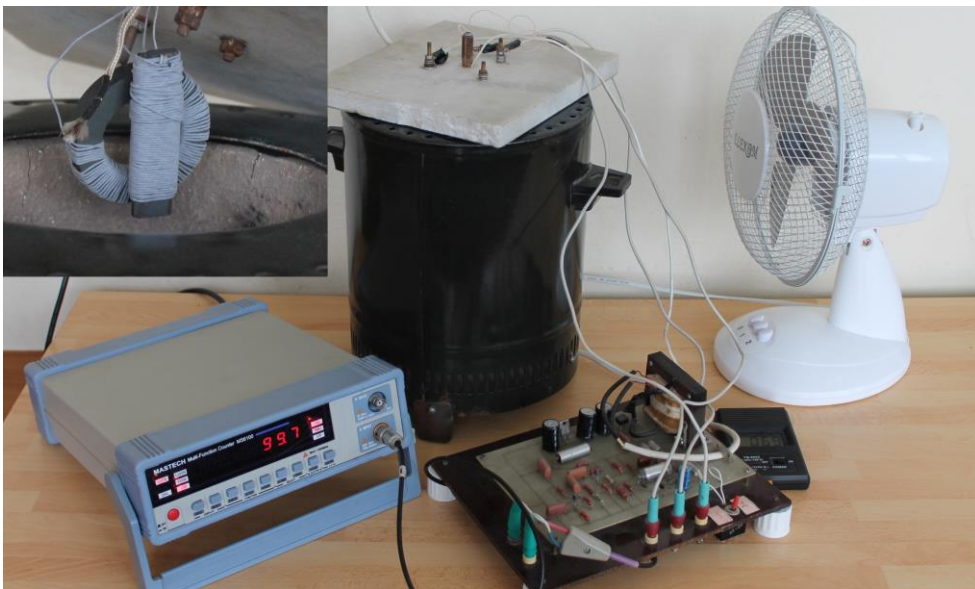
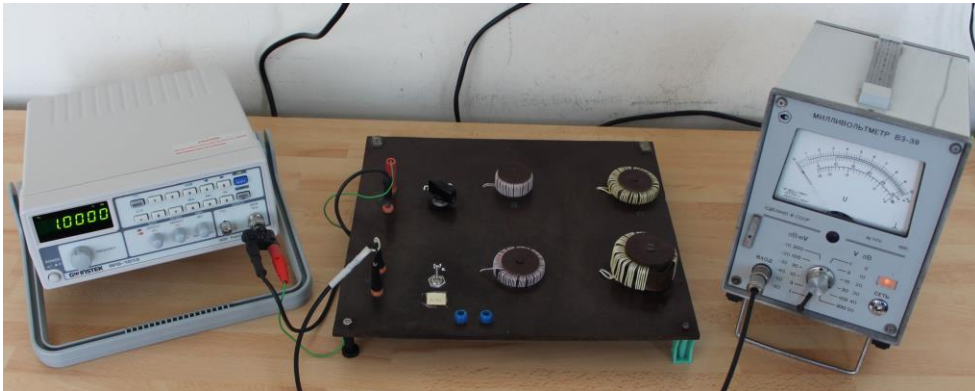
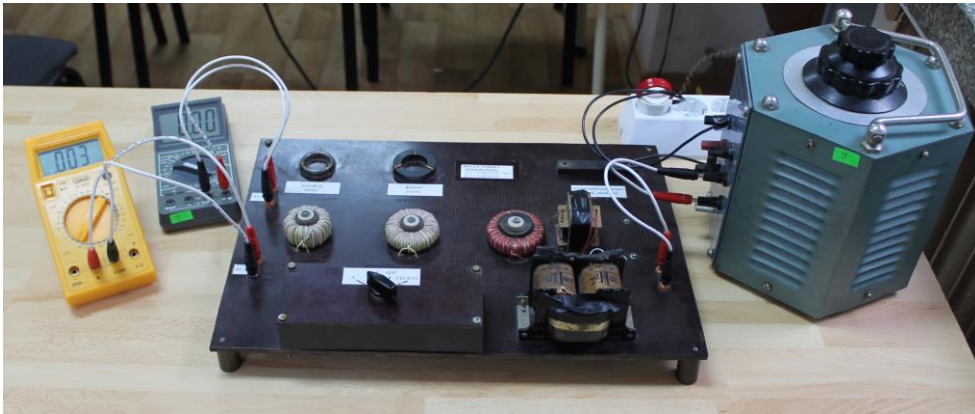


