

Magnetické merania (1)

- kvalitné magnetické materiály – potreba v každom odbore elektrotechniky a výpočtovej techniky
- kvalitu životného prostredia a spoľahlivosť elektrických zariadení ovplyvňuje elektromagnetické pole v priestore okolo nás
- preto meranie parametrov magnetických polí ako aj parametrov feromagnetických materiálov sú dôležité oblasti merania
- magnetické pole je definované magnetickou indukciou B a intenzitou magnetického poľa H . $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A/m}$ – permeabilita vákua, μ_r – relatívna permeabilita prostredia
- pre nemagnetické materiály je $\mu_r \doteq 1$, určíme jednu z veličín (B alebo H) a druhú vypočítame
- feromagnetické materiály – nelineárne prostredie (neplatí princíp superpozície uplatní sa hystereza feromagnetika)

Magnetické meranie (2)

- meranie B, H – špeciálne senzory (Hallova sonda, magnetorezistor)

- alebo metódy, kde základ je Ampérov zákon $\sum I = \oint_C \bar{H} \cdot d\bar{l}$

a Faradayov indukčný zákon $u_i = \frac{d\phi}{dt}$ (ide vlastne o modifikáciu

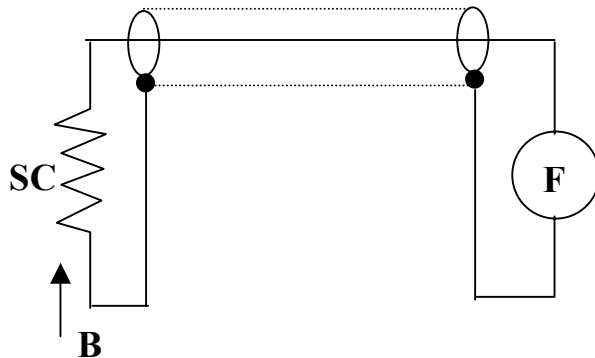
Maxwellových rovníc v integrálnom tvare)

- magnetické merania rozdeľujeme
 - meranie magnetického poľa v nemagnetickom prostredí
 - meranie parametrov feromagnetických materiálov
 - meranie strát vo feromagnetiku pri striedavom premagnetovaní

Meranie magnetického poľa v nemagnetickom prostredí (MMP v NP) – jednosmerné magnetické polia (1)

- meracia cievka a fluxmeter
 - fluxmeter (F) – citlivý magnetoelektrický prístroj, $M_b \gg M_D$ ($M_D \doteq 0$)
 - $\alpha_F \sim \Delta\phi$ (zmena celkového magnetického toku viazaného skúšobnou cievkou)

$$- u_i = \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow u_i \cdot dt = d\phi \Rightarrow \int_{t_1}^{t_2} u_i \cdot dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi = \Delta\phi$$



predpoklad: homogénne magnetické pole v priestore SC

$$\Delta B = \frac{\Delta\phi_C}{S \cdot N} = \frac{1}{S \cdot N} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_i \cdot dt = \frac{k_F \cdot \alpha_F}{S \cdot N}$$

$$\Delta H = \Delta B \cdot \mu_0$$

- B** - zložka vektora magnetickej indukcie kolmá na plochu cievky S , N – počet závitov SC; vzťah platí pre jednovrstvovú cievku
- zmena toku – komutácia prúdu v cievke alebo otočenie cievky o 180°
 \Rightarrow zmena toku 2-násobná

MMP v NP – jednosmerné magnetické polia (2)

