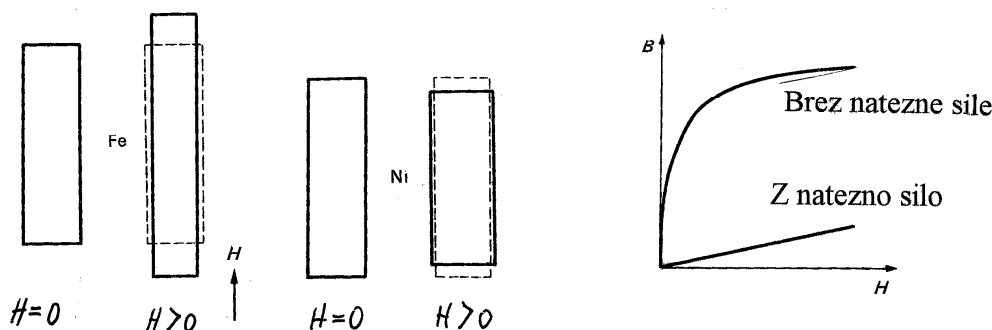


## 5.6 Ostale lastnosti feromagnetnih materialov

Pri izdelavi magnetnih materialov imajo pomembno vlogo tudi nepravilnosti v njihovi strukturi. Če je material izdelan brez nepravilnosti, premikanje Blochovih pregrad pa tudi vrtenje domen ne naletita na ovire, pregrade dobesedno preletijo zrno že ob manjšem vložku energije. Podobno, vendar nekoliko težje, se zavrtijo domene. Histerezna zanka je ozka. Čim več je nepravilnosti, tem več energije rabimo za magnetenje. Posebne razmere imamo pri trdomagnetnih materialih, ko namerno ustvarimo ovire, bodisi z notranjimi napetostmi, bodisi z vključki. Premikanje pregrad želimo čim bolj omejiti. Za namagnetenje rabimo veliko energije, podobno tudi za razmagnetenje. Poseben primer trdega magneta je sestavljen iz kristalnih zrn, ki vsebujejo samo eno domeno. V tem primeru poteka magnetni proces samo z vrtenjem domen, ki je energetsko težje opravilo in če dodamo še ovire, imamo opravka z izjemno težko magnetljivim materialom. Mobilnost pregrad oz. domen zmanjšujejo nepravilnosti v kristalni strukturi, notranje napetosti v materialu, nemagnetni vključki ipd.

Vpliv notranjih napetosti na mobilnost pregrad lahko opazujemo pri magnetostriksijskem pojavu. Pri procesu magnetenja feromagnetnega materiala se spremenijo njegove fizične meje. Če npr. magnetimo palico iz niklja v vzdolžni smeri, se v tej smeri nekoliko skrajša, v prečni smeri pa postane debelejša (Slika 5.32a). Pri niklju se atomi v spontani smeri magnetenja razporedijo gosteje kot v prečni smeri. Če magnetni material v isti smeri mehansko raztegnemo, se razdalje med atomi vzdolž palice nekoliko povečajo, v prečni smeri pa zmanjšajo. Spontana magnetizacija se obrne v smer, kjer so medatomske razdalje manjše. Če pa želimo obrniti smer spontanega magnetenja v vzdolžno smer palice, rabimo veliko močnejše zunanje polje kot pa brez delovanja mehanske natezne sile.

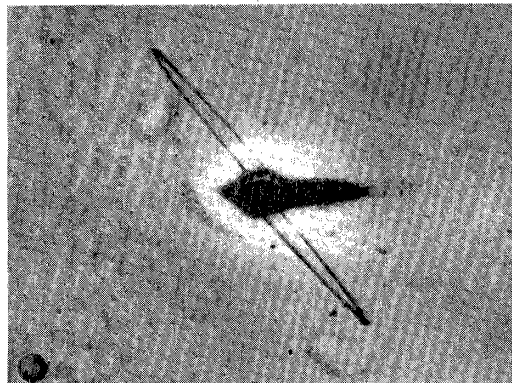


Slika 5.32a Magnetostriksija pri železu in pri niklju

Vidimo, da mehanska sila, ki razteza material (ali tudi zunanji pritisk na material) vzdržuje določeno smer spontanega magnetenja.

Na enak način kot delujejo zunanje mehanske sile na feromagnetni material, pa moramo upoštevati tudi notranje napetosti v materialu, ki obstajajo kljub skrbnemu spremljanju tehnoloških postopkov talenja in žarenja. Te napetosti, ki niso povsod v materialu enake, ovirajo proces spontanega magnetenja.