## УПРАЖНЕНИЕ № 5

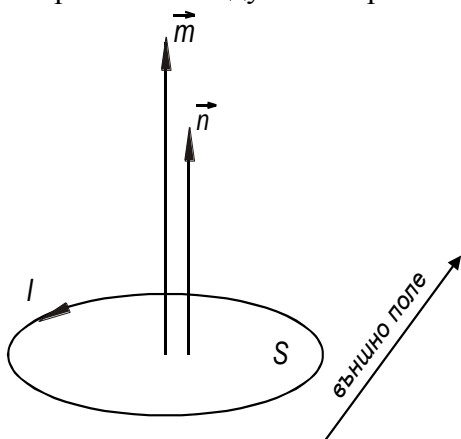
### ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАГНИТНИ МАТЕРИАЛИ



### 5.1. Основни понятия и определения

Известно е, че магнитното поле се поражда от движещи се електрични заряди, а от друга страна движещи се заряди изпитват в магнитно поле действието на сили.

Количествено магнитното поле може да се характеризира чрез действието, което то оказва върху затворен равнинен контур с единичен нормален вектор  $\vec{n}$  към площта му  $S$ . През контура тече ток с големина  $I$  (фиг.5.1). Величината  $\vec{m} = IS\vec{n}$  се нарича *магнитен момент* на контура. Посоката на тока  $I$  и нормалата  $\vec{n}$  са свързани помежду си по правилото на десния винт.



Фиг. 5.1

При внасяне на контура във външно магнитно поле върху него действа въртящ момент  $\vec{M}$  и той се завърта, заемайки положение на устойчиво равновесие, в което посоката на  $\vec{m}$  се приема за посока на магнитното поле.

Въртящият момент  $\vec{M}$  зависи от ъгъла между  $\vec{n}$  и посоката на магнитното поле, като достига максимална стойност  $\vec{M}_{\max}$ , когато този ъгъл е  $\pi/2$ .

Характеристика на магнитното поле е векторната величина *магнитна индукция*  $\vec{B}$ , чиято големина е

$$B = \frac{M_{\max}}{m} = \frac{M_{\max}}{IS}, \quad (5.1)$$

а посоката ѝ съвпада с посоката на полето.

Дименсията за  $B$  е Тесла (Т).

При внасяне на вещество в магнитно поле спиновите и орбитални магнитни моменти на електроните от неговите атоми се ориентират преимуществено по посока на магнитната индукция  $\vec{B}$  - тялото се намагнитва. Това негово състояние се характеризира с величината *намагнитеност*  $\vec{N}_i$ , която е равна на сумарния магнитен момент в единица обем.

Магнитната индукция  $\vec{B}$  във веществото е векторна сума от магнитните индукции на външното магнитно поле  $\vec{B}_o$  и на вътрешното поле  $\vec{B}_{\text{вътр.}}$ , създадено от микротоковете, свързани с движението на електроните:

$$\vec{B} = \vec{B}_o + \vec{B}_{\text{вътр.}}$$

Освен с индукция  $\vec{B}$ , магнитното поле да се характеризира и с величината интензитет  $\vec{H}$ . Дефинира се чрез уравнението

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - H_i \quad (5.2)$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \cdot \frac{H}{m}$  (Хенри на метър) е магнитна константа; дименсията на  $H$  е  $\frac{A}{m}$ .