- **Hallova sonda (bolo pri výkonoch)**

$$- u_H = k_H \cdot \frac{B \cdot I}{t} \Rightarrow u_H = k \cdot B$$

- rozsah od mT do T, malé rozmery, vhodné aj pre AC magnetické polia

- **nukleárna magnetická rezonancia – najpresnejšia metóda 0,001%**

- využíva nukleárnu magnetickú rezonanciu jadier vodíka

- všetky atómové jadrá majú svoj spin a magnetický moment

- teda sú to elementárne magnety rotujúce okolo svojej osi

- vonkajšie magnetické pole pôsobiacie na ne vyvolá silu

- táto sila spôsobí, že elementárne magnety vykonávajú precesný pohyb

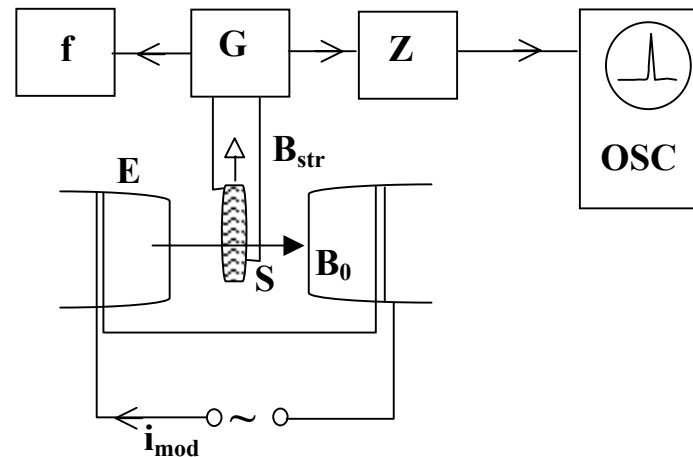
- vonkajšie DC magnetické pole s B_0 vyvolá pohyb s uhlovou frekvenciou

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0 \text{ (\gamma je pre mnoho látok presne definovaná)}$$

Nukleárna magnetická rezonancia (NMR) – pokračovanie (1)

- vložíme látku so známou γ do pomocného striedavého magnetického poľa s $f = \omega_0/2.\pi$ - prejaví sa rezonančný efekt
- tento môžeme využiť na meranie frekvencie precesného pohybu ω_0 a teda aj B_0 (merané DC pole)
- rezonancia keď $f_G = \omega_0/(2.\pi)$ sa prejaví silnou absorpciou energie zo zdroja G použitou látkou
- pre známe γ (gyromagnetický pomer) určíme B_0

NMR – pokračovanie (2)



f – frekventomer, G – vysokofrekvenčný zdroj, Z – zosilňovač, E – elektromagnet s B_0 – neznáma veličina, i_{mod} – prúd cez pomocnú cievku vytvára AC magnetické pole superponované na B_0 , S – skúmavka

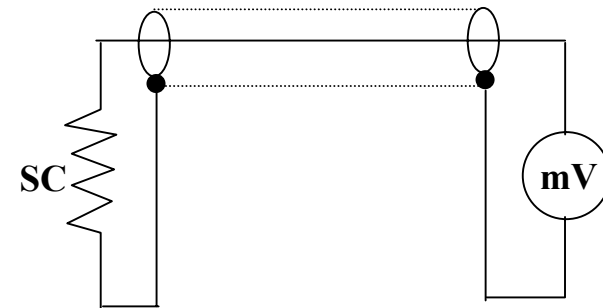
- rezonancia sa navonok prejaví ako zväčšenie odporu cievky \Rightarrow poklesne amplitúda napätia na osciloskope
- pole od i_{mod} periodicky ruší a obnovuje rezonanciu \Rightarrow môžeme ju lepšie rozlíšiť na osciloskope
- použité látky: protóny H do 0,15 T; soľ lithia do 1 T; ťažká voda do 2,5 T

MMP v NP – striedavé magnetické polia (1)

- možno použiť Hallovu sondu (pre nižšie f)
- používa sa aj vzduchová meracia cievka

$$u_{iSC} = \frac{d\phi_{SC}}{dt}$$

$$\phi_{SCmax} = N \cdot S \cdot B_m$$



$B = B_m \cdot \cos \omega t$ - harmonická zmena indukcie

$$u_{iSC} = N \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} = -N \cdot S \cdot \omega \cdot B_m \cdot \sin \omega t$$

$$U_{i,max} = N \cdot S \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m; \text{ efektívna hodnota } U_i = \frac{U_{i,max}}{\sqrt{2}}$$