Poleg mehanskih napetosti igrajo pomembno vlogo tudi nemagnetni delci v snovi (delci oksida, žlindre, praznine ipd. Ker ima pregrada le določeno količino energije na enoto površine, teži, da bi zavzela čim manjšo možno površino. V bližini nepravilnosti bo torej površina pregrade minimalna. Nepravilnost torej privlači pregrado in jo drži trdno na določeni oddaljenosti. Zaradi tega nastane posebna oblika domen. Ena od njih je prikazana na sliki 5.32b. Število in velikost nepravilnosti v veliki meri odloča o mobilnosti domen še posebej takrat, ko po velikosti dosegajo debelino pregrad. Precej manjše ali pa večje nimajo tako velikega vpliva.

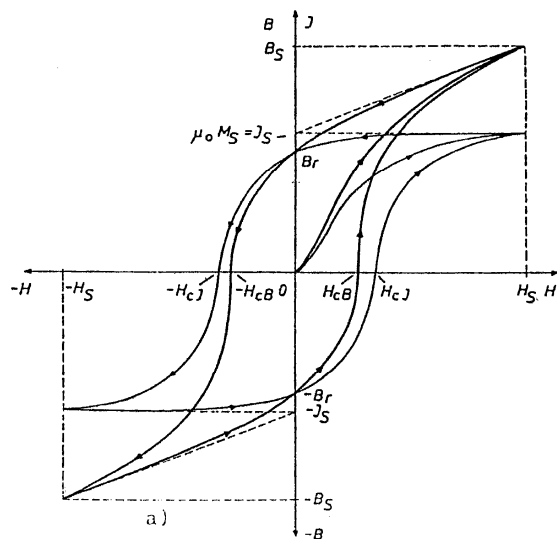


Slika 5.32b Domena ob nepravilnosti v materialu

### 5.6.1 Statična in dinamična histerezna zanka

Oblika histerezne zanke, gostota nasičenja ( $J_s$ ,  $B_s$ ) oziroma pripadajoča poljska jakost ( $H_s$ ), velikost remanenčnega polja ( $J_r$ ,  $B_r$ ), in velikost koercitivne poljske jakosti ( $H_{cJ}$ ,  $B_{cB}$ ) so odvisne od kemične sestave in strukture snovi. Pri tem je polarizacija nasičenja  $J_s$  praktično neodvisna od strukture, vendar odvisna od temperature, saj je pri absolutni ničli največja, pri Curie-jevi temperaturi pa izgine.

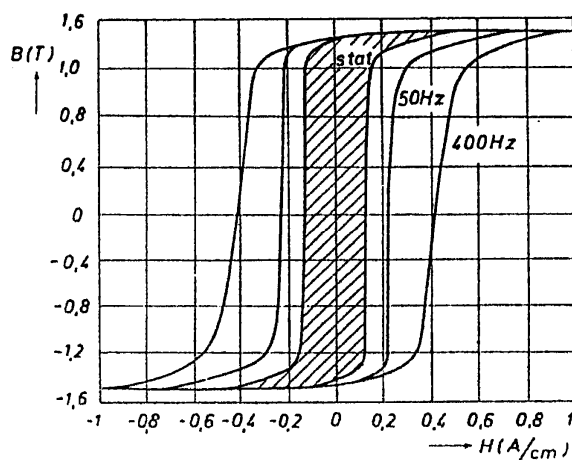
Najobičajneje uporabljamo histerezne zanke, ki grafično opisujejo odvisnost gostote magnetnega pretoka  $B$  od magnetne poljske jakosti  $H$ . Prav tako lahko narišemo histerezno zanko  $J = f(H)$ , torej polarizacijsko histerezno zanko, ki jo dobimo, če namesto  $B$  uporabljamo  $J$ . Obe histerezni zanki z značilnimi točkami sta narisani na sliki 5.33.



Slika 5.33 Karakteristiki  $J = f(H)$  in  $B = f(H)$

Razlikujemo še med statično in dinamično histerežno zanko. Statično histerežno zanko dobimo z meritvijo, pri kateri se enosmerni vrednosti  $B$  in  $H$  med meritvijo spreminjata zelo počasi. Tako dobljene histerezne zanke so vedno simetrične. Delu histerezne zanke od točke 0 do  $J_s$  oz.  $B_s$  na sliki 5.33 pravimo magnetilna krivulja, delu od  $B_r$  do  $H_c$  pa razmagnetilna krivulja. Ta je posebej pomembna pri poznavanju trdomagnetnih materialov.

Dinamične karakteristike dobimo z meritvijo izmeničnih vrednosti. Odvisnosti  $B$  in  $H$  dobimo z relativno hitrimi spremembami ciklusov magnetenja (Slika 5.34). Hitre spremembe magnetne gostote povzročajo vrtnične izgube, katerih učinki so drugačni kot pri statičnih karakteristikah. Dinamične karakteristike so podane običajno za sinusni potek  $B$  in  $H$ .



