

Při každé poloze cívky měříme výchylky galvanometru vyvolané komutací proudu I v solenoidu.

Literatura

- [1] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983,
čl. 4.1.2.1 , 4.1.6.4 , 5.1.6.1 , 5.2.2.1 , 5.2.2.2
- [2] Sedlák B., Štoll I.: Elektřina a magnetismus, Academia, Praha 1990,
odst. 3.3.5c , st. 4.1

21. STUDIUM HYSTEREZNÍCH SMYČEK FERITŮ

Pracovní úkol

1. U feritových kroužků č. I, II a III
 - a) změřte závislost indukce B_m a koercitivní síly H_c na intenzitě magnetického pole H_m (viz obr.1)
 - b) sledujte základní typy hysterezních smyček (podle obr.1) v závislosti na intenzitě pole H_m a zjistěte přibližně, při které intenzitě pole (nebo v kterém intervalu intenzit polí) jednotlivé typy hysterezních smyček přecházejí jeden na druhý.
2. Okalibrujte aparaturu pomocí střídavého napětí známé velikosti.
3. Výsledky podle bodu 1a) zpracujte tabelárně a graficky.

Ž této úloze se seznámíme s tvary hysterezních smyček moderních magnetických materiálů - feritů. Experimentálně ověříme vzrůst magnetické indukce a koercitivní síly se stoupající intenzitou aplikovaného magnetického pole až do maximálních (nasycených) hodnot. Poznáme také osciloskopickou metodu zobrazení hysterezní smyčky, které se v praxi ve spojení s fotografickou registrací běžně používá.

Ferity [1]

Ferity, s kterými pracujeme, jsou magnetické oxidy chemického vzorce $M^{2+} Fe_2^{3+} O_4$, kde M^{2+} je kov s oxidačním číslem 2 (Mn, Ni, Cu, Zn, Cd aj., popř. dva z těchto kovů v různém vzájemném poměru). Jejich krystalová struktura se odvozuje od plošně centrované kubické mřížky kyslíkových aniontů. V dutinách mezi kyslíkovými anionty jsou různě podle druhu feritu umístěny kationty M^{2+} a Fe^{3+} .

Na rozdíl od kovových feromagnetik existuje ve feritech antiparalelní uspořádání magnetických momentů na kovových kationtech. Proto v některých feritech se jednotlivé atomové magnetické momenty navenek ruší (antiferomagnetické ferity, $M^{2+} = Zn^{2+}$ nebo Cd^{2+}) zatímco v celé řadě jiných feritů

(ferimagnetických) existují oblasti (domény) se spontánním (samovolným) magnetickým momentem. Podobně jako u kovových feromagnetik dochází zde pod vlivem magnetického pole ke změnám v rozložení domén, což se navenek projevuje magnetizační křivkou a hysterezní smyčkou.

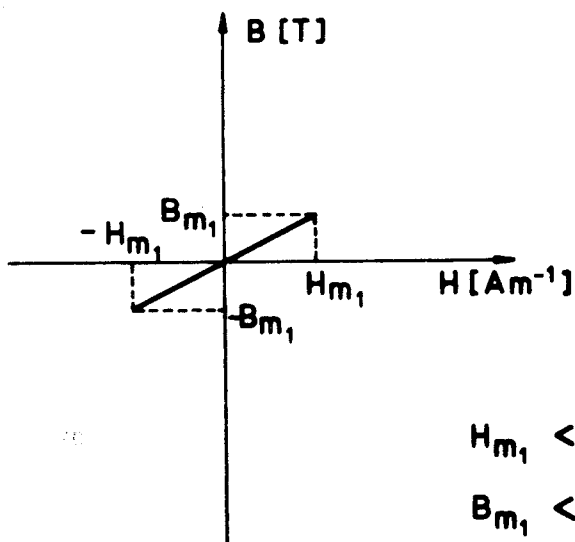
Ferity mají měrný elektrický odpor jednotky až $10^4 \Omega \cdot \text{m}$, kdežto např. železo má měrný elektrický odpor řádově $10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. Ztráty vířivými proudy jsou proto ve feritech nepatrné. To umožňuje jejich použití ve vysokofrekvenční technice. V dané úloze proměňujeme vlastnosti feritů pouze při síťové frekvenci 50 Hz.