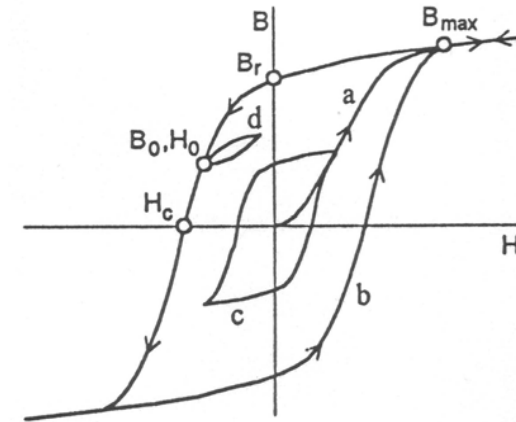
$$U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot S \cdot f \cdot B_m = 4,44 \cdot N \cdot S \cdot f \cdot B_m$$

$$B_m = \frac{U_i}{4,44 \cdot f \cdot N \cdot S}; \quad H_m = \frac{B_m}{\mu_0}$$

$$B_m = \frac{U_{str}}{4 \cdot f \cdot N \cdot S} \quad (k_t = 1,11 \text{ pre harmonický priebeh})$$

Meranie parametrov feromagnetických materiálov (FM)

- vzorka je odmagnetovaná $B = 0; H = 0$
- postupne zvyšujeme H , $B = f(H)$ popisuje krivka prvotnej magnetizácie (a)
- $B = B_{max}$ indukcia nasýtenia, pre $B > B_{max}$ je $B = f(H)$ lineárne so smernicou μ_0
- po dosiahnutí $B = B_{max}$ začneme H znižovať, B klesá pomalšie ako pri krivke prvotnej, magnetizácia $H = 0 \Rightarrow B = B_r$ remanentná indukcia
- ďalší rast H ale opačnej polarity $\rightarrow H = H_C, B = 0$, H_C – koercitívna sila
- ďalší rast $H \Rightarrow$ dosiahneme opäť stav nasýtenia ($-B_{max}$ bod stredove úmerný s $+B_{max}$)
- znižovanie H k nule a nárast do kladných hodnôt \rightarrow opäť dosiahneme $+B_{max} \Rightarrow$ dosiahneme hraničnú (hlavnú) hysteréznú slučku (b)
- ak nedosiahneme $B_{max} \rightarrow$ vznikne normálna hyst. slučka (c)
- inkrementálne hyst. slučky (d)



Meranie parametrov FM na uzavretých vzorkách (1)

- prstencové vzorky – 2 vinutia, meracie N_2 tesne na vzorke a na ňom magnetovacie N_1 vinutie
- vnútorný priemer prstenca d_1 , vonkajší d_2 ; $d_1 < d_2 < 1,2 d_1$; ak to neplatí rozloženie B po prierezu vzorky nie je konštantné \Rightarrow merané B_{str} neodpovedá H_{str} (cez μ) \Rightarrow metodická chyba merania
- určenie H : $\oint_C \bar{H} \cdot d\bar{l} = N_1 \cdot I_{MAG}$
- homogénna vzorka $\Rightarrow \bar{H}$ pozdĺž cesty C v smere $d\bar{l}$ je konštantné

$$\oint_C \bar{H} \cdot d\bar{l} = H \cdot l_s \quad H = \frac{N \cdot I_{MAG}}{l_s} \quad l_s = \pi \cdot d_s \quad d_s = 0,5 \cdot (d_1 + d_2)$$

Meranie parametrov FM na uzavretých vzorkách (2)

- zmena $I_{MAG} \Rightarrow$ zmena magnetického toku $\Phi \Rightarrow$ indukuje sa v meracom vinutí napät'ový impulz (Faradayov indukčný zákon)

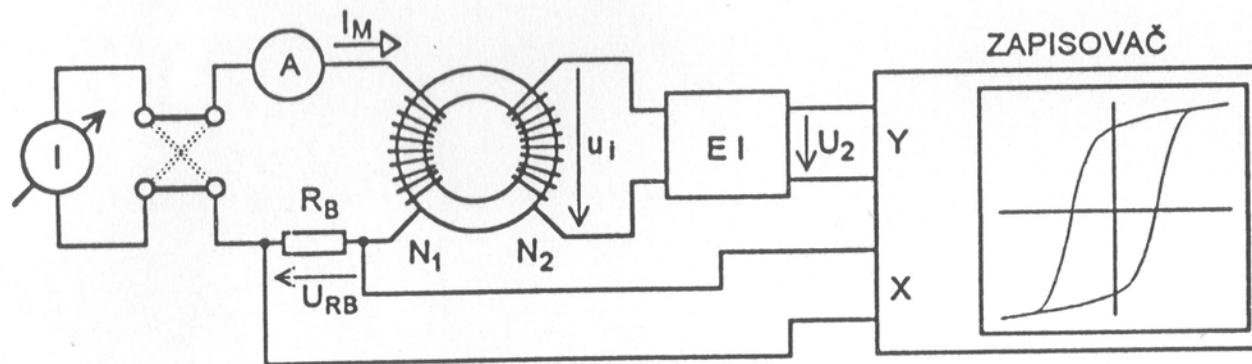
- $$\int_{t_1}^{t_2} u_i \cdot dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} d\phi_C = \Delta\phi_C \quad \Delta B = \frac{\Delta\phi_C}{S \cdot N_2} = \frac{1}{S \cdot N_2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_i \cdot dt;$$