Slika 5.34 Statična in dinamična histerezna zanka

Vedeti moramo, ali je dinamična karakteristika izmerjena pri sinusnem poteku magnetne poljske jakosti ali pri sinusnem poteku gostote magnetnega pretoka; obe pogosto nista identični. Zato se zatečemo k statičnim metodam določanja posameznih točk. Dinamične karakteristike lahko snemamo ali s srednjimi ali z efektivnimi ali z maksimalnimi vrednostmi, kar mora biti posebej navedeno. Dinamične karakteristike uporabljamo v glavnem za posebne namene; resničnim razmeram se bolj ali manj približajo. Posebno, nesimetrično obliko dobijo dinamične karakteristike, če npr. enosmerno predmagneten material magnetimo še z izmeničnim poljem.

### 5.6.2 Permeabilnost magnetnih materialov

Pri dimenzioniraju navitih magnetnih komponent moramo poznati razmerje med  $B$  in  $H$  na različnih odsekih magnetilne krivulje oz. histerezne zanke. Ker te materiale uporabljamo na različnih področjih od močnostne elektronike do informacijske tehnike, se razlikujejo tudi pristopi pri določanju delovnih pogojev. To pa pomeni, da moramo poznati magnetne veličine pri različnih stopnjah magnetenja. Pri tem je pomemben podatek permeabilnost materiala, ki jo proizvajalci podajajo za različne odseke magnetilne krivulje oz. histerezne zanke. V nadaljevanju si bomo pogledali najpomembnejše definicije permeabilnosti, ki jih uporabljamo pri izračunih mehko- in trdomagnetnih navitih komponent.

#### 5.6.2.1 Absolutna permeabilnost

Absolutna permeabilnost je definirana z izrazom:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (5.41)$$

in nam ponazarja prirastek gostote magnetnega pretoka z jakostjo polja na magnetilni krivulji. V praznem prostoru je  $\mu = \mu_0$ .

#### 5.6.2.2 Relativna permeabilnost

Relativna permeabilnost je število, ki ga dobimo z razmerjem:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (5.42)$$

in je posneta na krivulji. Zapišemo lahko:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (5.43)$$

ali tudi v skladu z enačbo (5.8):

$$\kappa = \mu_r - 1 \quad (5.44)$$

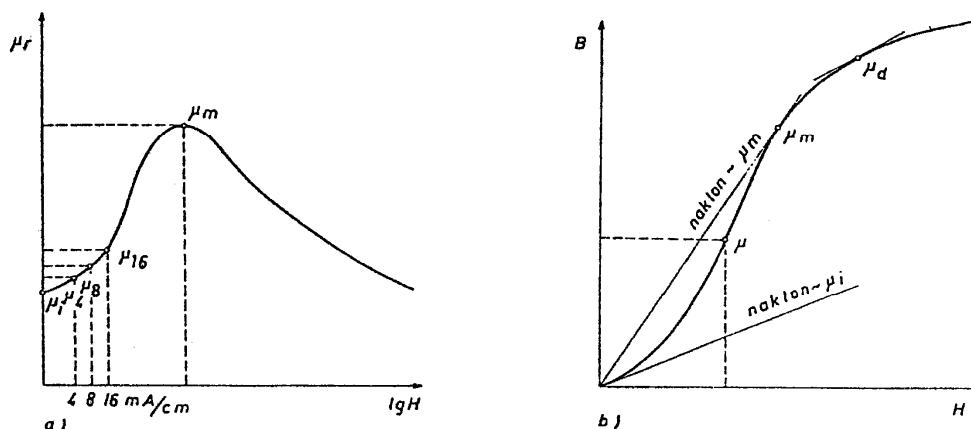
Kadar govorimo o permeabilnosti nekega materiala, mislimo običajno na relativno permeabilnost. Zato indeks  $r$  običajno izpuščamo: to vodi v zmoti, na kar moramo paziti pri uporabi razne literature. Pri feromagnetikih je  $\mu_r$  odvisna od magnetne poljske jakosti. Zato dodamo črki  $\mu$  še indeks, ki označuje velikost magnetne poljske jakosti, npr.  $\mu_{25}$ ,  $\mu_{50}$ ,  $\mu_{100}$ , itd. To so relativne permeabilnosti pri jakostih polja 2500, 5000, 10000 A/m itd. Relativni permeabilnosti rečemo večkrat tudi permeabilnostno število.