Běžně užívané ferity jsou ferity manganatozinečnaté ($M^{2+} = \text{Mn}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$) nebo nikelnatozinečnaté ($M^{2+} = \text{Ni}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$). Kroužky č. I a II patří k prvnímu uvedenému typu. Kroužek č. III je tzv. perminvarový ferit. Vyznačuje se tím, že má ve velkém rozsahu magnetických polí permeabilitu konstantní (perminvar = permeabilita invariantní). Co do složení je to nikelnatý ferit s přidavkem kobaltu ($M^{2+} = \text{Ni}^{2+} + \text{Co}^{2+}$).

Vlastní feritovou hmotu můžeme u kroužků č. I a II vidět mezi závity. Feritové kroužky jsou poměrně křehké keramické materiály, zacházíme s nimi proto opatrně.

Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčkou nazýváme závislost indukce B na magnetickém poli H při cyklickém přemagnetování mezi poli $+H_m$ a $-H_m$. Poli H_m (a $-H_m$) odpovídá určitá v tomto poli dosažená indukce B_m (a $-B_m$).



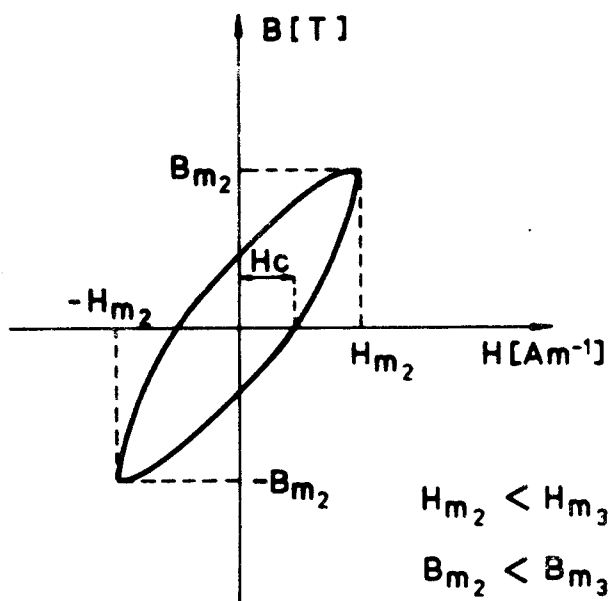
Obr. 1a

ně velkém rozsahu polí lze ho však pozorovat u perminvarových materiálů, kde představuje právě oblast konstantní permeability.

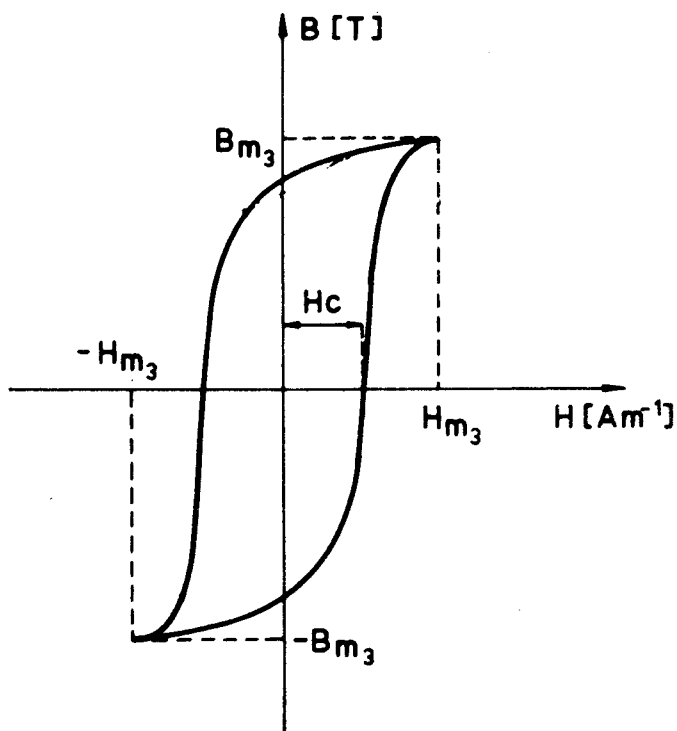
Podle rozvinutí hysterezní smyčky (tj. podle velikosti pole H_m) rozlišujeme tři základní typy hysterezních smyček znázorněné v obr. 1a až 1c.