- po použití elektronického integrátora
$$\int_{t_1}^{t_2} u_i \cdot dt = k_{INT} \cdot \Delta U_2$$

$$\Delta B = \frac{k_{INT} \cdot \Delta U_2}{S \cdot N_2} \quad k_{INT} \text{ konštanta integrátora, } \Delta U_2 \text{ výstup integrátora}$$

- magnetovanie vzorky – zdroj prúdu regulovateľný od $-I_{max}$ po $+I_{max}$
- vzorka odmagnetovaná \Rightarrow ak I_{MAG} rastie od 0 po $+I_{max}$ dostaneme krivku prvotnej magnetizácie
- pri zmene I_{MAG} z $+I_{max}$ do $-I_{max}$ a späť dostaneme celú hysteréznú slučku

Meranie parametrov FM na uzavretých vzorkách (3)

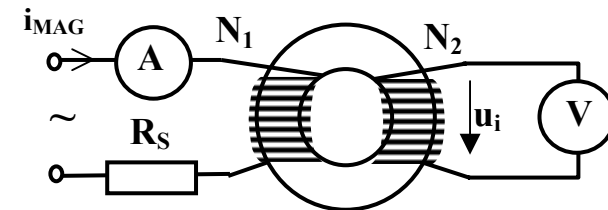


- často hlavne v prípade magneticky tvrdých materiálov nie sú vzorky v tvare prstenca, ale v tvare tyče alebo hranola – otvorené vzorky
- takéto vzorky sa doplnia jarmom z magneticky mäkkého materiálu a pólými nastavcami tak, aby sa vytvoril uzavretý magnetický obvod
- magnetizačné a meracie vinutie – postup merania podobný ako v predošlom

Meranie parametrov FM pri magnetovaní AC prúdom (1)

- určujeme permeabilitu (amplitúdovú, počiatočnú, komplexnú, zdanlivú, vratnú), hysteréznu slučku (HS) a straty pri premagnetovaní
- straty spôsobené vírivými prúdmi sú príčinou, že s rastom frekvencie sa dynamická HS rozširuje a mení tvar (maximum B_{max} nenastáva súčasne s H_{max})
- prevažne prstencové vzorky \Rightarrow H určíme z I_{MAG}
- meranie amplitúdovej permeability

$$\mu_A = \frac{B_{max}}{\mu_0 \cdot H_{max}} \quad R_S \gg \omega L_1 \quad L_1 \text{ indukčnosť}$$



magnetického vinutia, potom I_{MAG} je harmonický (ak AC zdroj je harmonický)

- maximálna hodnota $H_m = \frac{N_1 \cdot I_{MAG,m}}{l_s} = \frac{N_1 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{MAG,ef}}{\pi \cdot d_s}$; maximálna

hodnota $B_m = \frac{U_s}{4 \cdot f \cdot S \cdot N_2}$ (z u_i bolo odvodené v predošlom), f – frekvencia zákl. harmonickej, priebeh B je neharmonický)

Meranie parametrov FM pri magnetovaní AC prúdom (2)

- zložitejšie je meranie amplitúdovej permeability pri harmonickom priebehu B (vyžadujú to normy EU)

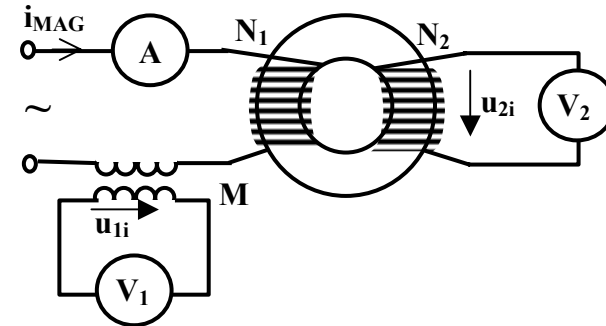
$$R_1 \ll \omega L_1; R_1 = R_{NI} + R_{PRIMÁR,M} + R_A + R_0;$$

