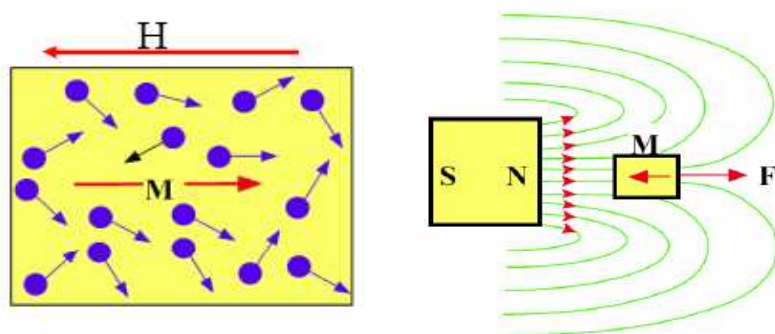


## MAGNETNI MATERIALI, HISTEREZNA ZANKA IN RAČUNANJE MAGNETNIH STRUKTUR

--- Vsebina poglavja: magnetni materiali (diamagnetiki, paramagnetiki, antiferimagnetiki, ferimagnetiki, superparamagnetiki, feromagnetiki), krivulja magnetenja, histerezna zanka, razmagnetenje, računanje magnetnih struktur.

Kot smo že omenili, imajo vsi materiali določene magnetne lastnosti, le da so močno izražene le pri zelo redkih. Glede na obnašanje snovi v magnetnem polju jih delimo na diamagnetike, paramagnetike, feromagnetike, antiferomagnetike, ferimagnetike in superparamagnetike.

**Diamagnetiki** izkazujejo izredno šibke magnetne lastnosti. Magnetni dipolni momenti kroženja elektronov in njihovega spina se v taki snovi kompenzirajo. Se pa pod vplivom zunanega magnetnega polja nekoliko celo zmanjša magnetno polje v notranjosti, ker je vpliv zunanega polja na spin elektronov nekoliko močnejši kot na orbitalni moment. Te snovi imajo negativno magnetno susceptibilnost oziroma relativno permeabilnost, ki je malo manjša od 1. Primeri takih snovi so Cu (relativna permeabilnost 0,999983), Au, Ag, Hg, H<sub>2</sub>O (0,999991), itd. Če diamagnetik postavimo v bližino močnega trajnega magneta, bo med njima odbojna sila (neodvisno od pola magneta). To je odkril že Michael Faraday leta 1846 na primeru bizmuta (0,99983).

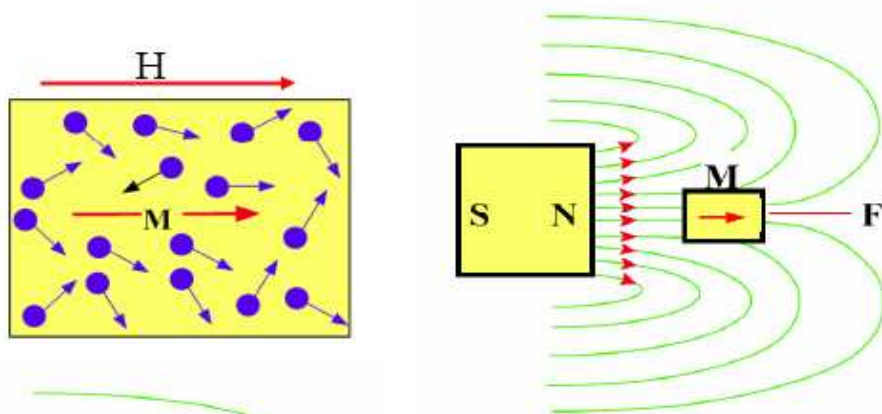


**SLIKA: M kaže v nasprotni smeri kot vzbujanje. Diamagnetik se odbija od trajnega magneta: sila je v smeri manjše gostote polja.**

**Paramagnetiki** so snovi, v katerih ni ravnotežja med magnetnimi dipolnimi momenti zaradi kroženja elektronov in spina. Vsak atom izkazuje rezultančni magnetni dipolni moment, ki pa se zaradi neurejenosti strukture kompenzirajo. Se pa s postavitvijo take snovi v magnetno

polje v določeni meri magnetno polje v notranjosti nekoliko poveča (usmerijo se magnetni dipoli) v smeri zunanega polja. Take snovi so npr. aluminij (1,00002), platina, mangan, kisik, zrak (1,0000004).

V smislu upoštevanja magnetnih lastnosti dia- in paramagnetikov bi lahko zaključili, da je njihova susceptibilnost v praksi najpogostejše zanemarljiva.

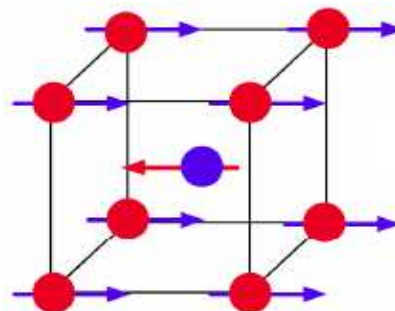


**SLIKA: Magnetizacija kaže v smeri vzbujalnega polja. Sila na paramagnetik v polju je v smeri večje gostote polja.**

**SLIKA:  $B(H)$  magnetilna krivulja za vakuum, diamagnetike in paramagnetike.**

**Antiferimagnetiki** so snovi, v katerih se magnetni momenti sosednjih atomov usmerijo v nasprotni smeri, zato je skupen magnetni moment teh snovi pri vzpostavitvi zunanega polja enak nič.

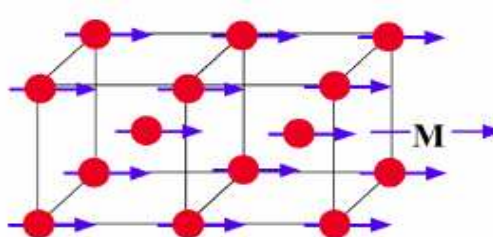
**Ferimagnetiki** imajo tudi nasprotno usmerjene magnetne momente, vendar njihova vrednost ni enaka nič. Še vedno pa ni ta efekt tako izrazit kot pri feromagnetikih. So pa določeni ferimagnetiki, ki jih imenujemo **feriti** izredno pomembni v elektrotehniki, saj je v nasprotju z feromagnetiki



njihova električna prevodnost zelo majhna, kar s pridom izkoriščamo tam, kjer bi sicer imeli velike izgube zaradi ohmskih tokov (vrtinčni toki) pri višjih frekvencah. Srečamo ga tudi v naravi, kot magnetit (železov oksid  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**Superparamagnetiki** so feromagnetiki, ki so vmešani v dielektričen material. Uporabljajo se npr. za audio in video trakove.

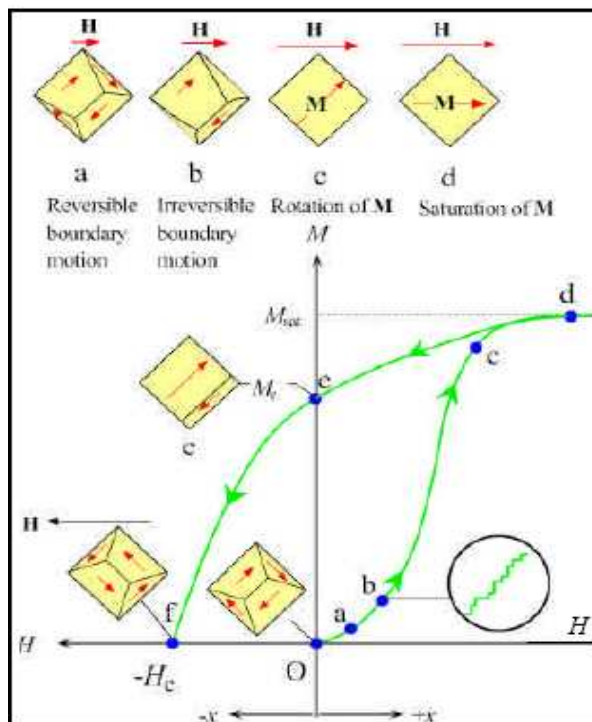
**Feromagnetiki.** V feromagnetikih ima vsak atom relativno velik magnetni dipolni moment. Le ta je posledica neuravnoveženih momentov spinov elektronov, kar se da prikazati z uporabo spoznanj kvantne fizike. Tipični predstavnik feromagnetikov so železo



(5000), nikel (600) in kobalt (250), ki so v periodičnem sistemu na mestih 26, 27 in 28. Poleg izraženih dipolnih momentov na nivoju atoma, se ti atomi v kristalni strukturi grupirajo v območja, ki jim pravimo *magnetne domene*, znotraj katerih so momenti orientirani, navzven pa so domene neurejene in zato tudi magnetno polje ni izrazito. Lahko pa se pod vplivom zunanjega polja magnetni momenti v domenah usmerijo v smer zunanjega polja. Proces orientiranja se odvija po fazah, tako, da se najprej nekoliko povečajo domene, katerih stene tvorijo majhen kot glede na zunanje polje. Pri taki reorientaciji je polje reverzibilno: če izklopimo zunanje polje, se domene vrnejo v prvoten položaj. Če se zunanje polje še dodatno poveča, se začnejo obračati celotne domene. Če potem izklopimo zunanje polje, se domene ne vrnejo več v začetno stanje, temveč ostanejo delno orientirane. Če pa zunanje polje še povečujemo, prihaja do nasičenja, ko so praktično že vsi dipolni momenti domen usmerjeni v smer polja. Povečevanje polja s strani feromagnetika ni več mogoče. Gostota magnetnega pretoka sicer še naprej narašča vendar le kot posledica povečevanja vzbujanja. Relativna permeabilnost se ob približevanju nasičenja zmanjšuje in približuje vrednosti 1 (feromagnetik se obnaša kot zrak).

**SLIKA: Primer zgradbe feromagnetnega materiala z domenami in magnetnimi dipolnimi momenti. Prikaz usmerjanja dipolov pred magnetizacijo in ob nasičenju.**

**Krivulja magnetenja.** Zanima nas, kako se magnetizacija spreminja z večanjem vzbujalne gostote magnetnega pretoka. Namesto opazovanja  $M(B)$ , je bolj običajno, da zunanje vzbujanje opišemo z jakostjo magnetnega polja  $H$ , rezultat magnetenja pa opazujemo z naraščanjem gostote magnetnega pretoka  $B$ . Dobimo torej  $B(H)$  krivuljo, ki pa pri feromagnetikih ni linearna. Na začetku je naklon manjši, potem največji in pri velikih vzbujanjih zopet manjši (nasičenje). Začetni krivulji magnetenja rečemo *deviška krivulja*, ker se ob izklopu zunanjega vzbujanja gostota pretoka ne vrne na nič, pač pa na neko vrednost, ki je različna od nič.



**SLIKA: Magnetilna krivulja s tipičnimi izrazi: deviška krivulja, nasičenje. Meja reverzibilnega in ireverzibilnega procesa. Prikaz zveze  $B(H)$  v vakuumu.**

### Relativne permeabilnost (statična, dinamična, inkrementalna)

Z upoštevanjem zveze med  $B$ jem in  $H$ jem je relativna permeabilnost definirana kot

$$\mu_{r,s} = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (9.1)$$

To permeabilnost imenujemo tudi statična in je primerna za obravnavo v primerih, ko se magnetilni tok ne spreminja ali pa je take oblike, da jo lahko dobro aproksimiramo s premico. Tej permeabilnosti rečemo tudi *statična*, saj ni definiran z naklonom krivulje pač pa z razmerjem med  $B$  in  $H$ . Zadnji odsek predstavlja nasičenje, kjer relativna permeabilnost

postane enaka 1. Pri feromagnetikih so vrednosti relativne permeabilnosti nekaj tisoč do nekaj sto tisoč. Vrednost statične relativne permeabilnosti je odvisna od točke računanja in bo zaradi nelinearne magnetilne krivulje tudi sama nelinearna. V smislu lažjega računanja jo pogosto poenostavimo tako, da lineariziramo magnetilno krivuljo. Tako postane statična relativna permeabilnost konstanta. V nasičenju pa ima relativna statična permeabilnost vrednost 1.

V določenih primerih (npr. pri vzburjanju z majhnimi izmeničnimi signali) je bolj primerno upoštevati le del krivulje magnetenja pri čemer je bolj smiselno upoštevati naklon na krivuljo v določeni (delovni) točki. Tako dobimo *dinamično relativno permeabilnost*, ki je definirana

$$\text{kot } \mu_{r,d} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}.$$

**SLIKA: Prikaz statične relativne permeabilnosti kot razmerje med B in  $\mu_0 H$  v točki. Krivulja ima določen maksimum in pade v nasičenju na vrednost 1.**

Če imamo opravka z izmeničnim signalom, ki je superponiran na enosmernega, je običajno bolj primerno uporabiti t.i. inkrementalno relativno permeabilnost, ki ni definirana z odvodom krivulje pač pa z diferencami v lokalni histerezni zanki  $\mu_{r,i} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}$ . Ta je manjša od dinamične permeabilnosti.

**Histerezna zanka:** Do določenega Bja je proces magnetenja še reverzibilen, ko pa je ta vrednost presežena, se pri zmanjševanju vzburjanja B počasneje zmanjšuje kot pri povečevanju. Dobimo histrezno zanko. Ko je vzburjanje izklopljeno, ostane v materialu določeno polje, ki ga imenujemo remanenčno in označimo z Br. Če smer vzburjanja obrnemo, se zmanjšuje polje in pri določeni vrednosti vzburjanja pade na nič. Tej točki vzburjanja rečemo

koercitivna jakost polja in jo označimo s  $H_c$ . Pri še povečanem vzbujanju pridemo do nasičenja v negativni smeri. Vzbujanje zopet zmanjšujemo do nič in nato do nasičenja, kjer se začetna in končna krivulja stakneta.

**SLIKA: Histerezna krivulja s prikazom remanenčne gostote magnetnega pretoka ( $B_r$ ), ki ostane v materialu po izklopu vzbujanja in koercitivne jakost polja ( $H_c$ ), kjer je gostota pretoka enaka nič.**

#### **Mehkomagnetni in trdomagnetni materiali.**

Če želimo material uporabiti kot trajni magnet, je primerno uporabiti material, ki ima veliko vrednost remanenčne gostote polja. Poleg tega je pomembno tudi, da ga ni lahko razmagnetiti, torej mora imeti veliko tudi koercitivno jakost polja. Najboljši materiali za trajni magnet imajo veliko vrednost produkta  $H_c$  in  $B_r$ . Takim materialom rečemo tudi *trdomagnetni*.

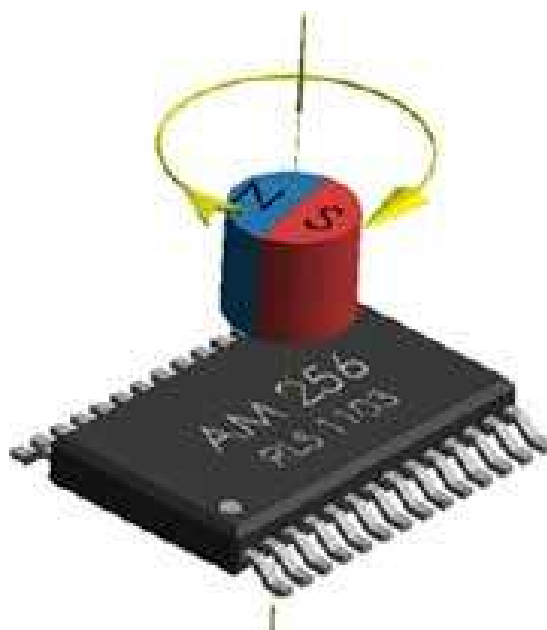
*Mehkomagnetni materiali* imajo ozko histerezno zanko in veliko permeabilnost. Tipičen mehkomagnetni material je čisto železo. Zelo ozke histerezne zanke imajo tudi feritni materiali.

**SLIKA: Primerjava med histerezno zanko mehkomagnetnega materiala in trdomagnetnega materiala.**

**Razmagnetenje.** Običajni način razmagnetjenja je zmanjševanje izmeničnega polja, pri čemer pa moramo začeti razmagnetenje z amplitudo, pri kateri je material v nasičenju. Določeni

materiali so zelo občutljivi na mehanske udarce (so krhki), ki tudi lahko delno spremenijo magnetne lastnosti. Poleg tega vsak material izgubi magnetne lastnosti pri dovolj visoki temperaturi, ki jo imenujemo *Curiejeva temperatura*. Pri tej temperaturi snov zaradi povečanega termičnega gibanja izgubi magnetne lastnosti. Pri železu je  $T_c=770^{\circ}\text{C}$ .

**SLIKA:** Primer uporabe prečno magnetiziranega trajnega magneta NeFeB za aplikacijo dajalnika kota, ki se ga določa z odčitavanjem magnetnega polja. Pod senzorjem se nahaja čip z množico Hallovih elementov in elementi za obdelavo signalov. Čip je bil razvit na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, celotni produkt pa trži slovensko podjetje RLS: [www.rls.si](http://www.rls.si).



## RAČUNANJE MAGNETNIH STRUKTUR

Spoznali smo obliko Amperovega zakona izraženo z jakostjo magnetnega polja  $H$ :  $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$ . Ugotovili smo, da je ta oblika zapisa posebno primerna za obravnavo polja v snoveh z izraženimi magnetnimi lastnostmi (npr. feromagnetiki). Zveza med gostoto magnetnega pretoka in jakostjo polja je  $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_r \mu_0 H = \mu \vec{H}$ , kjer je zveza lahko podana v matematični obliki (konstantna permeabilnost ali nelinearna funkcija  $H$ -ja) ali pa je podana grafično – v obliki magnetilne krivulje. Za analizo magnetnih struktur nam služi ravno Amperov zakon, ki pa ga moramo nekoliko poenostaviti. Namesto v integralni obliki ga zapišemo kot vsoto posameznih padcev magnetne napetosti. Tako dobimo obliko

$$\sum_{i=1}^N H_i \cdot l_i = \mathcal{O}. \quad (9.2)$$

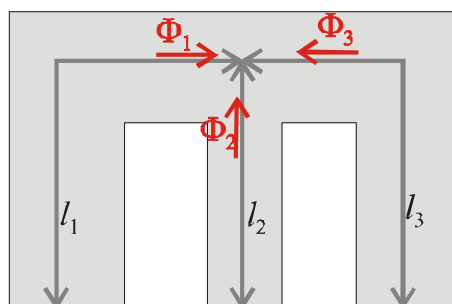
Desna stran enačbe predstavlja tokovno vzburjanje (lahko je več takih vzburjanj), leva stran enačbe pa so padci magnetne napetosti na posameznih odsekih po zaključeni magnetni poti. **Pri tem smo morali narediti določeno poenostavitev in sicer, da je po preseku jedra polje homogeno in da računamo razdalje  $l_i$  po srednji dolžini gostotnice (po sredini jedra).**

Poleg zgornjega zapisa, ki spominja na Kirchofov zakon o vsoti napetosti po zaključeni poti, potrebujemo še povezavo med gostotami pretoka v sosednjih odsekih poti. To zvezo dobimo iz zakona o brezizvornosti magnetnega polja ( $\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ ), ki ga zopet zapišemo v diskretni

obliki

$$\sum_{i=1}^N \Phi_i = 0, \quad (9.3)$$

kjer je  $N$  število odceпов. Poglejmo si to na primeru E oblike jedra na sliki.



**SLIKA: Prikaz srednjih dolžin gostotnic ter vsote fluksov v jedru E oblike. Veljati mora:**

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0.$$



**PRIMERI IZRAČUNOV:**

**Primer 1:** Navitje na feromagnetnem jedru s konstantno permeabilnostjo brez zračne reže: Na feromagnetnem jedru pravokotnega preseka  $1 \text{ cm}^2$  s sredno dolžino gostotnice  $24 \text{ cm}$  je navitje s tokom  $1,2 \text{ A}$  in  $150$  ovoji. Relativna permeabilnost feromagnetika je  $647$ . Določite gostoto magnetnega pretoka, fluks v jedru in induktivnost navitja. (SLIKA)

Izračun:

$$NI = Hl \Rightarrow H = 750 \text{ A/m}$$

$$B = \mu_r \mu_0 H = 0,6 \text{ T}$$

$$\Phi = BA = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$L = \frac{N\Phi}{I} = 7,5 \text{ mH.}$$

**Primer 2:** Navitje na jedru iz feromagnetika s konstantno permeabilnostjo in z zračno režo: Vzemimo enako jedro kot v primeru 1, pri čemer naj ima jedro še  $1 \text{ mm}$  široko zračno režo. Privzemimo, da v zračni reži ni stresanja polja (enako homogeno kot v jedru). Kolikšno polje dobimo v zračni reži in feromagnetiku pri enakem vzbujanju ter kolikšna je induktivnost navitja? (SLIKA)

Izračun: Vsota vseh padcev magnetnih napetosti po zaključeni dolžini magnetne poti mora

biti enaka magnetnemu vzbujanju  $\sum_{i=1}^N H_i \cdot l_i = \Theta$ . Imamo dva padca magnetnih napetosti: eno

v feromagnetiku in drugo v zračni reži. Predpostavili bomo, da je polje v feromagnetiku (index  $m$ ) homogeno po prerezu in da računamo integral po srednji dolžini magnetne poti:

$$H_m \cdot l_m + H_{zr} \cdot l_{zr} = NI. \text{ Sedaj Hje izrazimo z Bji, pri čemer je potrebno upoštevati različne}$$

$$\text{relativne permeabilnosti (v zraku le } \mu_0\text{): } \frac{B_m}{\mu_m \mu_0} \cdot l_m + \frac{B_{zr}}{\mu_0} \cdot l_{zr} = NI. \quad (9.4)$$

Da dobimo zvezo med poljem v feromagnetiku in zračni reži uporabimo enačbo (9.3) iz katere sledi, da mora biti fluks skozi jedro enak fluksu skozi zračno režo:

$\Phi_m = \Phi_{zr}$  torej zaradi predpostavljene homogenosti polja  $B_m \cdot A_m = B_{zr} \cdot A_{zr}$ . Če zanemarimo stresanje polja v zračni reži ( $A_m = A_{zr}$ ), je gostota polja v feromagnetiku enako velika gostoti polja v zračni reži:  $B_m = B_{zr}$ . Z upoštevanjem tega v enačbi (9.4) dobimo izraz za izračun

polja v feromagnetiku (in zračni reži)  $B_m = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l_m}{\mu_{rm}} + l_z}$ . Vidimo, da se je polje znotraj

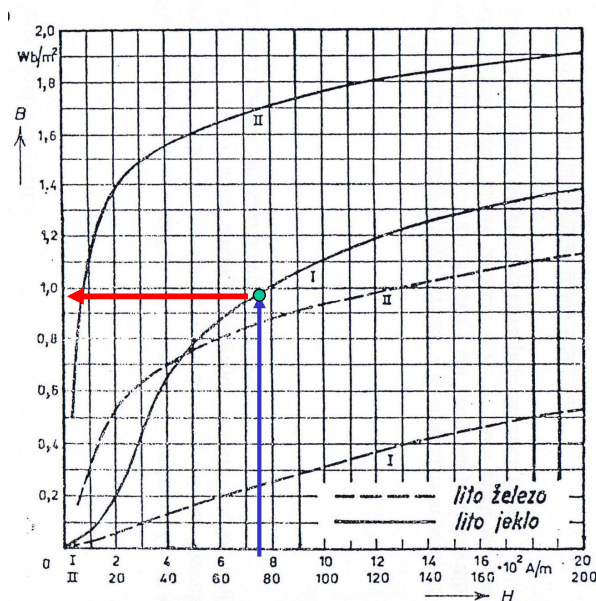
feromagnetika zmanjšalo glede na prejšnji primer (0,9 T) in sedaj znaša 0,16 T. Prav tako se zmanjša tudi lastna induktivnost, ki je sedaj 2 mH.

**Vprašanje:** Zakaj potem sploh uporabiti zračno režo, če pa tako močno zmanjša polje? Ponavadi je zračno režo potrebno uporabiti zato, da se zmanjšajo nelinearnosti, ki so posledica nelinearne zveze med  $B$ jem in  $H$ jem, ki se odraža v nelinearni relativni permeabilnosti. Zračna reža deluje kot magnetni upor, ki je popolnoma linearen in zmanjša končen vpliv nelinearnosti feromagnetika. Potrebno je najti ravno pravi kompromis, ki daje dovolj velik odziv, nelinearnosti pa morajo biti znotraj določenih okvirov (meja).

**Primer 3:** Navitje na feromagnetnem jedru brez zračne reže. Upoštevamo magnetilno krivulja feromagnetika.

Vzemimo feromagnetno jedro iz litega jekla pravokotne preseka  $1 \text{ cm}^2$ . Na jedru je navitje s 150 ovoji, srednjo dolžino gostotnice 24 cm in tokom 1,2 A. Določimo gostoto magnetnega pretoka, fluks v jedru in induktivnost navitja.

Izračun: Zapišemo  $H_m \cdot l_m = NI$  od koder sledi  $H_m = 750 \text{ A/m}$ .  $B_m$  določimo iz magnetilne krivulje, kot prikazuje slika. Dobimo  $B_m = 0,95 \text{ T}$ . Fluks bo torej  $= 95 \mu\text{Wb}$  in induktivnost  $L=11,8 \text{ mH}$ . Ta induktivnost ni več linearna, temveč je odvisna od toka vzbujanja, medtem ko je bila pri jedru s konstantno permeabilnostjo konstantna.



**SLIKA:** Primer določitve gostote pretoka iz znane jakosti polja.

**Primer 4:** Navitje na jedru z zračno režo. Upoštevamo magnetilno krivuljo feromagnetika. Podan je  $NI$ , iščemo fluks ali gostoto pretoka.

Vzemimo jedro iz primeru 3, ki pa mu dodamo 1 mm široko zračno režo.

Zopet lahko pišemo  $H_m \cdot l_m + H_{zr} \cdot l_{zr} = NI$ . Jakost polja v zračni reži izrazimo z gostoto pretoka v zračni reži, ki je ob zanemaritvi stresanja polja enaka kot v jedru. Torej velja

$H_m \cdot (l_m - l_{zr}) + \frac{B_m}{\mu_0} \cdot l_{zr} = NI$ . To je enačba z dvema neznankama. Druga zveza med B in H je

podana z magnetilno krivuljo. Primer lahko rešimo s preizkušanjem ali pa grafično:

Izračun s preizkušanjem: enačbo napišemo z vstavljenimi vrednostmi (enostavneje kar brez enot)  $H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 180$ . Pri pravilno izbranem  $B_m$  in  $H_m$  mora biti leva stran enačbe enaka 180. Izberemo si določen B in na magnetilni krivulji poiščemo ustrezen H. Preverimo če rezultat ustreza in se s preizkušanjem bližamo rešitvi.

$B_m = 1 \text{ T}, H_m = 800 \text{ A/m}, H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 988$ ; mnogo preveč

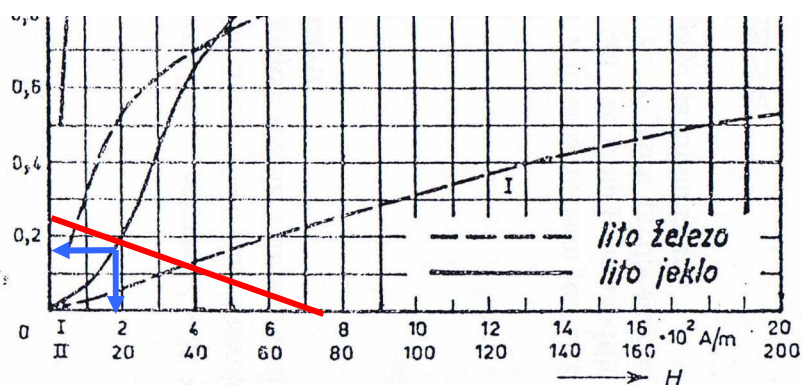
$B_m = 0,5 \text{ T}, H_m = 320 \text{ A/m}, H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 475$ ; mnogo preveč

$B_m = 0,2 \text{ T}, H_m = 200 \text{ A/m}, H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 207$ ; blizu rešitve

$B_m = 0,15 \text{ T}, H_m = 150 \text{ A/m}, H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 155,4$ ; premalo

Zaključimo, da mora biti  $B_m$  med 0,2 in 0,15 T.

Izračun z grafičnim postopkom: Gornja enačba predstavlja enačbo premice, ki v presečišču z magnetilno krivuljo določa delovno točko. Potrebujemo dve točki na premici. Najbolj enostavno kar  $B_m(H_m=0) = 0,226 \text{ T}$  in  $H_m(B_m=0) = 750 \text{ A/m}$ . Skozi ti dve točki potegnemo premico in odčitamo delovno točko.



**SLIKA:** Primer grafičnega določanja delovne točke in posledično magnetne napetosti.

**Primer 5: Jedro z zračno režo. Podan fluks ali gostota toka, iščemo NI.**

Isto kot primer 3 in 4, le da iščemo magnetno napetost pri želeni gostoti pretoka v zračni reži. Na primer pri  $B = 0,5 \text{ T}$ .

Enačba je enaka kot v prejšnjem primeru, postopek pa je direkten. Ker zanemarimo stresanje polja v zračni reži, je gostota pretoka v jedru enaka kot v zračni reži. Iz magnetilne krivulje odčitamo  $H$  pri  $B = 0,5 \text{ T}$ , ki je  $320 \text{ A/m}$  in vstavimo v enačbo. Dobimo  $475 \text{ A}$ .

**Primer 6: Izračun trajnega magneta.**

Poiščimo velikost magnetizacije trajnega magneta z zračno režo dolžine  $5 \text{ mm}$ , pri čemer je magnet oblike toroida okroglega preseka notranjega polmera  $2,5 \text{ cm}$  in zunanjskega polmera  $3,5 \text{ cm}$ . V zračni reži smo izmerili polje  $50 \text{ mT}$  (spremenjena vrednost!).

$$l_m = 2\pi \frac{3,5 \text{ cm} + 2,5 \text{ cm}}{2} = 6\pi \text{ cm}.$$

Izračun: Ker ni (zunanjskega) vzbujanja, bo veljalo  $H_m \cdot l_m + H_{zr} \cdot l_{zr} = 0$ , od koder je

$$H_m = -\frac{H_{zr} \cdot l_{zr}}{l_m}.$$

Vidimo, da je smer jakosti polja v magnetu različna kot v zračni reži. In ker

je smer gostote pretoka v zračni reži enaka smeri jakosti polja ( $B = \mu_0 H$ ), lahko zaključimo, da je smer  $B$ -ja v magnetu različna od smeri  $H$ -ja (to smo ugotovili tudi že v prejšnjem poglavju). Ker zvezo med  $B$  in  $H$  v zraku vedno poznamo, lahko določimo  $H$  v železu

$$H_m = -\frac{B_{zr} \cdot l_{zr}}{\mu_0 \cdot l_m} = -1,84 \text{ kA/m}.$$

Ker sta fluksa v zračni reži in magnetu enaka, sta tudi gostoti

pretoka enaki (če ne upoštevamo stresanja polja) je polje v magnetu enako veliko kot polje v zračni reži,  $0,05 \text{ T}$ . Z upoštevanjem stresanja bi morali upoštevati efektivno zmanjšanje zračne reže za (Carterjev) faktor približno  $0,7$ . Magnetizacijo dobimo iz izraza

$$B_m = \mu_0 H_m + \mu_0 M, \text{ od koder je } M = \frac{B_m}{\mu_0} - H_m = 40,87 \cdot 10^3 \text{ A/m}.$$

**SLIKA: Jakost polja in gostota pretoka ter magnetizacija v magnetu in zračni reži.**

**Delovna točka magneta.** Ugotovili smo, da sta B in H pri trajnem magnetu nasprotnega predznaka, saj velja  $H_m = -\frac{B_m \cdot l_{zr}}{l_m}$ . Torej se delovna točka magneta nahaja na magnetilni krivulji v drugem kvadrantu. Temu delu histerezne zanke rečemo tudi **krivulja demagnetizacije ali razmagnetilna krivulja**. Enačba predstavlja naklon premice in v presečišču s krivuljo magnetenja določa delovno točko. Za trajni magnet si večinoma želimo, da ima čim večji produkt B-ja in H-ja. Optimalna delovna točka je tam, kjer je produkt Bja in Hja največji. Kot bomo videli, določa produkt B-ja in H-ja gostoto magnetne energije v jedru. Desno od grafa B(-H) običajno narišemo še graf B(B H), kjer lahko identificiramo točko z največjim produktom BH.

#### SLIKA: Delovna točka trajnega magneta.

##### Primeri kolokvijev in izpitov:

##### Magnetizacija, trajni magnet:

kolokvij, 9. maj 2005

izpit, 20. junij 2006

izpit, 19. januar 2006

izpit, 8. aprila 2002

izpit, 24. junij 2004

##### Feromagnetik podan z magnetilno krivuljo:

kolokvij, 13. april 2006

kolokvij, 3. maj 2004

kolokvij, 15. april 2004

kolokvij, 07. maja 2002

##### Feromagnetik z ali brez zračne reže, konstantna permeabilnost:

kolokvij, 4. maj 2006

izpit 23. junija 2006