Намагнитеността  $\vec{H}_i$  е пропорционална на интензитета на полето.

$$\vec{H}_i = \chi_m \cdot H \quad (5.3)$$

където коефициентът на пропорционалност  $\chi_m$  се нарича *магнитна възприемчивост* (безразмерна величина).

При вземане под внимание на уравнение (5.3) от уравнение (5.2) следва:

$$\vec{B} = \mu_0 (\chi_m + 1) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (5.4)$$

Величината  $\chi_m + 1 = \mu_r$  се нарича *относителна магнитна проницаемост*.

Различават се пет вида магнетизъм: *диамагнетизъм*, *парамагнетизъм*, *феромагнетизъм*, *антиферомагнетизъм* и *феримагнетизъм*.

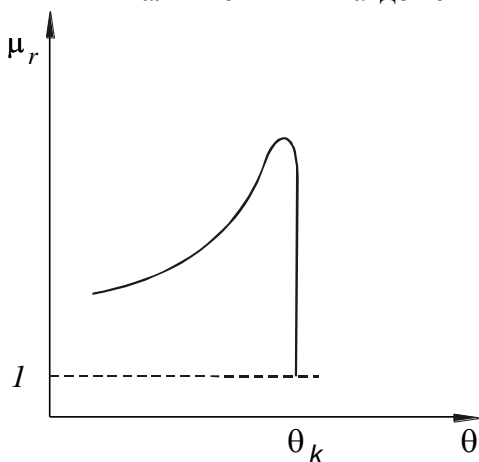
*Диамагнетизъм* е свойството на материалите да се намагнитват противоположно на външното поле. Стойността на тяхната относителна магнитна проницаемост е малко по-малка от 1 ( $\mu_r - 1 \approx -10^{-6}$ ) и в повечето случаи не зависи от температурата.

*Парамагнетизъм* е свойството на веществата да се намагнитват еднопосочно на външното поле. Тяхната относителна магнитна проницаемост е малко по-голяма от 1 ( $\mu_r - 1 \approx 10^{-3} \div 10^{-6}$ ) и съществено зависи от температурата.

*Феромагнетизъм* е свойството на веществата силно да се намагнитват във външно магнитно поле при относително висока температура и частично да съхраняват намагнитеността си при снемане на полето.

Характерни особености на феромагнетиките са:

- относителна магнитна проницаемост  $\mu \gg 1$ ;
- наличие в тях на домени - области на спонтанно намагнитване, в които феромагнетикът е намагнитен без въздействие на външно поле;
- зависимост на магнитното състояние от предшестващата магнитна история;
- наличие на точка на Кюри, т.е. температура, над която веществото губи феромагнитните си свойства и става парамагнетик.



Фиг. 5.2

Изследванията показват, че феромагнетизмът има не орбитален, а спинов произход. Феромагнетици са химични елементи с недостроени вътрешни електронни слоеве, съдържащи електрони, чиито спинове не са взаимно компенсирани.

Към феромагнетичите се отнасят: споменатите вече желязо, кобалт и никел, гадолиний, техни сплави и съединения, а също сплави, състоящи се от две и повече неферомагнитни компоненти (например манган и антимон, манган с алуминий и сребро). При ниски температури феромагнетизъм се наблюдава в редкоземните елементи диспрозий и ербий.