R_0 výstupný odpor AC zdroja

I_{MAG} – má neharmonický priebeh \Rightarrow

maximálna hodnota sa nedá počítať

z efektívnej; harmonický priebeh B sa aj tak dosahuje obtiažne



- $I_{MAG,m}$ určíme zo strednej hodnoty U_{IS} – napätia indukovaného na sekundári M

$$U_{IS} = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T/2} u_i \cdot dt = \frac{2 \cdot M}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_1+T/2} \frac{d i_{MAG}}{dt} \cdot dt = \frac{2 \cdot M}{T} \cdot \int_{-I_{MAG,m}}^{+I_{MAG,m}} d i_{MAG} = 4 \cdot f \cdot M \cdot I_{MAG,m}$$

$$H_m = \frac{N_1 \cdot U_{IS}}{4 \cdot f \cdot M \cdot \pi \cdot d_s}; B_m \text{ – ako v predošlom}$$

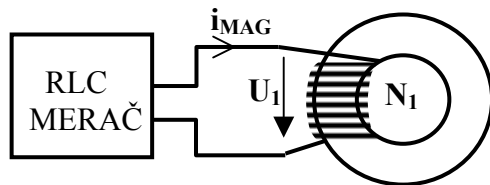
Meranie parametrov FM pri premagnetovaní AC prúdom (3)

- pri magneticky mäkkých materiáloch určujeme μ pre malé hodnoty H
 \Rightarrow počiatočná permeabilita

- pri posudzovaní kvality FM vrátane strát určujeme komplexnú permeabilitu $\dot{\mu}_k = \frac{\dot{B}_1}{\mu_0 \cdot \dot{H}_1}$; \dot{B}_1 a \dot{H}_1 sú fázory základných harmonických zložiek B a H

- μ_k určujeme výpočtom z impedancie cievky $\dot{Z}_x = R_x + j\omega L_x$ zanedbáme rozptylový tok; $\dot{U}_1 = \dot{I}_{MAG_1} \cdot R_{Cu} + j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \dot{\phi}_1$;

$\dot{\phi}_1$ - fázor základnej harmonickej magnetického toku



$$\dot{B}_1 = \frac{\dot{\phi}_1}{N_1 \cdot S} \quad \dot{H}_1 = \frac{N_1 \cdot I_{MAG_1}}{\pi \cdot d_s}$$

$$\dot{\mu}_k = \mu' - j \cdot \mu'' \quad \dot{B}_1 = \dot{\mu}_k \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}_1$$

Meranie parametrov FM pri premagnetovaní AC prúdom (4)

$$\frac{\dot{\phi}_1}{N_1 \cdot S} = \frac{\dot{\mu}_k \cdot \mu_0 \cdot N_1 \cdot I_{MAG1}}{\pi \cdot d_s} = \frac{(\mu' - j \cdot \mu'') \cdot \mu_0 \cdot N_1 \cdot I_{MAG1}}{\pi \cdot d_s}$$

dosadíme do \dot{U}_1 za $\dot{\phi}_1$

$$\dot{U} = \dot{I}_{MAG1} \left[\left(R_{Cu} + \omega \cdot \mu'' \cdot \mu_0 \cdot \frac{S \cdot N_1^2}{\pi \cdot d_s} \right) \right] + j \cdot \omega \cdot \mu' \cdot \mu_0 \cdot \frac{S \cdot N_1^2}{\pi \cdot d_s} = R_x + j \omega L_x$$

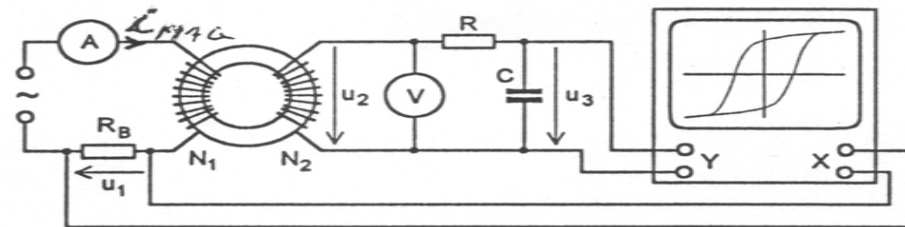
$$\mu'' = (R_x - R_{Cu}) \cdot \frac{\pi \cdot d_s}{\omega \cdot \mu_0 \cdot S \cdot N_1^2} \quad \mu' = L_x \cdot \frac{\pi \cdot d_s}{\mu_0 \cdot S \cdot N_1^2}$$

