

11. Preizkušanje feromagnetnih snovi

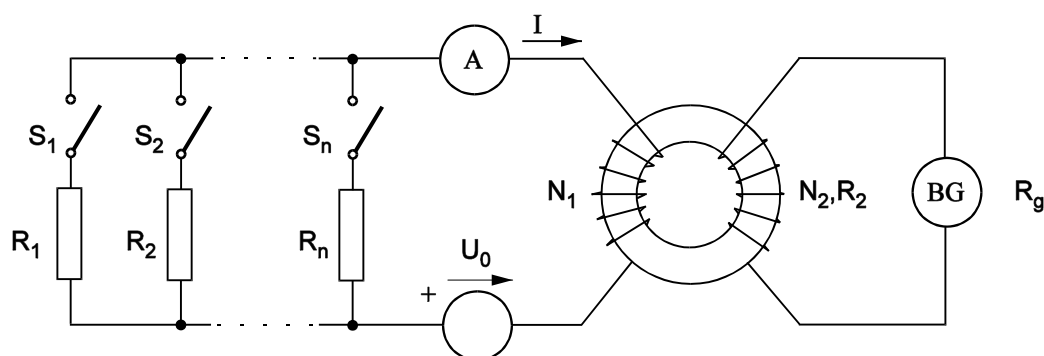
Merilne metode, s katerimi določamo lastnosti feromagnetnih snovi, so zelo pomembne, saj dobimo z njimi osnovne podatke, ki služijo za izračun in konstrukcijo predvsem električnih strojev in drugih naprav. Največkrat se pri teh merjenjih določajo poteki deviških in komutacijskih magnetilnic, statičnih in dinamičnih histereznih zank in izgube v feromagnetnih snoveh pri izmeničnem magnetiziranju. Dosegljive točnosti pri teh merjenjih so bistveno slabše, kot pri merjenju električnih veličin. Zato je več vzrokov, posebno pa izstopata dva:

- tehnološke težave pri izdelavi merilnih naprav in pripomočkov, kjer je nemogoče popolnoma odpraviti vse tehnične pomanjkljivosti in
- lastnosti merjenca, oziroma preizkušane materiala, ki so zelo odvisne od načina obdelave materiala (smer valjanja, rezanje, zvijanje), vplivnih veličin (temperatura, mehanske napetosti), ter malih sprememb v istem proizvodnem postopku.

Zato je težko podati zanesljive merilne rezultate za večjo količino feromagnetnega materiala z meritvijo na omejenem vzorcu. Meja pogreška je pri teh merjenjih v splošnem v območju nekaj odstotkov.

11.1 Snemanje statične magnetilnice

Kadar želimo ugotoviti potek deviške magnetilnice, moramo preizkušani material predhodno razmagnetiti (doseči $B = 0$ in $H = 0$), nato pa sestavimo vezje z enosmernim napajalnim virom in v opisanem primeru balističnim galvanometrom (merilnikom količine elektrine Q) ter nekaj ostalimi elementi (upori, navitji, ampermetrom, stikali) in seveda merjencem. Ta je v tem primeru oblikovan v obroč (toroid), kar je ugodno za potek silnic (mala stresanja), neugodno pa za namestitve navitij.



Slika 11.1: Vezje za snemanje statične magnetilnice z balističnim galvanometrom. Z zaporednim vkapljanjem stikal $S_1 - S_n$ povečujemo tok I z I_1 do I_n in magnetno poljsko jakost H od H_1 do H_n .. V k-ti točki je ta

$$H_k = \frac{I_k N_1}{l_{sr}} \quad (11.1)$$

Srednjo dolžino silnic l_{sr} izračunamo z enačbo

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z + r_n}{2}. \quad (11.2)$$

Če pa je razlika polmerov $(r_z - r_n) > \frac{1}{5}r_z$ pa z enačbo

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z - r_n}{l_n \left(\frac{r_z}{r_n} \right)}. \quad (11.3)$$

Pri vsakokratni spremembi toka se spremeni tudi magnetni pretok, ki v navitju N_2 inducira napetostni impulz $U_i = -N_2 A \frac{dB}{dt}$, katerega posledica je tokovni impulz

$$i = \frac{U_i}{R_2 + R_g} = -\frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \frac{dB}{dt} \quad (11.4)$$