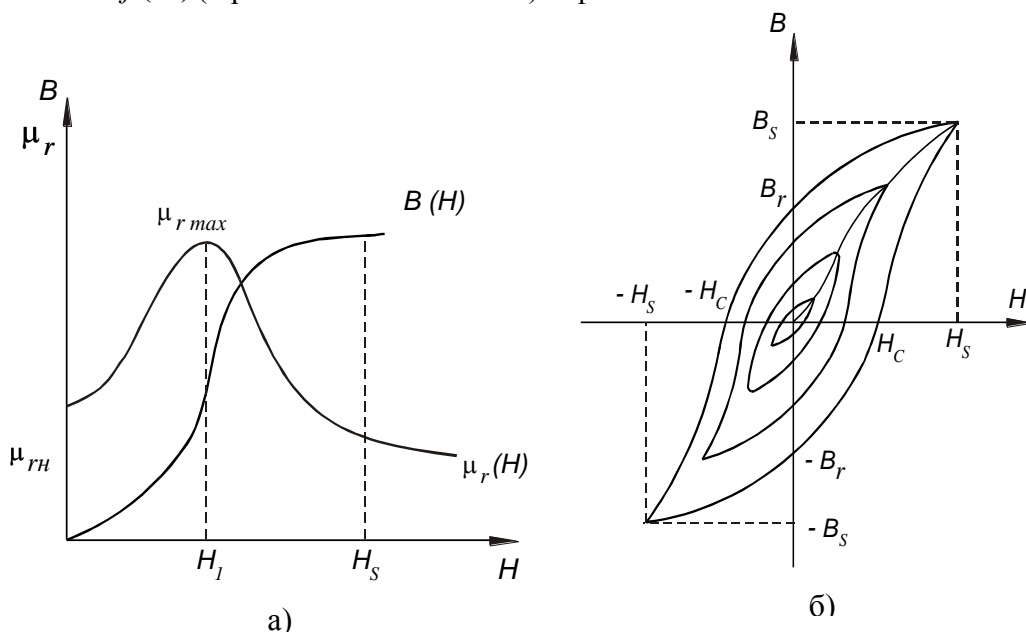
*Антиферомагнетизъмът* за разлика от феромагнетизма се характеризира с антипаралелно разположение на некомпенсирани магнитни моменти на съседните атоми. В антиферомагнетичите домени отсъстват, тъй като магнитните моменти на съседните атоми взаимно се компенсират. В магнитно отношение антиферомагнетичите са подобни на слабите парамагнетици, но се отличават от тях по това, че с повишаване на температурата тяхната относителна магнитна проницаемост расте, достига максимална стойност в точката на Кюри, над която бързо спада.

*Феримагнетизъмът* е некомпенсиран антиферомагнетизъм. Наблюдава се когато насочените антипаралелно некомпенсирани магнитни моменти на съседни атоми (молекули, йони) са с различни големина или когато не е еднакъв броят на противоположно насочените моменти. Феромагнетизъм притежават химични съединения. Съдържат  $Fe_2O_3$  и един или повече оксиди на двувалентни (по-рядко едновалентни) метали.

*Феримагнетичите (феритите)* имат доменна структура и относителната им магнитна проницаемост  $\mu \gg 1$ . Някои ферити се отличават с голямо специфично съпротивление.

Температурата на Кюри за феримагнетичите е значително по-ниска, отколкото за феромагнетичите и е в границите  $100 - 500^{\circ}C$ . Над точката на Кюри феримагнетичите се превръщат в парамагнетици.

Характерна особеност на феро- и феримагнетичите е нелинейността на кривата  $B = f(H)$  (крива на намагнитване) – фиг. 5.3.а.



Фиг. 5.3

Под въздействието на слабо външно магнитно поле във феромагнетика се извършва изместване на доменните граници и нарастване на домовете, чиито магнитни моменти сключват остър ъгъл с посока на полето. При по-нататъшно

увеличаване на  $H$  се осъществява завъртане на домените по посока на полето. При  $H=H_S$  настъпва състояние на насищане и следващото нарастване на  $H$  не предизвиква съществено увеличаване на  $B$ . От кривата на намагнитване и въз основа на уравнение (5.4) се получава зависимостта на магнитната проницаемост  $\mu_r$  от интензитета. Магнитната проницаемост в слаби полета (при  $H \rightarrow 0$ ) се нарича начална -  $\mu_{rH}$ . При увеличаване на  $H$ ,  $\mu_r$  расте, достига максимална стойност  $\mu_{r \max}$  при  $H=H_I$ , след което спада и при  $H \rightarrow \infty$   $\mu_r \rightarrow 1$ .