- μ' - reálna zložka $\dot{\mu}_k$ charakterizuje vytváranie magnetického poľa
- μ'' - imaginárna zložka $\dot{\mu}_k$ charakterizuje straty pri striedavom premagnetovaní FM

$$\mu_{zd} = \sqrt{\mu'^2 + \mu''^2} = |\dot{\mu}_k| \text{ - zdanlivá permeabilita}$$

Meranie parametrov FM pri premagnetovaní AC prúdom (5)

- meranie dynamickej hysteréznej slučky (vzniká pri striedavom premagnetovaní)
- plocha je úmerná stratám, snímame ju osciloskopom
- prstencová vzorka



- $u_1 = R_B \cdot i_{MAG} = R_B \cdot \frac{l_s \cdot H}{N_1} = R_B \cdot \frac{\pi \cdot d_s \cdot H}{N_1} = k_H \cdot H \quad (U_{1max} \approx H_m)$

$$H_m = \frac{U_{1m} \cdot N_1}{\pi \cdot d_s \cdot R_b}$$

- ak $R \gg \frac{1}{\omega C} \Rightarrow i_R \doteq \frac{u_2}{R}; \quad u_3 = \frac{1}{C} \int i_R \cdot dt \doteq \frac{1}{C} \int \frac{u_2}{R} \cdot dt$

$$u_2 = N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt} \Rightarrow u_3 = \frac{N_2 \cdot S}{C \cdot R} \int dB = k_B \cdot B \Rightarrow B_m = \frac{U_{3m} \cdot R \cdot C}{N_2 \cdot S}$$

- osciloskop $B = f(H) \Rightarrow$ plocha HS je úmerná stratám vo FM

Meranie strát vo FM pri striedavom (AC) premagnetovaní (1)

- pri AC premagnetovaní \Rightarrow straty vo FM, t.j. časť energie zo zdroja i_{MAG} sa mení v magnetovanom materiáli na teplo
- tieto straty označujeme ako „straty v železe“ – P_{Fe}
- P_{Fe} sa skladajú zo strát hysteréznych (P_H) a strát vírivými prúdmi (P_V)

$$\Rightarrow P_{Fe} = P_H + P_V$$

$$P_{Fe} = k_H \cdot f \cdot B_m^n \cdot V + \frac{4}{3} (k_t \cdot f \cdot b \cdot B_m)^2 \cdot V \cdot \kappa$$

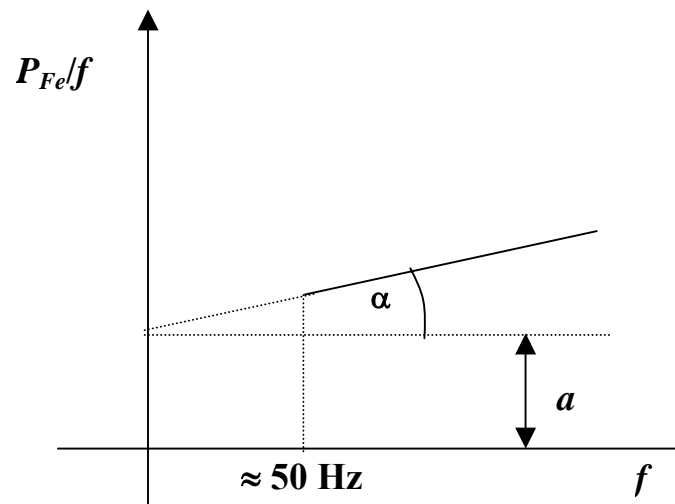
k_H – koeficient hysteréznych strát, f – frekvencia, B_m – max. hodnota indukcie, n – exponent (1,6 až 3,2 podľa druhu FM), b – hrúbka feromagnetickkej dosky (objekt merania), V – objem feromagnetickkej dosky, κ – merná vodivosť FM, k_t – činiteľ tvaru