Ploščina tokovnega impulza je količina elektrine Q ,

$$Q = \int i dt \text{ oziroma} \quad (11.5)$$

$$Q = \int_{B_{k-1}}^{B_k} -\frac{N_2 A}{R_2 + R_g} dB = \frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \Delta B_k$$

Ker pa z balističnim galvanometrom to količino elektrine izmerimo, $Q = c_b \alpha$, je

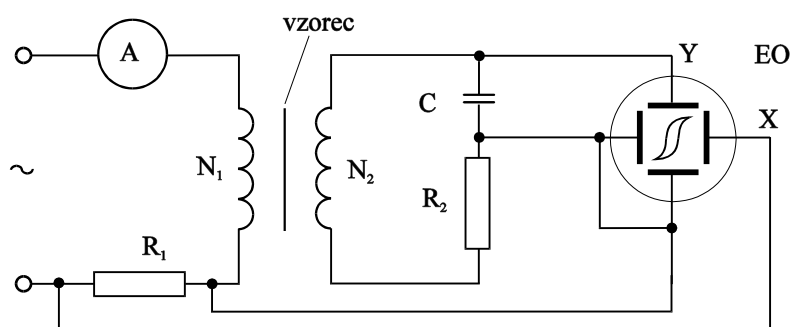
$$c_b \alpha = \frac{N_2 A}{R_2 + R_g} \Delta B_k \text{ in} \quad (11.6)$$

$$\Delta B_k = \frac{c_b \alpha}{N_2 A} (R_2 + R_g) \quad (11.7)$$

Točke za krivuljo dobimo postopoma od prve do n-te točke, vklopljenih uporov ne izklapljam, oziroma meritve ne smemo prekiniti. Če meritev prekinemo, moramo feromagnetni material ponovno razmagnetiti in začeti s prvo merilno točko.

11.2 Snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom

Ta metoda, ki sicer ne zagotavlja visoke točnosti je zaradi svoje enostavnosti uporabljana predvsem za hitra kontrolna merjenja in za pogonska merjenja. Merilno vezje je naslednje



Slika 11.2: Vezje za snemanje dinamične histerezne zanke z osciloskopom

Zaporedno s primarnim (magnetilnim) navitjem z N_1 ovoji je vezan upor R_1 . Na njem nastaja pri izmeničnem napajanju padeč napetosti u_{R1} , ki je proporcionalen magnetilnemu toku i_1 , saj je

$$u_{R1} = i_1 R_1 \quad (11.8)$$

V vzorcu je tedaj magnetna poljska jakost $H = \frac{i_1 N_1}{l}$, pri čemer je l dolžina vzorca.

Horizontalni odklon na osciloskopu je sorazmeren magnetni poljski jakosti in velja

$$u_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H \quad (11.9)$$

Sekundarno navitje (indukcijsko) z N_2 ovoji je zaključeno z zaporedno vezavo kondenzatorja C in ohmskega upora $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$. Zato čez njiju teče tok $i_2 \approx \frac{U_{i2}}{R_2}$.

Inducirana napetost U_{i2} pa je

$$U_{i2} = -N_2 A \frac{dB}{dt}, \text{ tok } i_2 \text{ pa} \quad (11.10)$$

$$i_2 = -\frac{N_2 A}{R_2} \frac{dB}{dt} \quad (11.11)$$

Na kondenzatorju C je napetost, ki jo lahko izrazimo z

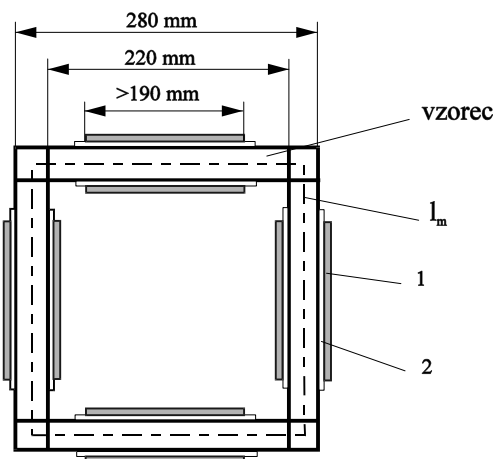
$$u_C = -\frac{N_2 A}{R_2 C} B = k_H B. \quad (11.12)$$

Torej je potek te napetosti proporcionalen magnetni gostoti B in jo vodimo na sistem osciloscopa za vertikalno odklanjanje elektronskega snopa.