1a) Hysterezní smyčka se redukuje na úsečku. Plocha smyčky je nulová, neexistující hysterezní ztráty. Tento tvar „smyčky“ se pozoruje, uplatňují-li se pouze vratné změny v doménách (doménové struktury) magnetika. U běžných materiálů nastává tento jev ve velmi slabých polích, takže se obtížně studuje. V poměr-

1b) Hysterezní smyčka sestává ze dvou větví, jež se dají velmi dobře aproximovat parabolickými oblouky. Tento tvar smyčky se nazývá Rayleighův, příslušná oblast polí a indukce je tzv. Rayleighova oblast. V této oblasti se na rozdíl od následujícího případu 1c) nedosahuje magnetického nasycení



Obr. 1b



Obr. 1c

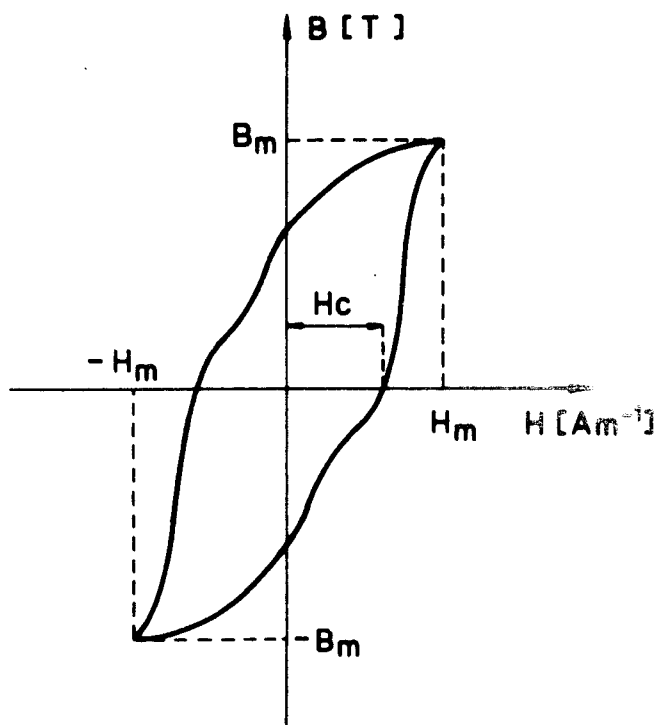
vzorku. Rayleighův tvar hysterezní smyčky je typický v oboru polí, v němž se kromě vratných magnetizačních dějů začínají uplatňovat nevratné magnetizační děje.

1c) Jde o hysterezní smyčku normálního tvaru. Zřetelně se projevuje tendence magnetického nasycování vzorku, tj. pozorujeme prakticky konstantní indukci v nejsilnějších aplikovaných polích. Při tomto tvaru smyčky se plně uplatňují nevratné magnetizační děje.

1d) Je znázorněn zúžený („zaškrcený“) tvar hysterezní smyčky. Vyskytuje se u perminvarových materiálů v Rayleighově oblasti a při přechodu ke smyčce normálního tvaru.

Na obr. 1b) až 1d) jsou zakresleny koercitivní síly H_c . V případě podle obr. 1a) je koercitivní síla nulová.