Meranie strát vo FM pri AC premagnetovaní (2)

- $\frac{P_{Fe}}{f} = a + c_1 \cdot f$ alebo $P_{Fe} = P_H + c_2 \cdot k_t^2$

význam konštánt a , c_1 , c_2 je zrejmý z vyjadrenia P_{Fe}

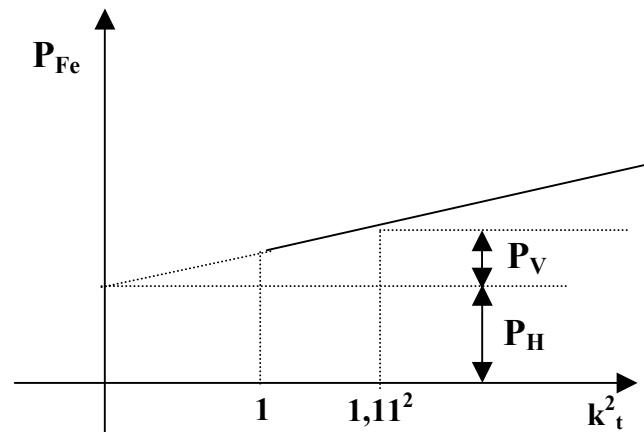
- uvedené vzťahy umožňujú experimentálne rozdeliť P_{Fe} na P_H a P_V ($P_{Fe} = f(k_t^2)$ je lineárna len po $k_t = 1,27$)
- pri delení P_{Fe} podľa frekvencie treba dosiahnuť aby B vo vzorke bola harmonická a $B_{max} = \text{konšt}$ počas merania; potreba generátora AC napätia s premenlivou f



$$a \cdot f = P_H$$
$$\text{tg } \alpha \sim P_V$$

Meranie strát vo FM pri AC premagnetovaní (3)

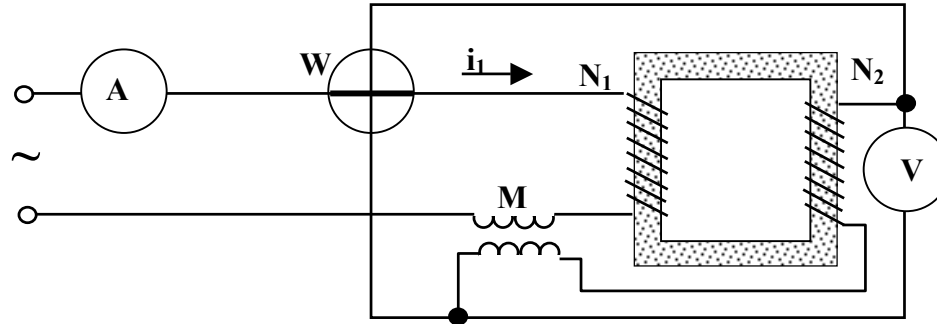
- $P_{Fe} = P_H + c_2 \cdot k_t^2$ – výhoda tohto delenia strát je, že sa nevyžaduje generátor s premenlivou f , netreba harmonický priebeh B , naopak umelo sa deformuje priebeh B
- pre $k_t = 1,11$ sa odčíta P_H a P_V



- metódy na meranie strát: a) pri priemyslových frekvenciách
b) pri akustických frekvenciách
- a) sa používa pri väčších B , na rozmernejších vzorkách
- b) sa používa na malých vzorkách (prstence), pri malých B nemôžeme merať bežnými W -metrami – nepostačuje citlivosť a ani frekvenčný rozsah \Rightarrow nepriame meranie alebo elektronické W -metre

Meranie strát vo FM pri AC premagnetovaní (4)

- pre meranie strát vo FM určených pre výkonové transformátory, indukčné motory a pod. sa používa upravená W-metrická metóda a Epsteinov prístroj (dnes sa používa malý Epsteinov prístroj – MEP)



