

# «Магнитные свойства электротехнических материалов»

## Цель работы:

- 1) Получить зависимость индукции магнитного поля от напряженности магнитного поля (петля гистерезиса).
- 2) Определить максимальные значения  $B_{\max}$  и  $H_{\max}$ , коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную намагниченность  $B_r$ .
- 3) Рассчитать магнитную проницаемость материала сердечника трансформатора.

## 1. Магнитные свойства веществ

По магнитным свойствам вещества подразделяются на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Под действием магнитного поля эти вещества способны приобретать магнитные моменты или намагничиваться.

Диамагнетики- вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются в направлении противоположном вектору магнитной индукции поля. Суммарные магнитные моменты атомов, молекул, ионов без внешнего магнитного поля равны нулю. Поля собственных магнитных моментов электронов диамагнитных веществ скомпенсированы полями, создаваемыми их орбитальными моментами количества движения. При включении внешнего магнитного поля характер орбитального движения электронов изменяется за счет действия на них силы Лоренца, тем самым, нарушается компенсация магнитных полей, возникающее при этом магнитное поле направлено против внешнего. Магнитная проницаемость диамагнетиков мала  $\mu < 1$ .

Парамагнетики- вещества, намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля. Поля собственных магнитных моментов электронов у парамагнетиков не компенсируют магнитные поля, создаваемые орбитальным моментом количества движения, поэтому, атомы парамагнетиков обладают не равным нулю магнитным моментом. Во внешнем магнитном поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов по полю, создается собственное магнитное поле, сонаправленное с внешним и усиливающее его. Тепловое движение разориентирует магнитные моменты, и в отсутствие внешнего поля парамагнетик размагничивается. Магнитная проницаемость парамагнетиков  $\mu > 1$ .

Ферромагнетики-вещества, обладающее намагниченностью в отсутствии внешнего магнитного поля, которая сильно изменяется при таких воздействиях как включение внешнего магнитного поля, изменение температуры, деформация. Магнитная проницаемость ферромагнетиков  $\mu \gg 1$  и может достигать тысяч.

Зависимость намагниченности  $M$  в зависимости от величины внешнего магнитного поля для диа- пара- и ферромагнетиков показана на рис.1.

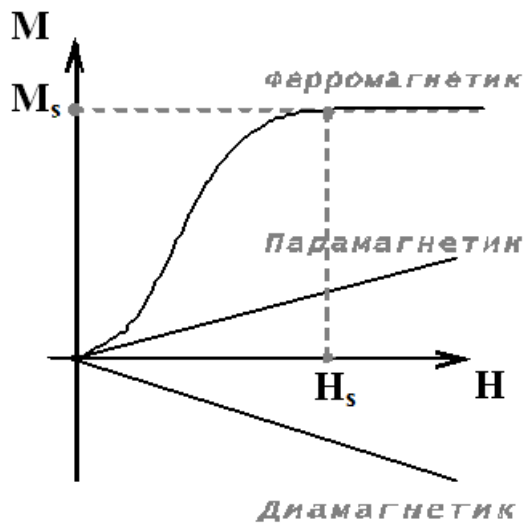


Рис.1 Зависимость намагниченности для диа-пара и ферромагнетиков от напряженности внешнего поля.

Циклическое перемагничивание ферромагнетика в переменном магнитном поле характеризуется кривой изменения магнитной индукции, которая получила название ферромагнитного гистерезиса (рис.2)

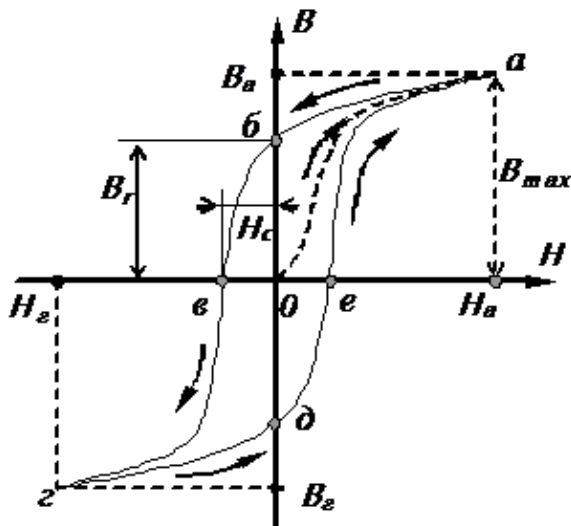


Рис.2 Петля ферромагнитного гистерезиса.