Vzorky ve tvaru kroužků mají tu výhodu, že se v nich magnetický tok zcela uzavírá a není třeba brát v počet demagnetizační účinek volných konců vzorku. Primární (magnetizační) vinutí je rozloženo pokud možno rovnoměrně po celém obvodu kroužku, aby se do-



Obr. 1d

kde d_1 a d_2 jsou vnější a vnitřní průměr kroužku. Signál úměrný magnetizačnímu proudu přivádíme na horizontální destičky osciloskopu. V sekundárním vinutí (n_2 závitů) se indukuje napětí úměrné časové změně indukce dB/dt . Integrací napětí na sekundárním vinutí získáme signál úměrný indukci B , který přivádíme na vertikální destičky osciloskopu. Na stínítku osciloskopu pak pozorujeme obraz hysterezní smyčky.

Zapojení úlohy a vlastní měření [2]

Při měření hysterezních smyček užíváme zapojení podle obr. 2a. Sekundární vinutí prstenu zapojujeme na integrátor do zdíčky "IN". (Zdíčka "S" je určena pro přívod kompenzačního napětí, knoflíky "R" a "L" slouží ke kompenzaci parazitních signálů při měření na malých vzorcích. V praxi zdíčky "S", knoflíky "R" a "L" nepoužíváme). Vývod ze zdíčky "OUT" zapojujeme na vertikální vstup osciloskopu OPD 605. Užíváme citlivosti 1 na integrátoru, výstup z integrátoru zapojíme na kanál 3 osciloskopu, citlivost kanálu nastavíme 100 a 1,5 mV/cm pro všechny kroužky.

Volič X (dole na osciloskopu) nastavíme na kanál 4, na tento kanál přivádíme výstup z $2,2 \Omega$. Citlivosti tohoto kanálu volíme různě podle kroužku :

- kroužek I : stupňová citlivost 100 a 1,5 mV/cm, spojitá na maximum,
- kroužek II : stupňová citlivost 100 a 2 mV/cm, spojitá na maximum,
- kroužek III : stupňová citlivost 100 a 7 mV/cm, spojitá téměř na maximum.

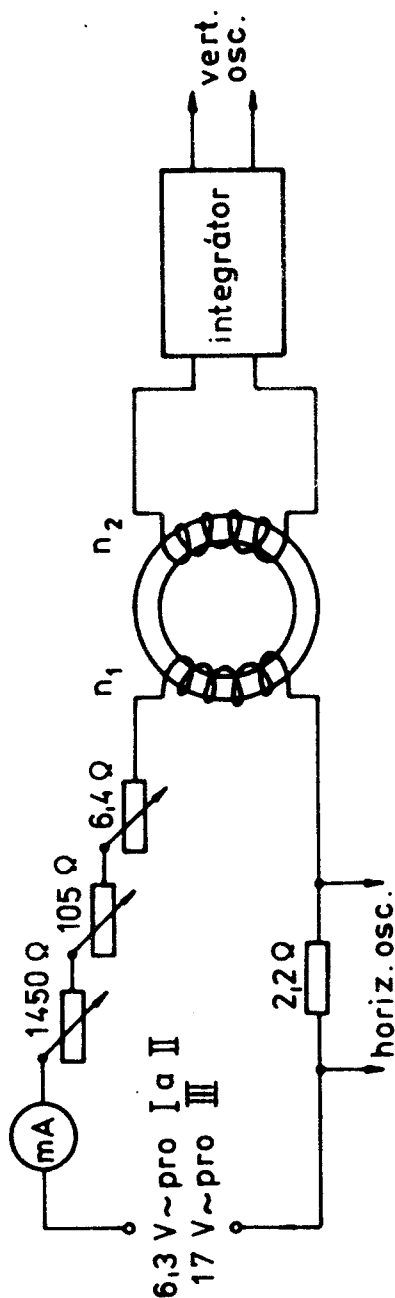
sáhlo co nejhomogennějšího magnetického pole. Indukční tok vzorkem je možno snímat několik málo sekundárnými závity, navinutými na jednom místě obvodu vzorku.