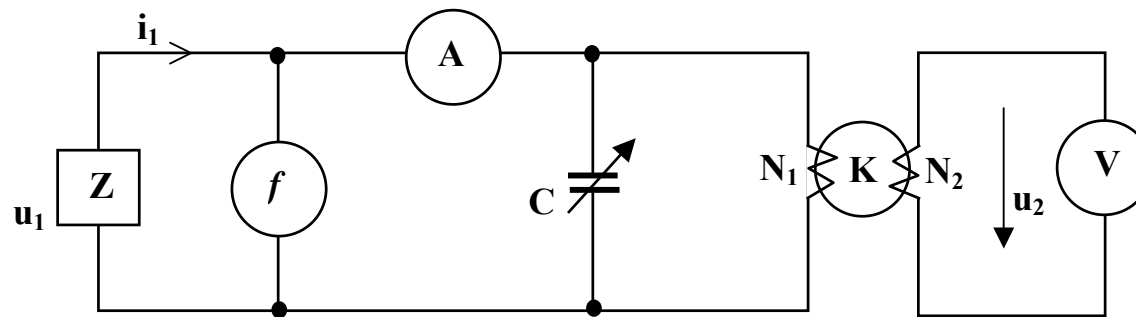
- 4 kostry cievok usporiadané do štvorca, na každej primárne N_1 a sekundárne N_2 vinutie. *MEP* – $N_1 = N_2 = 4 \times 175$ závitov
- pásiky 25 x 3 cm z FM sa vkladajú do cievok, tvoria ich jadrá
- celkové množstvo FM je od 0,5 do 1,5 kg
- materiál úplne nevyplní priestor cievok \Rightarrow chybu kompenzuje vzájomná indukčnosť M

$$P_{Fe} = \frac{N_2}{N_1} \cdot P_W - \frac{U_2^2}{R_{NC}} - \frac{U_2^2}{R_V}$$

- ak nemáme k dispozícii toľko materiálu, použijeme iné metódy – kompenzovaný ferometer (pozri lit.)

Meranie strát vo FM pri AC premagnetovaní (5)

- akustické frekvencie, nepriame metódy
 - rezonančná metóda
 - kalimetrická metóda
 - Owenov mostík
- rezonančná metóda, $f = \text{konšt.}$



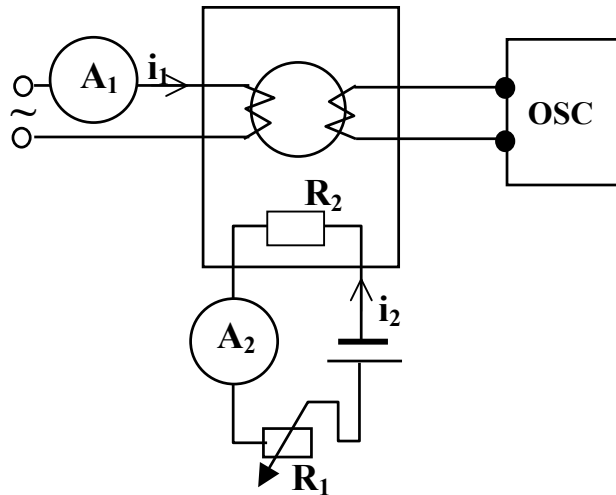
- zmenou C rezonancia obvodu „ C, L_1 “ $\Rightarrow i_1$ je minimálny; $I_m(\dot{Z}) = 0$

- $P = U_1 \cdot I_1$ $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow P_{Fe} = U_2 \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 - P_{Cu}; \quad P_{Cu} = R_1 \cdot I_1^2$

- P_{Cu} straty „v medi“ (straty vytvorené prúdom I na odpore primárneho vinutia R_1)

Meranie strát vo FM pri AC premagnetovaní (6)

- kalorimetrická metóda



konštanta kalorimetra k_k

energia $A_k = k_k \cdot \Delta T_1 = k_k (T_2 - T_1)$

$$A_k = R_2 \cdot I_2^2 \cdot t_1$$

$$k_k = \frac{R_2 \cdot I_2^2 \cdot t_1}{\Delta T_1}$$

t_1 – čas; $T_2, T_1, \Delta T_1$ – teploty

- straty vo vzorke pri AC premagnetovaní (t_2 – čas)

$$A = P \cdot t_2 \Rightarrow P = \frac{k_k \cdot \Delta T_2}{t_2}$$

$$P_{Fe} = P - R_1 \cdot I_1^2 \quad R_1 \cdot I_1^2 - \text{straty „v medi“ primárneho vinutia}$$

- Owenov mostík – striedavý mostík Wheatstonovho typu na určenie parametrov neznámej indukčnosti (cievka primárneho vinutia s jadrom z FM)