### 5.6.2.3 Začetna permeabilnost

Začetne permeabilnosti  $\mu_i$  (ang. Initial Permeability) ne moremo neposredno izmeriti. Dobimo jo z meritvami pri majhnih vrednostih magnetne poljske jakosti z ekstrapolacijo proti nič ( $H \rightarrow 0$ ). Postopek je določen s predpisi. Ekstrapolacija vodi k pravi vrednostim le, če je  $H < 1$  A/m. Definicija za **relativno začetno permeabilnost** se glasi:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (5.45)$$

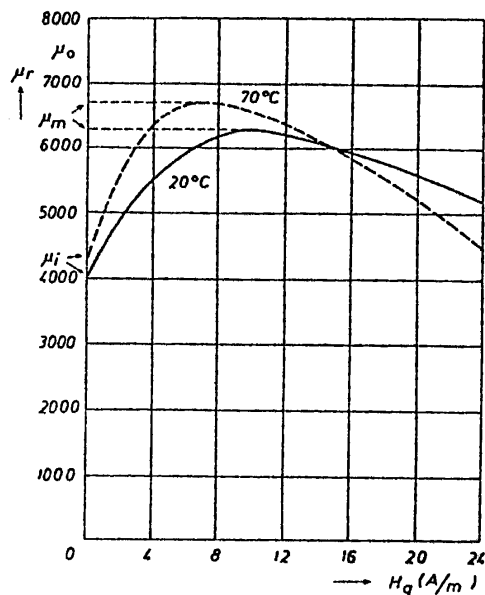
Pri meritvah z izmeničnim poljem moramo za  $B$  in  $H$  vstaviti maksimalne vrednosti. Grafična ponazoritev je prikazana na sliki 5.35. Iz praktičnih razlogov pogosto uporabljamo namesto limitirane začetne permeabilnosti kar  $\mu_i$  kar tisto, ki jo izmerimo pri zelo majhni poljski jakosti, npr.  $\mu_4$ , (kar pomeni pri  $H = 4$  mA/cm). Podobno označimo  $\mu_8$  in  $\mu_{16}$ .



Slika 5.35 Določanje začetne permeabilnosti

#### 5.6.2.4 Maksimalna permeabilnost $\mu_{max}$ ( $\mu_m$ )

$\mu_{max}$  je največja (lahko tudi relativna ali izmenična) izmerjena permeabilnost na magnetilni krivulji (Slika 5.36).



Slika 5.36 Maksimalna permeabilnost

Na sliki 5.36 vidimo dve karakteristiki permeabilnosti Mn-Zn ferita pri temperaturah 20 °C oz. 70 °C. Tako  $\mu_i$  kot tudi  $\mu_{max}$  sta temperaturno odvisni. Maksimum se s povišano temperaturo pomika proti manjšim magnetnim poljskim jakostim, kar kaže na zmanjšanje koercitivne poljske jakosti. Maksimalna permeabilnost je enaka maksimalni amplitudni permeabilnosti.

#### 5.6.2.5 Izmenična (amplitudna) permeabilnost $\mu_{-}$ ( $\mu_{amp}$ , $\mu_a$ )

Ugotavljamo jo na magnetilni krivulji. Pogosto jo imenujemo tudi amplitudna permeabilnost. Pri izmeničnem magnetenju je zaradi nelinearnih odvisnosti le ena od obeh veličin ( $H$  ali  $B$ ) sinusne oblike, medtem ko ima druga nesinusni potek.

Za gostoto magnetnega pretoka sinusne oblike (povsem analogno je za magnetne poljske jakosti sinusne oblike) velja sledeča definicija izmenične permeabilnosti, izvedena iz predpostavljene sinusne gostote magnetnega pretoka:

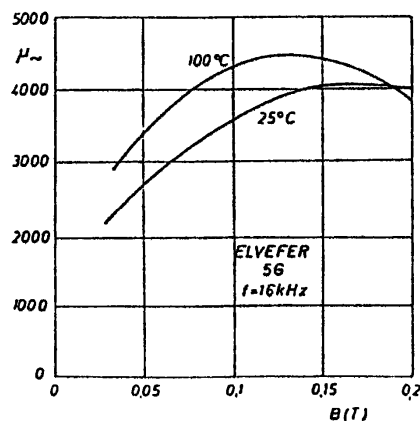
$$\mu_{\approx} = \frac{\hat{B}}{\hat{H}}, \text{ (za absolutne vrednosti)} \quad (5.46)$$

$$\mu_{r\approx} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \quad (\text{za relativne vrednosti}). \quad (5.47)$$

Izmenično permeabilnost je možno podati tudi za efektivne vrednosti:

$$\mu_{\approx} = \frac{B}{H} \quad \text{oziroma} \quad \mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H} \quad (5.48, 5.49)$$

Pri merjenju ne sme biti jedro predmagneteno s statičnim magnetnim poljem. Primer poteka izmenične (amplitudne) karakteristike vidimo na sliki 5.37. Največjo amplitudno permeabilnost označimo tudi kot maksimalno  $\mu_{max} = \mu_{rmax} \cdot \mu_0$ , najmanjšo pa kot začetno permeabilnost  $H \rightarrow 0$ ,  $\mu = \mu_i$ . Uporabljamo jo pri jedrih dušilk in transformatorjev, ki so izkrmiljeni do kolena histerezne zanke.