Ако след намагнитване на образеца до насищане интензитетът на външното поле се намали до 0, индукцията достига до стойност  $B_r$  - *остатъчна индукция* (фиг.5.3.б). За да се намали индукцията до 0 е необходимо да се приложи обратно поле с интензитет  $H_c$  - *коерцитивен интензитет*. Следващото изменение на  $H$  последователно до стойности -  $H_s, 0, +H_c, +H_s$ , води до съответно изменение на  $B$ :  $-B_s, B_r, 0 + B_s$ . Така се получава затворена крива, наречена *хистерезисен цикъл*.

В променливо поле материалът се характеризира с динамична магнитна проницаемост:

$$\mu_{rd} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_m}{H_m}, \quad (5.5)$$

където  $B_m$  и  $H_m$  са амплитудни стойности на индукцията и интензитета.

Линията, свързваща върховете на фамилия хистерезисни цикли, получени при последователно увеличаване на амплитудата на интензитета, се нарича основна крива на намагнитване (фиг.5.3.б).

За металните феромагнетици е характерно намаляване на магнитната проницаемост с увеличаване на честотата. Това се обяснява с размагнитващото действие на вихровите токове, които също създават магнитно поле. Резултантната индукция спада от повърхността навътре в образеца - ефективното му сечение намалява, съответно намалява и магнитната проницаемост.

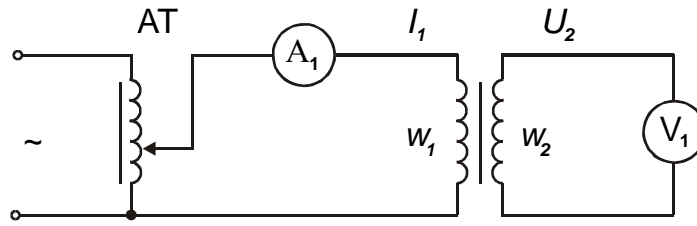
Феритите имат голямо специфично съпротивление, което възпрепятства индуктирането на вихрови токове. Затова в широк честотен диапазон тяхната магнитна проницаемост остава постоянна. Спадът ѝ при честоти над някаква критична стойност се обуславя от инертността на премагнитването, свързана с инертността на доменните граници.

### 5.2. Задачи за изпълнение

1. Снемане на основната крива на намагнитване и изследване на полевата зависимост на магнитната проницаемост:  $B = B(H); \mu_r = \mu_r(H)$
2. Изследване на честотната зависимост на магнитната проницаемост:  $\mu_r = \mu_r(f)$
3. Изследване на температурната зависимост на магнитната проницаемост. Определяне на точката на Кюри.

### 5.3. Методични указания за провеждане на изпитванията

При изпълнение на задача 1 се използва методът на амперметъра и волтметъра. Схемата на опитната постановка е показана на фиг. 5.4.



Фиг. 5.4

С автотрансформатора  $T$  се задава определен ток, който съответства на някакъв интензитет на магнитното поле, изчисляван по уравнение (5.6)

$$H_m = \frac{\sqrt{2}I_1 w_1}{l_{cp}}, \quad (5.6)$$

където  $I_1$  е ефективната стойност на намагнитващия ток,  $w_1$  - брой на навивките на намагнитващата намотка,  $l_{cp}$  - средна дължина на изследвания образец (който е във форма на тороид).

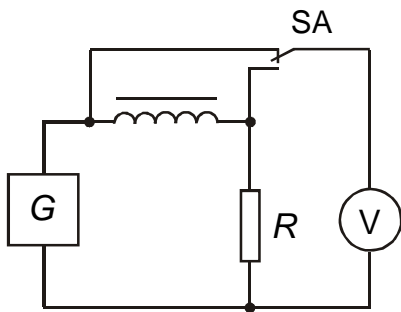
Магнитната индукция се определя от уравнение (5.7):

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f S w_2}, \quad (5.7)$$

където  $U_2$  е напрежението, измерено на изводите на измервателната намотка (ефективна стойност),  $f$ - честота на тока,  $S$ - сечение на образца,  $w_2$ - брой на навивките на измервателната намотка.