Princip měření [2]

Na primární vinutí kroužku (n_1 závitů) přivedeme střídavý magnetizační proud i . Magnetické pole v kroužku počítáme s vyhovující přesností podle vzorce

$$H = \frac{n_1 i}{\pi d}$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$



Obr. 2a

U stupňových regulátorů citlivosti je vhodné překontrolovat správnost nastavení krajních poloh.

Před vlastním měřením se přesvědčíme, zda se hysterezní smyčka při plném rozvinutí vejde na obrazovku. Potom snížíme magnetizační proud na minimum a při následném postupném zvyšování magnetizačního proudu plníme body 1a, b pracovního úkolu.

Jas stopy na obrazovce volíme podle velikosti obrazu hysterezní smyčky. Konektory v integrátoru a osciloskopu ponecháváme i po skončení úlohy zasunuté. Dbáme, abychom nepřetížili primární vinutí kroužků I a II.

Vhodné rozsahy magnetizačních proudů jsou pro jednotlivé kroužky tyto :

- kroužek I : asi 5 až 150 mA ,
- kroužek II : asi 30 až 250 mA ,
- kroužek III : asi 300 až 1200 mA .

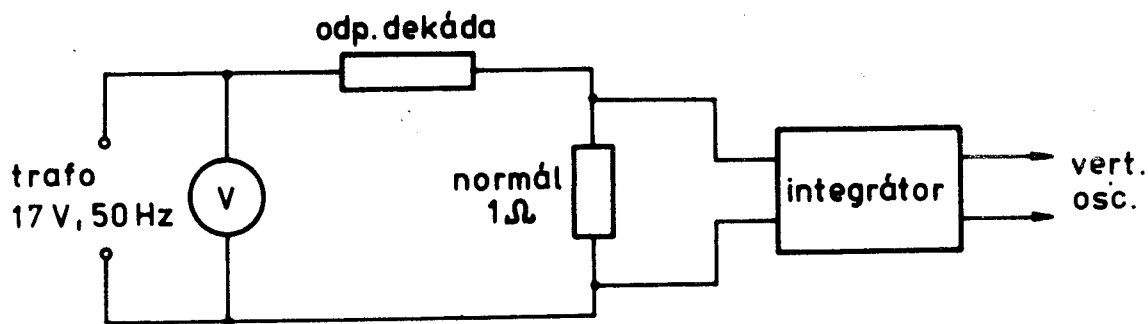
Kalibrace pro horizontální osu

Při maximálním magnetizačním proudu změříme na stínítku horizontální rozměr hysterezní smyčky (od $-H_m$ do $+H_m$). Ze čtení na miliampérmetru, rozměru kroužku a počtu primárních závitů zjistíme, jaká intenzita pole tomuto rozměru smyčky odpovídá. Ostatní intenzity polí jsou pak úměrné délkám (úsečkám) měřeným na horizontální ose. Protože miliampérmetr udává efektivní hodnoty, musíme čtení proudu násobit $\sqrt{2}$.

Uvedený postup je nutný při určování koerzivní síly H_c . Pole H_m můžeme též určovat přímo z magnetizačního proudu.

Kalibrace pro vertikální osu

Sestavíme zapojení podle obr. 2b . Vstup na horizontální destičky osciloskopu vypojíme, popř. vstup na tyto destičky propojíme nakrátko ;



Obr. 2b

nastavení citlivosti na vertikálních destičkách ponecháme stejné jako při měření na krouzcích (nutné !). Z děliče napětí, obr. 2b, přivedeme signál na integrátor (vhodné je nastavení děliče řádově 1 : 1000 , tj. na odporové dekádě řádově $k\Omega$). Na stínítku osciloskopu se objeví svislá úsečka délky y . Měněním odporu dekády nastavíme tuto délku nejvhodněji tak; že je rovna vertikálnímu rozměru některé z proměřovaných hysterezních smyček při maximálním rozvinutí (tj. vertikální vzdálenosti mezi $-B_m$ a $+B_m$). Při kalibraci se varujeme přetížení vstupu integrátoru nepřiměřeným napětím (např. nastavením jednotek Ω na odporové dekádě místo $k\Omega$).