Slika 5.37 Izmenična permeabilnost Elvefer feritov (Iskra Feriti) v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka in od temperature

#### 5.6.2.6 Prirastna ali inkrementalna permeabilnost $\mu_{\Delta}$

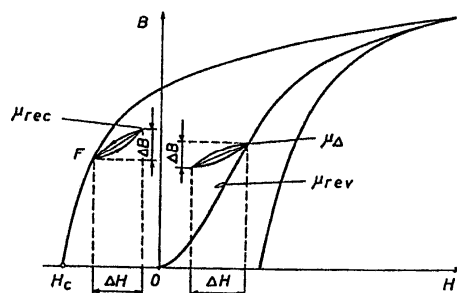
Če tvorimo razmerje med  $\Delta B$  in produktom  $\mu_0$  s spremembo  $\Delta H$  pri konstantnem predmagnetanju in periodičnem spreminjanju magnetne poljske jakosti:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (5.50)$$

dobimo relativno prirastno ali inkrementalno permeabilnost, katere potek meritve je prikazan na sliki 5.38. Meritev lahko izvedemo pri  $\Delta H = \text{konst.}$  ali  $\Delta B = \text{konst.}$

### 5.6.2.7 Reverzibilna permeabilnost $\mu_{rev}$

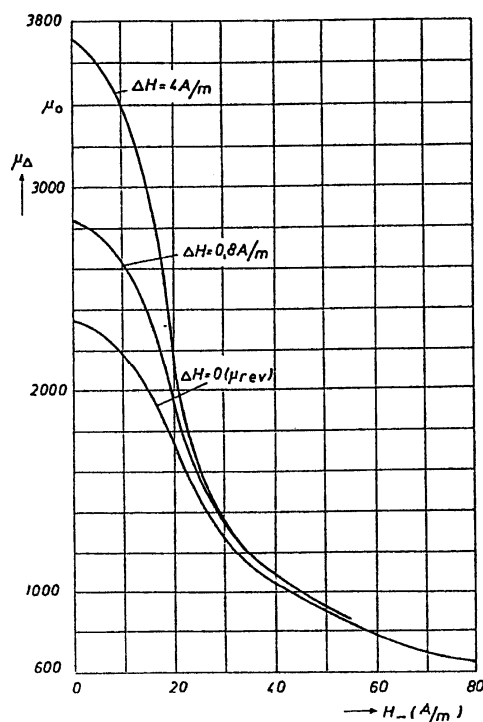
Reverzibilna permeabilnost je primer mejne prirastne permeabilnosti, če gre  $\Delta H \rightarrow 0$ , torej



Slika 5.38 Prirastna, reverzibilna in permanentna permeabilnost

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (5.51)$$

Geometrično določa smer male zanke (Slika 5.38), ki nastane zaradi spremembe  $B$  in  $H$ , če se v statični delovni točki, bodisi na magnetilni krivulji ali histerezni zanki, jakost magnetnega polja malo poveča ali zmanjša. Reverzibilna permeabilnost opisuje obnašanje feromagnetika z enosmernim predmagnetenjem in dodatnim izmeničnim magnetenjem malih amplitud. V nasičenju je  $\mu_{rev} = 1$ .



Slika 5.39 Prirastna permeabilnost v odvisnosti od enosmernega predmagnetenja za litino 55 % Fe in 45 % Ni.

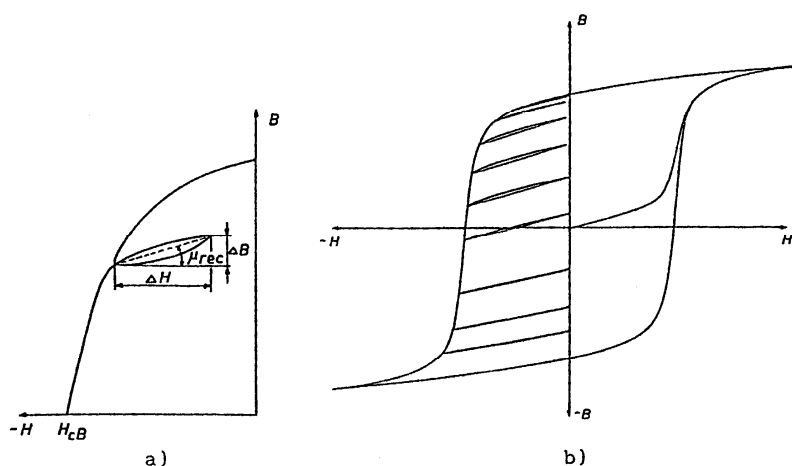


### 5.6.2.8 Permanentna permeabilnost $\mu_{rec}$

Permanentna permeabilnost je poseben primer prirastne (tudi reverzibilne) permeabilnosti, ki je pomembna pri oceni trajnih magnetov. Z  $\mu_{rec}$  označimo srednji nagib  $\Delta B/\Delta H$  na razmagnetilni krivulji trajnega magneta, kjer je:

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (5.52)$$

Permanentna permeabilnost je merilo za odpornost magneta proti motilnim magnetnim poljem. Bliže kot je vrednosti 1, bolj stabilen je magnet. Pri nekaterih magnetih je permanentna permeabilnost odvisna od lege delovne točke pri drugih pa ne (slika 15 a, b).



Slika 5.40 Permanentna permeabilnost: a) razlaga, b) izmerjena permanentna permeabilnost pri Alnico materialu

### 5.6.2.9 Efektivna permeabilnost $\mu_e$

Z efektivno permeabilnostjo označujemo jedra, ki niso iz enotnega materiala, npr. tudi takšnega, ki vsebuje zračno režo. Predstavljajmo si npr. prstanasto jedro, ki ima  $\mu_r \gg 1$  in z dolžino poti silnice skozi jedro  $l_j$ . Če napravimo v tem prstanu zračno režo dolžine  $l_z \ll l_j$ , je približna efektivna permeabilnost takšnega jedra:

$$\mu_e \cong \frac{l_j}{l_z} \cdot \mu_0 \quad (5.53)$$

torej neodvisna od permeabilnosti jedra (linearna zveza med  $B$  in  $H$ ). To radi uporabljamo v telekomunikacijski tehniki. Če je jedro izdelano iz več materialov različnih kvalitiet, enačbe 5.53 ne moremo uporabiti, razen če je pri vseh materialih  $\mu_r \gg 1$ . Efektivna permeabilnost ni

konstanta materiala, ampak konstanta jedra, ker je zelo odvisna od njegove oblike in od dimenzij.

### 5.6.2.10 Navidezna permeabilnost $\mu_{app}$

Navidezna permeabilnost je posebna vrsta efektivne permeabilnosti. Uporabljamo jo le pri magnetno odprtih jedrih (feritne palčke, cevke, antene itd.) in pomeni razmerje med induktivnostjo tuljave z jedrom  $L_j$  in brez jedra  $L_0$ :

$$\mu_{app} = \frac{L_j}{L_0} \quad (5.54)$$

Navidezna permeabilnost ni konstanta materiala, ampak konstanta jedra, zato jo lahko uporabimo le za primerjanje enakih jedr med seboj. Poleg začetne permeabilnosti materiala, iz katerega je jedro izdelano, je permeabilnost zelo odvisna tudi od dimenzij jedra in od tuljave ter od lege jedra v tuljavi. Le pri prstanastih jedrih je navidezna permeabilnost enaka efektivni.

### 5.6.2.11 Kompleksna permeabilnost

V mnogih primerih lahko opisujemo lastnosti sklenjenih mehkomagnetnih jedr s pomočjo relativne kompleksne permeabilnosti  $\underline{\mu}_r$ .

Vzemimo tuljavo in jo postavim v zrak. Takšna tuljava je brez izgub, z induktivnostjo  $L_0$ . Če vstavimo v to tuljavo mehkomagnetno jedro, se poveča induktivnost te tuljave za velikost relativne permeabilnosti jedra  $\mu_r$ , torej je nova induktivnost  $\mu_r L_0$ . V jedru se pojavijo izgube, ki jih v zraku ni bilo. Takšno realno tuljavo si lahko predstavljamo v nadomestni vezavi, kjer sta neka idealna induktivnost  $L_s$  in upornost, ki predstavlja izgube jedra  $R_{js}$ , vezana v serijo ali pa sta  $L_p$  in  $R_{jp}$  vezana paralelno (indeksa  $s$  in  $p$  pomenita serijsko oziroma paralelno vezavo obeh elementov nadomestnega vezja). Impedanco tuljave v serijski vezavi lahko zapišemo:

$$\underline{Z} = R_{js} + j\omega L_s = j\omega \underline{\mu}_{rs} \cdot L_0 \quad (5.55)$$