Динамичната магнитна проницаемост  $\mu_{rd}$  се изчислява от уравнение (5.5).

Задача 2 се изпълнява чрез опитната постанова, чиято схема е показана на фиг. 5.5.



Фиг. 5.5

Синусоидално напрежение от генератор  $G$  се подава към намотката на изпитвания образец с брой навивки  $w$  и последователно съединен към нея резистор  $R$ . Волтметърът  $V$  в зависимост от положението на превключвателя  $SA$  измерва напрежението  $U_R$  върху резистора  $R$  или входното напрежение  $U_{ex}$ . Изменя се честотата  $f$  при фиксирана стойност на  $U_R$ , респективно  $I = U_R / R$  и

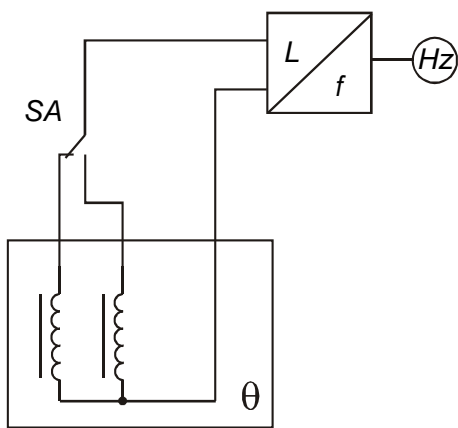
$H_m = \sqrt{2}I \cdot w / l_{cp}$ . Определя се относителната магнитна проницаемост по уравнение (5.8):

$$\mu_{rd} = \frac{R l_{cp}}{2\pi\mu_0 w^2 S} \cdot \frac{\sqrt{U_{ex}^2 - U_R^2}}{f U_R}. \quad (5.8)$$

Данните от измерванията и изчисленията по т.т.1 и 2 от задачите за изпълнение се представят в табличен и графичен вид.

При изпълнение на задача 3 се определя индуктивността на бобини, в които за сърцевина е използван изследваният феромагнитен (или феримагнитен) материал. Образците са поместени в термостат.

Измерването се осъществява чрез преобразувател индуктивност-честота ( $L \rightarrow f$ ) и честотомер (фиг. 5.6).



Фиг. 5.6

Стойността на индуктивността в хенри се изчислява чрез уравнение (5.9) :

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_o}, \quad (5.9)$$

където  $f$  е отчетена честота, в  $Hz$  ;

$C_o$  - капацитет на кондензатора в трептящия кръг на преобразувателя ( $L \rightarrow f$ ) във  $F$ .

Първото измерване се извършва при стайна температура, след което термостатът се загрява съгласно указанията на ръководителя на упражнението и следващите измервания се осъществяват при спадане на температурата

през  $5^\circ$ .

За тороидален образец относителната магнитна проницаемост се определя по уравнението

$$\mu_r = L \frac{2\pi r_{cp}}{\mu_o w^2 S} \quad (5.10)$$

където  $r_{cp}$  е среден радиус на тороида,  $m$  ;

$S$ -напречното му сечение,  $m^2$

За образец с друга форма се определя ефективната относителна магнитна проницаемост от отношението

$$\mu_{ref} = \frac{L}{L_o} \quad (5.11)$$

където  $L_o$  е индуктивност, определена при температура, превишаваща предпологаемата точка на Кюри  $\theta_k$  ( при  $\theta > \theta_k$  честотата  $f$  рязко нараства).

Построяват се графично зависимостите  $\mu_r(\theta)$  за изследваните образци.