При увеличении внешнего магнитного поля, индукция  $B$ , являясь суммарной величиной собственной намагниченности и намагниченности, индуцированной внешним полем, растет и достигает насыщения (пунктирная кривая  $o-a$ ). При этом происходит ориентация по полю магнитных моментов целых областей спонтанной намагниченности и смещение границ этих областей (доменов), приводящее к росту размеров доменов. Процесс вращения магнитных моментов доменов по направлению внешнего поля  $H$  продолжается до достижения насыщения намагниченности  $H=H_s$  и достижения магнитной индукции  $B_{max}$ . При уменьшении поля до нуля (ход  $a-b$ ) магнитная индукция сохраняет некоторое значение  $B_r$  – остаточную индукцию, которая связана как бы с внутренним трением, сохраняющим ориентацию магнитных моментов. Дальнейшее изменение направления внешнего магнитного поля и его рост, заставляют переориентироваться магнитные моменты, и при поле  $H=H_c$  индукция поля равна нулю, т.е. суммарная ориентировка векторов не имеет преимущественного направления. Эта величина внешнего поля носит название коэрцитивной силы (отрезок  $o-b$ ). Дальнейшее увеличение поля вновь

приведет к магнитному насыщению.  $B_r$  численно равно  $B_a$ , но имеет противоположное направление. Уменьшение поля приводит к остаточной намагниченности  $B_d = B_b$ , но с противоположным направлением магнитного момента. Точка «е» характеризует коэрцитивную силу при другом направлении внешнего поля  $H_c$ .

Кривая а-б-в-г-д-е-а называется гистерезисным циклом или петлей гистерезиса. Наибольшая замкнутая петля для данного ферромагнитного материала называется предельной.

## 2. Принцип работы экспериментальной установки и определение $B_{max}$ и $H_{max}$

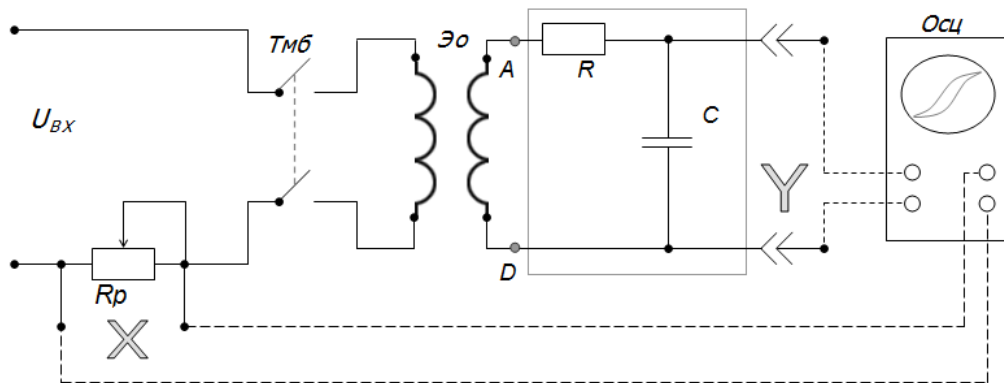


Рис. 3 Схема измерительной установки

Напряжение, снимаемое с потенциометра  $R_p$  пропорционально намагничивающему току  $I$ , поскольку:

$$I = \frac{U_{BX}}{R_p + R_{L1}} = \frac{U_{BX}}{R_p + \omega L_1}. \text{ Напряженность магнитного поля } H = \frac{N_1 I}{l_{cp}}, \text{ где } l_{cp} - \text{ средняя длина магнитной}$$

линии в сердечнике. Напряжение с резистора  $R_p$  : подается на вход осциллографа «X», и

$$U_{R_p} = \frac{H \cdot l_{cp}}{N_1} \cdot R_p \quad (1)$$

характеризует напряженность магнитного поля. На вертикальный вход осциллографа «Y» подается напряжение с конденсатора «C»  $U_c = \frac{1}{C} \int I dt$ , т.к.  $C = \frac{q}{U_c}$ , а  $I = \frac{dq}{dt}$ , где  $q$ - заряд на конденсаторе «C».

Полное напряжение (ЭДС) на обмотке AD связано с изменением в контуре площадью  $S$  магнитного потока:

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} S, \quad (2)$$

где  $S$ - площадь контура (поперечного сечения сердечника на котором намотаны обмотки), а  $d\Phi = dB \cdot S$ . ЭДС  $E$  на клеммах AD пропорционально изменению магнитной индукции в единицу времени  $\frac{dB}{dt}$ . Величина тока вторичной цепи, протекающего через RC-цепочку будет  $I_2 = \frac{U_R}{R} = \frac{E - U_c}{R}$ , тогда:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{E - U_c}{R} dt \approx \frac{1}{RC} \int_0^t E dt, \quad (3)$$

если  $U_c \ll E$ , и пренебрегая незначительным падением напряжения на активном сопротивлении проволоки вторичной обмотки. Подставляя  $E$  (2) в выражение (3) получим:

$U_C = \frac{1}{RC} \int_0^t \frac{dB}{dt} S dt = \frac{BS}{RC}$ , отсюда:  $B = \frac{U_C RC}{S}$  для одного витка. Если во вторичной обмотке число витков  $N_2$ , то:

$$B = \frac{U_C RC}{N_2 S} \quad (4)$$

Таким образом, с выхода интегрирующей RC цепочки мы снимаем зависимость магнитной индукции  $B$  от напряжения  $U_C$ .