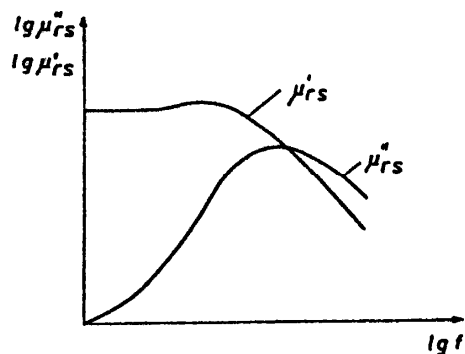
Od tod izhaja:

$$\underline{\mu}_{rs} = \frac{L_s}{L_0} - j \frac{R_{js}}{\omega L_0} = \mu_{Ls} - j\mu_{rs} \quad (5.56)$$

ali kot običajno pišemo:

$$\underline{\mu}_{rs} = \mu'_{rs} - j \cdot \mu''_{rs} \quad (5.57)$$

kjer je  $\mu_{L_s} = \mu'_{rs}$  realna induktivna relativna permeabilnost, ki je dejansko enaka do sedaj obravnavani relativni permeabilnosti  $\mu_r$ .  $\mu_{R_s} = \mu''_{rs}$  je uporovna permeabilnost, ki vsebuje izgube. Vrednosti  $\mu'_{rs}$  in  $\mu''_{rs}$  sta od frekvence in od jakosti polja odvisni vrednosti, kot vidimo iz principialnega prikaza za feritno jedro na sliki 5.41.



Slika 5.41 Kompleksna permeabilnost feritnega jedra

Tudi efektivno permeabilnost  $\underline{\mu}_e$  lahko zapišemo v kompleksni obliki:

$$\underline{\mu}_e = \mu'_{es} - j \cdot \mu''_{es} \quad (5.58)$$

in jo izrazimo s pomočjo  $\mu'_{rs}$  in  $\mu''_{rs}$ . Če upoštevamo nadomestno vezavo induktivnosti in upornosti zaradi izgub v paralelni vezavi, velja:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R_{jp}} + \frac{1}{j\omega L_p} = \frac{1}{j\omega \underline{\mu}_p \cdot L_0} \quad (5.59)$$

in iz tega:

$$\frac{1}{\underline{\mu}_{rp}} = \frac{L_0}{L_p} + j \frac{\omega L_0}{\omega R_{jp}} = \frac{1}{\mu_{Lp}} + \frac{1}{\mu_{Rp}} \quad (5.60)$$

ali

$$\frac{1}{\underline{\mu}_{rp}} = \frac{1}{\mu'_{rp}} + \frac{1}{j\mu''_{rp}} \quad (5.61)$$

Realni permeabilnosti  $\mu'_p$  iz te enačbe in  $\mu'_s$  iz enačbe 5.55 nista enaki.

Uvedba kompleksne permeabilnosti je pogosto smiselna, saj nam omogoča opisovanje magnetnih lastnosti nekega materiala v odvisnosti od frekvence in magnetne poljske jakosti v obliki snopa karakteristik.

5.6.2.12 Diferencialna permeabilnost

V določeni točki lahko izračunamo:

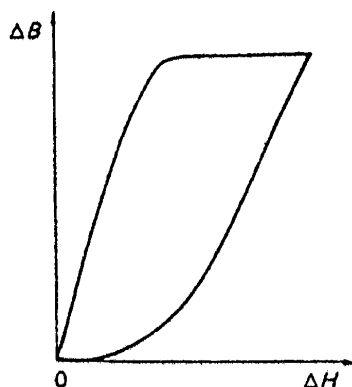
$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (5.62)$$

Geometrično predstavlja  $\mu_d$  smer tangente v določeni točki na krivulji (Slika 5.35). Predstavimo jo lahko kot tangento v opazovani točki  $B - H$  krivulje.

5.6.2.13 Impulzna permeabilnost  $\mu_p$ 

Za razliko od izmeničnega magnetenja je pri impulznem magnetenju material magneten samo v eni smeri, in sicer od  $B_r$  do  $B_s$  in nazaj (unipolarni efekt). Temu primerno različna je tudi histerezna zanka (Slika 5.42). Namesto poljske jakosti  $H$  vstavimo spremembo magnetnega polja  $\Delta H$  zaradi impulza in namesto magnetne gostote  $B$  vstavimo spremembo  $\Delta B$ . Iz teh dveh vrednosti izračunamo impulzno permeabilnost:

$$\mu_p = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (5.63)$$



Slika 5.42 Histerezna zanka pri impulznem magnetenju

**5.7 Magnetne izgube**

Izgube, ki nastanejo v magnetnem jedru, ki ga magnetimo, ne opazujemo enotno. Na področju elektronike imajo izgube drugačne posledice, (npr. na vernost prenosa neke informacije) kot npr. na področju energetskih naprav, kjer opazujemo izkoristek in škodljivost segrevanja. Kadar magnetimo v področju zelo šibkih polj, torej v področju začetnih permeabilnosti, se odvijajo magnetilni pojavi drugače kot pri močnih poljih, kjer nas začetek magnetilne krivulje

sploh ne zanima. Zato lahko ocenimo nek magnetni material šele, ko poznamo njegove lastnosti na področju uporabe.

### 5.7.1 Izgubna upornost in ločitev izgub

Pri magnetenju jedr v šibkih poljih opazujemo izgube s pomočjo upornosti. Zamislimo si, da magnetimo neko tuljavo z magnetnim jedrom s šibkim poljem pri različnih frekvencah in pri tem merimo upornost tuljave. Ugotovimo, da imamo pri  $f = 0$  le ohmsko upornost vodnika, iz katerega je tuljava navita. Če frekvenco zvišujemo, se povečuje upornost zaradi izmenične komponente; razliko med skupno upornostjo in enosmerno upornostjo imenujemo izmenična upornost jedra in je:

$$R_j = R_c - R_- \quad (5.64)$$

Nadaljnje opazovanje odvisnosti  $R_j = R_j(f)$  nam pokaže, da je le-ta približno kvadratična. Če torej tvorimo kvocient  $R_j/f$  (ali  $R_j/fL$  ali  $R_j/f \cdot I_m$ ) dobimo v diagramu  $R_j/f-f$  linearno odvisnost. Za različne magnetne poljske jakosti nastane snop paralelnih premic (Slika 5.43). Če ekstrapoliramo krivuljo za  $H = 0$  vidimo, da ta ne gre skozi koordinatno izhodišče, ampak dobi neko pozitivno vrednost. Če tvorimo paralelno z absciso črto, lahko ugotovimo, da se izmenična upornost deli na tri dele:

$$R_j = R_v + R_h + R_n \quad (5.65)$$

Od teh je

$$R_v = v \cdot L \cdot f^2. \quad (5.66)$$

$R_v$  je izgubna upornost zaradi vrtilnih tokov. Ta je odvisna od koeficienta vrtilnih izgub  $v$ , od induktivnosti  $L$  in od kvadrata frekvence  $f$ .

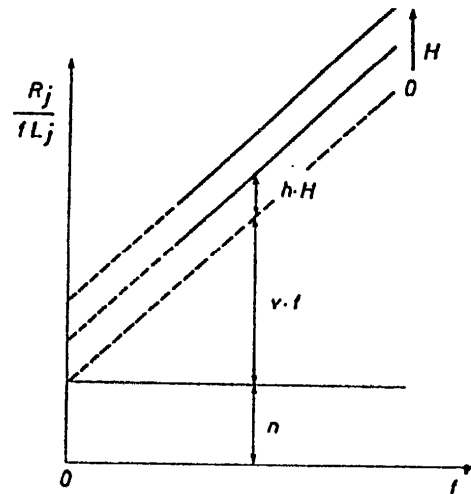
$$R_h = h \cdot L \cdot f \cdot H. \quad (5.67)$$

$R_h$  je izgubna upornost zaradi histereznih izgub. Odvisna je od koeficienta histereznih izgub  $h$ , od induktivnosti  $L$  in od efektivne vrednosti magnetne poljske jakosti  $H$ .

$$R_n = n \cdot L \cdot f. \quad (5.68)$$

$R_n$  je upornost posledičnih (ali tudi relaksacijskih) izgub. Ta upornost je odvisna od faktorja posledičnih izgub  $n$ , od induktivnosti  $L$  in od frekvence  $f$ . Nastanek teh izgub še ni povsem pojasnjen. Povezane so s časovnim zaostankom magnetne gostote (after - effect) pri spreminjajočih se magnetnih poljskih jakostih, z relaksacijami v kristalni mreži magnetnega materiala (difuzijski procesi), z resonančnimi pojavi, s termično pogojenim vrtilnim procesom pri premagnetanju ipd. Te izgube moramo upoštevati le pri opazovanju magnetnih materialov

v šibkih poljih, kjer dosežejo relativno znatne vrednosti. Pomenijo pa zmanjšanje permeabilnosti in prirastek izgub s frekvenco. V močnejših poljih jih lahko povsem zanemarimo.



Slika 5.43 Izgube v magnetnem materialu

Enačbo 5.65 lahko zdaj napišemo v naslednji obliki:

$$R_j = v \cdot L \cdot f^2 + h \cdot L \cdot f \cdot H + n \cdot f \cdot L \quad (5.69)$$

ali

$$\frac{R_j}{f \cdot L} = v \cdot f + h \cdot H + n \quad (5.70)$$

Ta nam omogoča določitev posameznih faktorjev  $v$ ,  $h$  in  $n$ .