Napajalno napetost običajno nastavljamo z regulacijskim transformatorjem. Če jo ustrezno spreminjamo, dobimo večje število histereznih zank. S povezovanjem njihovih vrhov dobimo dinamično komutacijsko magnetilnico.

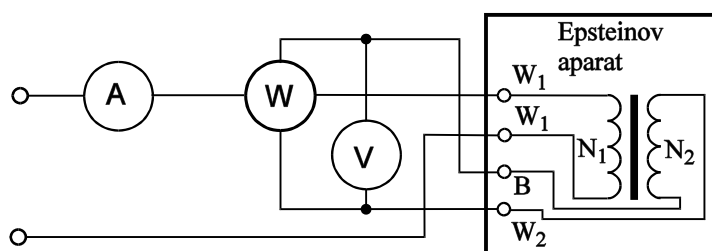
11.3 Merjenje izgub v feromagnetikih z Epsteinovim aparatom

Epsteinov aparat in merjenje izgub z njim je mednarodno standardizirano, posamezne države so to metodo prevzele v svoje nacionalne standarde. Metoda se imenuje tudi vatmetrična, ker je uporabljen za merjenje izgub vatmeter. Mali Epsteinov aparat je podan na naslednji sliki.



Slika 11.3: Konstrukcija malega Epsteinovega aparata

Sestavljen je iz štirih dvojno navitih tuljav, nameščenih v obliki kvadrata. Tuljave 1 so magnetilne, tuljave 2 pa indukcijske, njihova dolžina ne pokriva celotnega vzorca. Vse štiri magnetilne tuljave so vezane zaporedno, prav tako vse štiri indukcijske. Število ovojev je enako in sicer $4 \times 175 = 700$ ovojev. V tuljave vlagamo feromagnetno pločevino v trakovih dolžine 280 mm in širine 30 mm, tako da se v vogalih prekrivajo. Zato pride do dvojnega preseka vzorca v vogalih glede na presek v ostalem delu vzorca. To neenakost korigiramo pri izračunu specifičnih izgub z upoštevanjem tako imenovane reducirane mase. Shema je na sliki 11.4.



Slika 11.4: Vezje za merjenje izgub z Epsteinovim aparatom

Skozi ampermetr in tokovno vejo wattmetra teče tok i_1 , na voltmetru in napetostni veji wattmetra je napetost u_2 . Zato bo wattmeter pokazal

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt \quad (11.13)$$

Napetost u_2 pa je

$$u_2 = U_{i_2} - i_2 R_2, \quad (11.14)$$

pri čemer je R_2 upornost sekundarnega (indukcijskega) navitja. Iz tega sledi

$$u_2 = U_{i_2} - \frac{U_{i_2}}{R_p + R_2} R_2 = U_{i_2} \frac{R_p}{R_2 + R_p} \quad (11.15)$$

$$R_p = \frac{R_{nw} R_v}{R_{nw} + R_v}$$

Ker sta števili ovojev N_1 in N_2 enaki, velja tudi $U_{i_2} = U_{i_1}$ in lahko zapišemo

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} \frac{1}{T} \int_0^T U_{i1} i_1 dt \quad (11.16)$$

Izraz $\frac{1}{T} \int_0^T U_{i1} i_1 dt$ predstavlja celotno moč v vezju, to so izgube v železu P_{Fe} in moč

P_2 na sekundarni strani. Ta je $P_2 = \frac{U_2^2}{R_p^2} (R_p + R_2)$ in sledi

$$P_w = \frac{R_p}{R_2 + R_p} (P_{Fe} + P_2) = \frac{R_p}{R_2 + R_p} (P_{Fe} + \frac{U_2^2}{R_p^2} (R_p + R_2)) \quad \text{in} \quad (11.17)$$

$$P_{Fe} = \frac{R_2 + R_p}{R_p} (P_w - \frac{U_2^2}{R_p}) \quad (11.18)$$

Ker je praviloma $R_2 \ll R_p$ se ta izraz lahko poenostavi v obliko

$$P_{Fe} = P_w - \frac{U_2^2}{R_p} \quad (11.19)$$

Meritve izgub opravimo pri določenih vrednostih magnetnih gostot v vzorcu, običajno pri 1T in 1,5T. Magnetno gostoto določamo izhajajoč iz inducirane napetosti v sekundarnem navitju $U_{i2} = 4k_0 N_2 f AB$, izmerjena napetost pa je