Označme U_{ef} efektivní napětí na odporovém normálu v obr. 2b, které určíme z údaje voltmetru V a odporů v děliči. Na vstupu integrátoru máme pak střídavé napětí $U_{ef} \sqrt{2} \sin \omega t$, na výstupu integrátoru napětí úměrné $(-U_{ef} \sqrt{2} / \omega) \cos \omega t$. Délka úsečky y je úměrná maximálnímu napětí na výstupu integrátoru, tedy

$$y = k \frac{U_{ef} \sqrt{2}}{\omega} , \quad (1)$$

kde hodnota konstanty k závisí na celkové napěťové citlivosti integrátoru a osciloskopu v daném zapojení.

Indukční tok kroužkem při časově proměnné indukci $B(t)$ je $\phi(t) = S n_2 B(t)$, kde S značí průřez kroužku počítaný z vnějšího (d_1) a vnitřního (d_2) průměru kroužku a výšky kroužku v podle vzorce

$$S = \frac{1}{2} (d_1 - d_2) v .$$

Na vstupu integrátoru máme v zapojení podle obr. 2a napětí $U = -d\phi / dt$ a na výstupu integrátoru napětí úměrné $S n_2 B(t)$. V soulase s předchozím výkladem dostáváme pak pro vertikální rozměr y hysterezní smyčky zobrazené na stínítku osciloskopu vzorec

$$y = k S n_2 B_m \quad (2)$$

Porovnáním (1) a (2) vychází

$$B_m = \frac{U_{ef} \sqrt{2}}{\omega S n_2}$$

Tím získáváme jednu číselnou hodnotu indukce. Ostatní hodnoty indukce jsou této hodnotě indukce úměrné podle relativní velikosti obrázku hysterezní smyčky na stínítku osciloskopu.

V této úloze zvláště důsledně dbáme na užívání jednotek soustavy SI, jinak dostáváme magnetickou indukci řádově zcela chybně. Potřebné údaje o kroužcích jsou uvedeny na pracovním stole.

Literatura

- [1] Krupička S.: Fyzika feritů a příbuzných magnetických kysličníků, Academia, Praha 1969
- [2] Brož J. a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983, čl. 5.1.3.2 , 5.1.6.1 , st. 5.3.4

22. MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO PRŮBĚHU MAGNETICKÉ POLARIZACE

Pracovní úkol

1. U vzorku nikelnatozinečnatého feritu změřte v oboru teplot od 100°C do Curieovy teploty při stoupající i klesající teplotě závislost maximální indukce B_m na teplotě.
2. Okalibrujte aparaturu pomocí střídavého napětí známé velikosti.
3. Tabelárně i graficky zpracujte závislost magnetické polarizace vzorku na teplotě a určete Curieovu teplotu vzorku.
4. Podle empirického vzorce pro závislost Curieovy teploty na složení vzorku odvoďte chemický vzorec feritu.

V této úloze se seznámíme s konkrétním průběhem teplotní závislosti magnetické polarizace a poklesem polarizace na nulovou hodnotu při dosažení Curieovy teploty. Poznáme jeden ze způsobů určování Curieovy teploty, která patří k základním charakteristikám magnetického stavu studovaných materiálů (srov. s úlohou 21).

Curieova teplota

Při Curieově teplotě zaniká spontánní magnetický moment látek feromagnetických, ferimagnetických aj. Projevuje se to zejména ztrátou hysterezních vlastností a poklesem magnetické polarizace a susceptibility na velmi nízké, prakticky nulové hodnoty. V současnosti jsou známy látky s Curieovou teplotou od jednotek K až asi do 10^3 K .