

№8. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение динамической петли магнитного гистерезиса; снятие кривой намагничения и определение основных характеристик ферромагнетика - остаточной индукции, коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости, потерь энергии при перемагничивании.

2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Источник питания переменного тока, осциллограф, исследуемый материал.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Зависимость магнитной индукции B в ферромагнетике от напряженности H периодически меняющегося во времени внешнего магнитного поля представляет собой замкнутую кривую, которую называют динамической петлей магнитного гистерезиса представленную на рис.1.

В начале первого цикла, при увеличении поля H от нуля до максимума, индукция B изменяется по кривой 1-2-3, называемой основной кривой намагничения. Затем, при уменьшении поля от максимума до нуля индукция B уменьшается не по основной кривой намагничения, а по кривой 3-4-5, как бы запаздывая (отставая) от уменьшающегося поля. Это явление запаздывания называется магнитным гистерезисом.

При поле равном нулю намагничение не исчезает и характеризуется величиной B_0 , называемой остаточной индукцией.

Индукция B обращается в нуль лишь под действием поля H_C , направленном противоположно начальному. Напряженность H_C называется коэрцитивной силой. При периодическом изменении поля H индукция B изменяется в соответствии с кривой 3-4-5-6-7-8-9-3, т.е. описывает петлю гистерезиса.

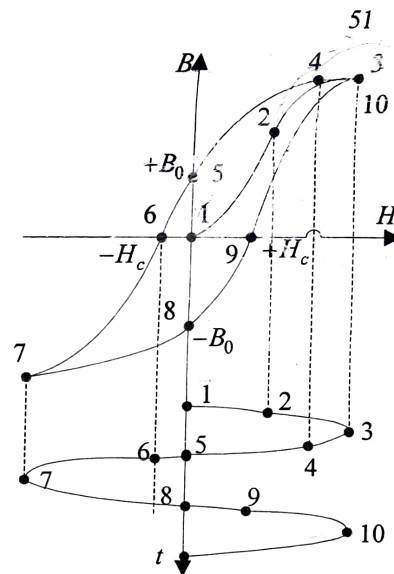


Рис.1

Основную кривую намагничения можно получить, уменьшая амплитуду переменного поля H до нуля. При этом вершины частичных петель гистерезиса лежат на основной кривой намагничения рис.2.

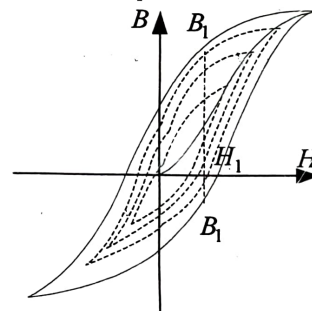


Рис.2

Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика не является однозначной функцией H ; оно в сильной степени зависит от предыстории образца- от того, в каких полях он побывал прежде. Например, в поле напряженности H_1 индукция может иметь любые значение от B'_1 до B''_1 .

В связи с неоднозначностью зависимости B от H понятие магнитной проницаемости в соотношении

$$B = \mu_0 \mu H. (1)$$

применяется лишь к основной кривой намагничивания, но и в этом случае магнитная проницаемость ферромагнетика не является постоянной величиной, а сильно зависит от напряженности поля H рис.3.

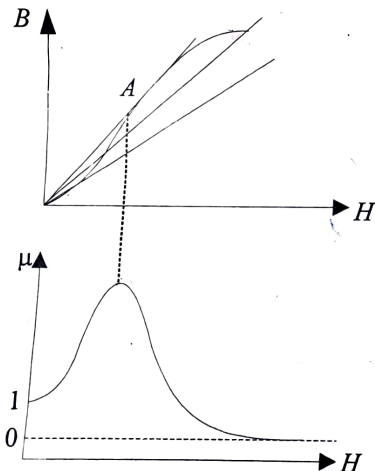


Рис.3

На верхнем рисунке приведена основная кривая намагничивания. Тангенс угла наклона прямых пропорционален отношению B/H , т.е. магнитной проницаемости μ . При увеличении H угол наклона растет до точки A , а затем убывает. Соответствующее изменение μ приведено на нижнем рисунке. При неограниченном возрастании H проницаемость асимптотически приближается к единице.

Явление гистерезиса, связанное со своеобразным внутренним трением в перемещающемся веществе, сопровождается выделением тепла. Применение первого начала термодинамики ($Q = \Delta U + A$) к замкнутому процессу цикла намагничивания ($\Delta U = 0$, т.к. ферромагнетик возвращается в исходное состояние) показывает, что в единице объема за счет работы ферромагнетика выделится тепло

$$Q = \oint_B H dB. (2)$$

Откуда следует, что тепло гистерезиса численно равно площади петли гистерезиса.

Для электрических машин, особенно трансформаторов, выгодны материалы с очень малой площадью петли гистерезиса, ибо они меньше всего нагреваются при перемещении.

Форма и площадь петли зависят от быстроты изменения H - чем больше частота намагничивающего поля, тем сильнее отставание индукции и тем больше тепловые потери.

В работе изучается гистерезис трансформаторной стали при ее перемещении в магнитном поле промышленной частоты 50 Гц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки приведена на рис.4.

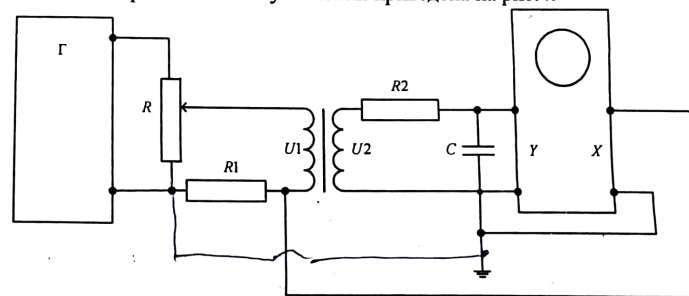


Рис 4

Исследуемый материал представляет собой кольцевой сердечник, навитый из тонкой трансформаторной стали. Это позволяет исключить

влияния размагничивающего фактора. Размагничивающий фактор уменьшает поле H внутри образца по сравнению с внешним, возбуждающим. Размагничивающий фактор уменьшается с увеличением длины образца и уменьшением его сечения.

На сердечнике намотаны две катушки (возбуждающая и индикаторная) с числами витков N_1 и N_2 соответственно.

Для наблюдения петли гистерезиса на горизонтальный вход осциллографа необходимо подать напряжение, пропорциональное напряженности поля в веществе:

$$U_x = k_1 H, \quad (3)$$

а на вертикальный вход - напряжение, пропорциональное индукции:

$$U_y = k_2 B, \quad (4)$$

Возбуждающая катушка на кольцевом сердечнике - это тороид. Напряженность магнитного поля тороида находится по четвертому уравнению Максвелла:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = N_1 I_1 \quad (5)$$

где L - длина окружности сердечника по средней линии.

$$\text{Тогда } H = \frac{N_1 I_1}{L} \quad (6)$$

С резистора R_1 на X -вход осциллографа подается напряжение U_x , пропорциональное напряженности поля:

$$U_x = R_1 I_1 = \frac{R_1 L}{N_1} H \quad (7)$$

В индикаторной катушке индуцируется Э.Д.С. электромагнитной индукции. Для одного витка в соответствии с законом Фарадея (вторым уравнением Максвелла)

$$\varepsilon_i = \oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = - \frac{d}{dt} (BS) = -S \frac{dB}{dt} \quad (8)$$

где l - длина окружности поперечного сечения сердечника;
 S - площадь поперечного сечения.

Для катушки из N_2 витков

$$\varepsilon_2 = N_2 \varepsilon_i = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (9)$$

Параметры индикаторной цепи выбраны так, что R_2 много больше индуктивного сопротивления катушки и емкостного сопротивления конденсатора, которыми можно пренебречь, тогда

$$I_2 = \frac{\varepsilon_2}{R_2} \quad (10)$$

Ток I_2 создает на конденсаторе C напряжение

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{C} \int \left(- \frac{N_2 S}{R_2} \right) \frac{dB}{dt} dt = - \frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (11)$$

пропорциональное B , которое подается на Y вход осциллографа.

В соответствии с напряжениями на входах осциллографа на его экране возникает кривая, воспроизводящая в некотором масштабе петлю гистерезиса.

4.2 ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Собрать схему.
2. Включить осциллограф. Дать прибору прогреться в течение 2-3 минут. Ручками "Смещение X " и "Смещение Y " установить светящуюся точку на середину экрана.
3. Включить источник питания. С помощью ручек "усилие по горизонтали", "усилие по вертикали" и регулятора источника питания получить максимальную петлю гистерезиса. Петля должна быть похожа на изображенную на рис.1. (соотношение размеров вертикаль-горизонталь $\sim 3/4$) и занимать значительную часть экрана по вертикали. Критерием максимальной петли служит практическая независимость H_C и B_0 от дальнейшего увеличения напряжения источника питания. При этом смещается только вершина петли по линейной зависимости B от H , характеризующий область насыщения. Установить петлю на начале этой зависимости. Положение ручек осциллографа не менять до конца измерений.
4. Перевести на кальку наблюдаемую петлю гистерезиса и отметить оси координат и масштабную сетку. Определить Y_{\max} и X_{\max} , соответствующие вершине петли в делениях масштабной сетки, а также Y_0 и X_C соответствующие B_0 и H_C . Полученные значения занести в таблицу 1.

Таблица 1

	Y_{\max}	X_{\max}	Y_0	X_c
Деления масштабной сетки				

5. Уменьшая ток через возбуждающую катушку до нуля, получить на экране семейство из 5-6 петель гистерезиса. Для каждой последующей петли B_0 должно уменьшаться на 15-20%. Результаты измерений X_c занести в таблицу 2.

Таблица 2

Вершины петель	1	2	3	4	5	6
X Делений сетки						
Y Делений сетки						

4.3 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 рассчитать коэффициент

$$k_1 = \frac{R_1 L}{N_1}, \text{ (формулы 3 и 7)}$$

и величину

$$H_{C \max} = \frac{X_c U_x}{k_1},$$

где $U_x = 1 \text{ В/дел.}$ - цена деления масштабной сетки по оси X.

2. Рассчитать коэффициент

$$k_2 = \frac{N_2 S}{R_2 C}, \text{ (формулы 4 и 11)}$$

и величину

$$B_{0 \max} = \frac{Y_0 U_y}{k_2},$$

где $U_y = 0,1 \text{ В/дел.}$ - цена деления масштабной сетки по оси Y.

3. По данным таблицы 2 построить основную кривую намагничивания. По точке, соответствующей максимальному углу (точка A на рис.3), определить максимальную магнитную проницаемость

$$\mu_{\max} = \frac{B_A}{\mu_0 H_A} = \frac{Y_A U_y / k_2}{\mu_0 X_A U_x / k_1}$$

4. Определить величину потерь энергии в единице объема ферромагнетика за цикл перемагничивания

$$Q = \frac{S_T U_x U_y}{k_1 k_2},$$

где S_T - площадь петли гистерезиса в единицах масштабной сетки.

5. Сравнить полученные величины $H_{C \max}$, $B_{0 \max}$, μ_{\max} , Q со справочными данными.

Приложение 1.

Параметры приведены на экспериментальной установке:

N_1 - число витков возбужденной обмотки, (200 вит.).

N_2 - число витков измерительной обмотки, (17 вит.).

S - площадь поперечного сечения сердечника, ($25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$)

L - длина окружности сердечника, ($4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$)

$R_1 = 100 \text{ Ом}$

$R_2 = 27 \text{ кОм}$

$C = 47 \text{ нФ}$

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

Приложение 2.

Справочные данные основных характеристик электротехнической стали

$H_C = 10 \text{ А/м}$

$B_0 = 0,3 \text{ Тл}$

$\mu_{\max} = 10000$

$Q = 0,1 - 6 \text{ Вт/кг}$

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятия магнитного гистерезиса, остаточной индукции, коэрцитивной силы.

2. Как экспериментально получить основную кривую намагничивания.

3. Понятие магнитной проницаемости для ферромагнетика. Методика определения ее максимального значения.

$$S_r = N_{\text{целых}} + \frac{1}{2} N_{\text{нецелых}}$$

4. Причины возникновения тепловых потерь при перемагничивании. Методика их определения.

5. Какие напряжения нужно подавать на "X" и "Y" входы осциллографа для наблюдения петли гистерезиса.

6. Сформулируйте и запишите второе уравнение Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Как оно применяется в работе.

7. Сформулируйте и запишите четвертое уравнение Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Как оно применяется в работе.

Список литературы

1. И.В. Савельев. "Курс общей физики", т.2, М., "Наука", 2002.
2. Д.В. Сивухин "Курс общей физики", "Электричество", М., "Наука", 1983