции применяют различные интегрирующие элементы. Здесь использована простейшая интегрирующая RC - цепочка. Она показана на рис. 4 и состоит из последовательно включенных резистора сопротивлением R и конденсатора емкостью C .

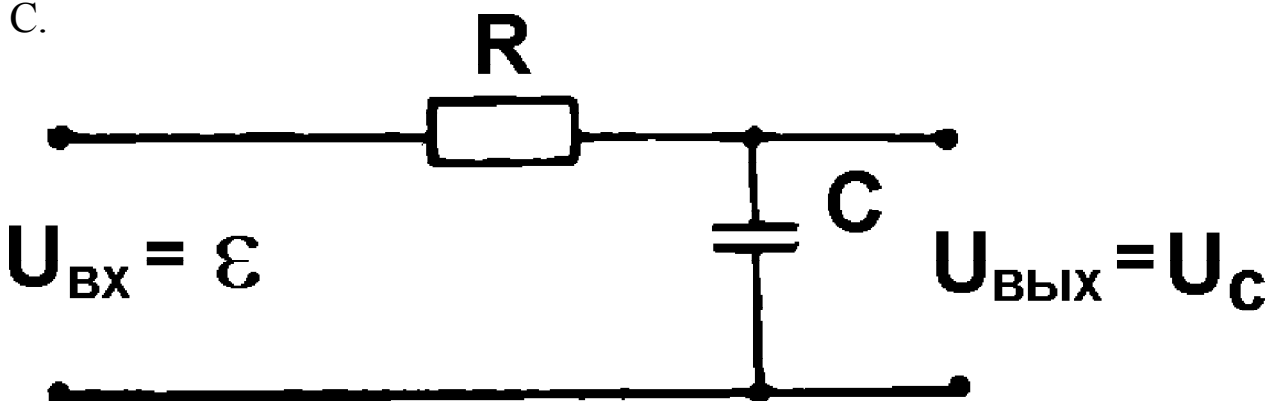


Рис. 4.

Напряжение на всей цепочке $U_{ax} = \varepsilon$; Выходным сигналом служит напряжение на конденсаторе $U_{вых} = U_c$. Этот сигнал с конденсатора С подан на вход усилителя вертикальной развертки осциллографа (см. рис. 3). Интегрирование будет достигнуто при условии $U_{вых} \ll U_{ax}$ (т. е. $u_c \ll \varepsilon$). В самом деле, всегда

$$U = \frac{q}{c} = \frac{1}{c} \int i \cdot dt \quad (8)$$

(q - заряд конденсатора), а при названном условии $i \approx \varepsilon / R$.

Поэтому

$$U_{вых} = U_c \approx \frac{1}{R \cdot C} \int \varepsilon \cdot dt . \quad (9)$$

Произведение RC называют постоянной времени цепочки (убедитесь, что оно имеет размерность времени). Интегрирование будет тем точнее, чем сильнее постоянная времени превышает характерное время процесса, в данном случае - период колебаний T . Для интегрирования необходимо условие $RC \gg T$, или, что то же самое,

$$RCf \gg 1, \quad (10)$$

где $f = 1/T$ - частота.

Из формул (6) и (9) получаем

$$U_c = \frac{n_2 S}{RC} . \quad (11)$$

Таким образом, на вход усилителя вертикального отклонения подан сигнал, напряжение которого пропорционально индукции магнитного поля в образце. Вертикальное отклонение пятна в свою очередь пропорционально этому напряжению, а значит, и индукции.

Цена деления вертикального отклонения a_y пятна регулируется ручкой на панели осциллографа и указана на шкале у этой ручки. По вертикальному отклонению пятна y можно вычислить индукцию

$$B = \frac{RC \cdot a_y}{Sn_2} y = m_y y \quad (12)$$

Коэффициент

$$m_y = \frac{RC \cdot a_y}{Sn_2} \quad (13)$$

позволяет непосредственно по вертикальному отклонению пятна вычислить индукцию магнитного поля.

Измерения и обработка результатов

Внимание! Убедитесь в том, что генератор и осциллограф отключены от сети, а корпуса их надежно заземлены!

1. Ознакомьтесь с электрической цепью установки. Проверьте правильность подключения её к генератору и осциллографу.
2. Включите осциллограф; подготовьте его к работе (получите сфокусированное пятно в центре экрана).
3. На генераторе выставьте частоту $5 \cdot 10^3$ Гц. Включите генератор. Манипулируя ручкой регулировки выходного напряжения генератора и ручками на панели осциллографа, получите на экране предельную петлю гистерезиса. Старайтесь, чтобы как по вертикали, так и по горизонтали петля занимала около 0,8 размера экрана. Запишите в протокол цены деления a_x и a_y .
4. Вычислите по формулам (5) и (13) коэффициенты m_x и m_y .
5. Отсчитайте на экране и запишите в протокол координаты, соответствующие остаточной индукции y_r , и коэрцитивной силе x_c (см. рис. 1).
6. Вычислите остаточную индукцию и коэрцитивную силу.
7. Измерьте координаты, соответствующие вершинам предельной петли гистерезиса, и вычислите индукцию насыщения и соответствующую ей напряженность поля. Внимание! Операцию измерения этих величин удобнее производить, выключая попеременно напряжения горизонтального и вертикального отклонения. В первом случае будет наблюдаться вертикальная линия длиной $2y_0$, соответствующая удвоенной индукции насыщения (формула (12)), во втором - горизонталь $2x_0$, соответствующая удвоенной максимальной напряженности (формула (4)).
8. Уменьшайте постепенно ступенями ток в намагничивающей катушке и, повторяя каждый раз процедуру, описанную в предыдущем пункте, снимите основную кривую намагничивания $B = B(H)$. Постарайтесь получить на этой кривой 8 - 10 точек. Постройте график основной кривой намагничивания.
9. Вычислите начальное (при $H = 0$) значение магнитной

$$\text{проницаемости } \mu_{\text{нач}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} \cdot (\mu_0 \text{ см. в приложении}).$$

10. Графически найдите напряженность поля, соответствующую максимуму магнитной проницаемости материала. Вычислите максимальное значение магнитной проницаемости по формуле (2).

Для записи результатов измерений и вычислений используйте следующую таблицу.

Номер измерения	X , дел	H , A/м	Y , дел	B ,Тл	
1					$a_x=$
2					$m_x=$
3					$a_y=$
4					$m_y=$
5					$x_c=$
6					$H_c=$
7					$y_r=$
8					$B_r=$
9					$\mu_{нач}=$
10					$\mu_{max}=$

Контрольные вопросы

1. Какова задача этой работы? Какие физические величины предстоит Вам измерить?
2. Как на предельной петле гистерезиса найти отрезки, изображающие остаточную индукцию и коэрцитивную силу? Как по каждому из них вычислить соответствующую физическую величину?
3. Каким способом намерены Вы получить основную кривую намагничивания? Как будете вычислять начальное и максимальное значения магнитной проницаемости?