$$U_2 = \frac{4k_0 N_2 f AB_m}{1 + \frac{R_2}{R_p}} \quad (11.20)$$

V enačbi za U_2 mora biti upoštevan čisti presek A feromagnetnega vzorca, ki ga določimo iz mase m , ki jo dobimo s tehtanjem

$$A = \frac{m}{4l\rho} \quad (11.21)$$

Končni merilni rezultat so specifične izgube p_{Fe} . Te dobimo z izrazom

$$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m^*} \quad (11.22)$$

m^* je reducirana masa, ki jo dobimo iz dejanske mase vzorca m , pomnožene z izkustvenim korekcijskim faktorjem $k = 0,94$, torej

$$m^* = km \quad (11.23)$$

Pri merjenju z Epsteinovim aparatom prihaja do nekaterih vplivov, ki znižajo točnost merjenja. Pri točnejših merjenjih zato nekatere teh vplivov korigiramo. Naštejmo nekatere:

1. Sekundarna (indukcijska) navitja zajemajo razen magnetnega pretoka skozi vzorec tudi pretok v zračni reži med vzorcem in navitjem, kar je posebej moteče pri nizkih magnetnih gostotah nasičenja. Potrebna je korekcija izračunane magnetne gostote.

2. Vpliv popačenja inducirane napetosti. Če ni sinusnega magnetnega pretoka, je treba izgube preračunati za sinusno obliko.
3. Vpliv neenakomernega magnetiziranja, ker so navitja tuljav krajša od vzorca. Zato so ogli slabše magnetizirani.
4. Vpliv temperature, ki vpliva na velikost izgub zaradi vrtničnih tokov.
5. Vpliv mehanskih napetosti v vzorcu, ki lahko povečajo izgube tudi do 10%. Zato je treba vzorec ustrezno pripraviti za merjenje.

11.4 Ločevanje izgub v feromagnetikih

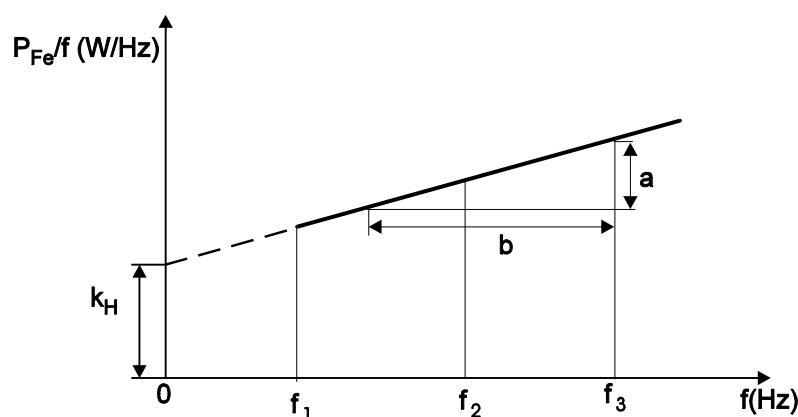
Včasih se srečamo z zahtevo o ločenih podatkih za histerezne izgube in izgube zaradi vrtničnih tokov. V ta namen lahko izkoristimo odvisnost obojih izgub od frekvence. Merjenje izgub izvedemo pri različnih frekvencah, vendar pri isti magnetni gostoti in faktorju oblike. Upoštevamo enačbo

$$P_{Fe} = P_H + P_V = k_H f + k_V f^2 \quad (11.24)$$

Vrednost koeficientov k_H in k_V ugotovimo tako, da zgornjo enačbo izrazimo v obliki

$$\frac{P_{Fe}}{f} = k_H + k_V f \quad (11.25)$$

Razmerje $\frac{P_{Fe}}{f}$ vnesemo v diagram v odvisnosti od frekvence, kar prikazuje slika



Slika 11.5: Grafično ločevanje izgub na P_H in P_V .

Z ekstrapoliranjem na $f = 0 \text{ Hz}$ ugotovimo vrednost koeficienta k_H , koeficient k_V pa dobimo iz naklona premice

$$k_V = \frac{a}{b} \quad (11.26)$$

Pri merjenju z Epsteinovim aparatom izračunamo oboje specifične izgube z izrazoma

$$p_H = \frac{P_H}{m^*} \quad \text{in} \quad p_V = \frac{P_V}{m^*} \quad (11.27)$$

za neko iskano frekvenco in določeno magnetno gostoto.