Точката на Кюри  $\theta_k$  съответства на стръмно спадащия участък от кривата  $\mu_r(\theta)$

#### 5.4. Тест за самопроверка

1. Каква е връзката между магнитната индукция  $\vec{B}$  и интензитета на магнитното поле  $\vec{H}$ ? ( $\mu_r$  -относителна магнитна проницаемост,  $\mu_o$  -магнитна константа)

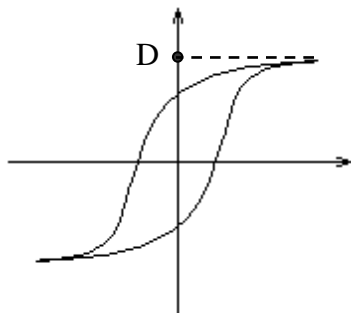
а)  $\vec{B} = \frac{1}{\mu_o \mu_r} \vec{H}$

б)  $\vec{H} = \frac{B}{\mu_o \mu_r}$

в)  $\vec{B} = \frac{\mu_r}{\mu_o} \vec{H}$

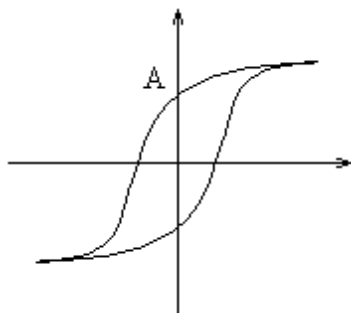
г)  $\vec{H} = \frac{\mu_r}{\mu_o} \vec{B}$

2. На чертежа е показана хистерезисна крива за магнитен материал. Коя величина съответства на точка D?



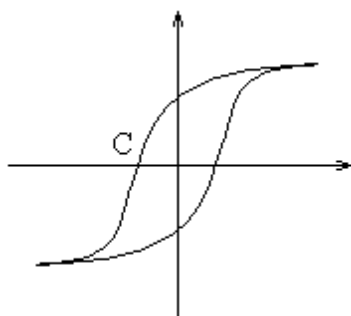
- а) Остатъчна магнитна индукция  $B_r$ .
- б) Коерцитивен интензитет  $H_c$ .
- в) Магнитна индукция на насищане  $B_s$

3. На чертежа е показана хистерезисна крива за магнитен материал. Коя величина съответства на точка A?



- а) Магнитна индукция на насищане  $B_s$ .
- б) Коерцитивен интензитет  $H_c$ .
- в) Начална относителна магнитна проницаемост  $\mu_{rn}$ .
- г) Остатъчна магнитна индукция  $B_r$ .

4. На чертежа е показана хистерезисна крива за магнитен материал. Коя величина съответства на точка C?



- а) Коерцитивен интензитет  $H_c$
- б) Остатъчна магнитна индукция  $B_r$
- в) Начална относителна магнитна проницаемост  $\mu_{rn}$ .
- г) Магнитна индукция на насищане  $B_s$ .

5. Защо с увеличаване на честотата на променливо магнитно поле относителната магнитна проницаемост  $\mu_r$  на магнитните материали намалява?

- а) Поради размагнитващото действие на вихровите токове и поради инертността на доменните граници.
- б) Поради повишени загуби на енергия от хистерезис.
- в) Поради увеличаване на специфичното електрично съпротивление на материалите

6. Какви изисквания се предявяват към магнитномеките материали за високи честоти?

- а) Да имат голяма относителна магнитна проницаемост и голям коерцитивен интензитет.
- б) Да имат голяма специфична електрична проводимост.
- в) Да имат малка относителна магнитна проницаемост и голям коерцитивен интензитет.



- г) Да имат голямо специфично електрично съпротивление.
- 7. Защо феритите могат да се използват при високи честоти?
  - а) Защото имат малко специфично съпротивление.
  - б) Защото имат голямо специфично съпротивление
  - в) Защото специфичното им съпротивление не зависи от честотата на магнитното поле.
- 8. Какво е точка (температура) на Кюри?
  - а) Температура, при която относителната магнитна проницаемост на феро- и феримагнитните материали е минимална.
  - б) Температура, при която феримагнетиците се превръщат във феро-магнетици.
  - в) Температура, над която феро- и феримагнетиците губят магнитните си свойства.