На экране осциллографа получается зависимость величины магнитной индукции сердечника трансформатора от напряженности магнитного поля в трансформаторе за один период изменения напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора (петлю гистерезиса). Величины « $B$ » (вертикальный вход осциллографа) и  $H$  (горизонтальный вход) выражены через падения напряжения  $U_C$  на емкости  $C$  и падения напряжения  $U_{R_p}$  на сопротивлении  $R_p$  (см. схему установки, формулы (1), (4)). Величины напряжений  $U_{R_p}$  и  $U_C$  можно определить по размаху петли гистерезиса по осям « $X$ » и « $Y$ », зная чувствительность на входе « $X$ » и « $Y$ ».

По форме петли можно определить значения максимальной индукции  $B_{\max}$  и напряженности  $H_{\max}$  магнитного поля, значение коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной магнитной индукции  $B_r$ .

Значения  $B_{\max}$  и  $H_{\max}$  можно рассчитать по формулам:

$$B_{\max} = \frac{U_{C \max} RC}{N_2 S_{cp}}; \quad H_{\max} = \frac{U_{R_p \max} N_1}{R_p l_{cp}}$$

Где  $N_1, N_2$  - число витков в первичной и вторичной обмотках;

$U_C$  - значение напряжения на оси « $Y$ » осциллографа;

$U_{R_p}$  - значение напряжения на оси « $X$ » осциллографа;

$R_p$  - сопротивление реостата;

$l_{cp}$  - средняя длина магнитной линии в магнитопроводе трансформатора;

$S_{cp}$  - площадь поперечного сечения магнитопровода трансформатора.

Величина  $B = \mu \mu_0 H$ , где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (\text{Гн}/\text{м})$  - магнитная постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость материала.

$$\mu_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}} \quad (5)$$

При определении  $H_c$  и  $B_r$  можно воспользоваться линейной зависимостью:  $B = K_B U_C$ ;  $H = K_H U_{R_p}$ ,

, где  $K_B = \frac{RC}{N_2 S_{cp}}$ ,  $K_H = \frac{N_2}{R_p l_{cp}}$ .

Полученные зависимости позволяют определить магнитную проницаемость и напряженность магнитного поля в любой точке петли гистерезиса.

### Порядок выполнения работы

1. Получить зависимость индукции магнитного поля от напряжённости магнитного поля за несколько периодов изменения электрического сигнала, формирующего магнитное поле (петлю гистерезиса).
2. Определить максимальные значения  $B_{\max}$  и  $H_{\max}$ , коэрцитивную силу  $H_c$  и остаточную намагниченность  $B_r$  по петле гистерезиса.
3. Рассчитать магнитную проницаемость материала трансформатора.

Сведения о параметрах трансформаторов.

1. **Стальной сердечник:** наружный диаметр 80мм, внутренний диаметр 68мм,  $l_{cp}=232,6$  мм. Диаметр сердечника 6мм,  $S=28,26$  мм<sup>2</sup>.
2.  $R_1 = 1,0$  Ом,  $R_2 = 150$  Ком,  $C = 0,5$  мкФ.
3.  $N_1 = 728$  витков,  $N_2 = 450$  витков.
4. **Ферритовый сердечник:** наружный диаметр 80мм, внутренний диаметр 50мм,  $l_{cp}=204,1$  мм. Диаметр сердечника 10мм,  $S=78,5$  мм<sup>2</sup>.
5.  $R_1 = 1,0$  Ом,  $R_2 = 160$  Ком,  $C = 0,5$  мкФ.
6.  $N_1 = 400$  витков,  $N_2 = 200$  витков.

---

### Вопросы:

1. Как разделяются вещества по магнитным свойствам?
2. Как происходит намагничивание ферромагнитных материалов под действием переменного магнитного поля?
3. Опишите гистерезисную петлю зависимости  $B(H)$  и укажите характерные точки.
4. Как и почему возникает электрическое поле при изменении магнитного потока?
5. Что характеризует магнитная проницаемость и каковы её величины для различных веществ?
6. Какова связь между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией?