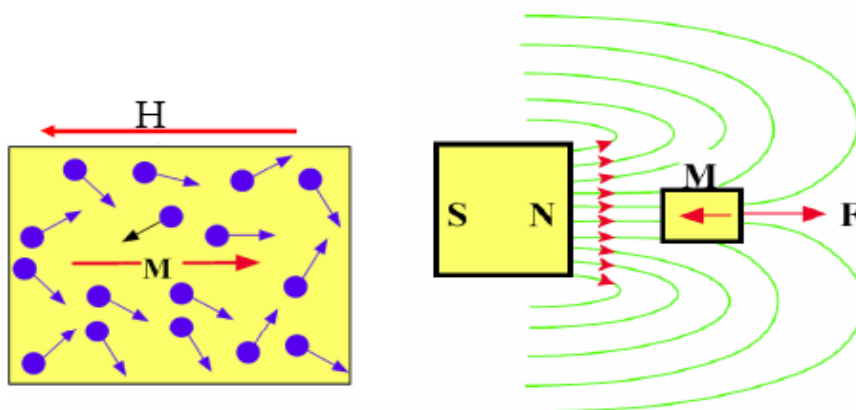


## MAGNETNI MATERIALI, HISTEREZNA ZANKA IN RAČUNANJE MAGNETNIH STRUKTUR (9)

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 zunanjega magnetnega polja nekoliko celo zmanjša magnetno polje v notranjosti, ker je vpliv zunanjega 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).

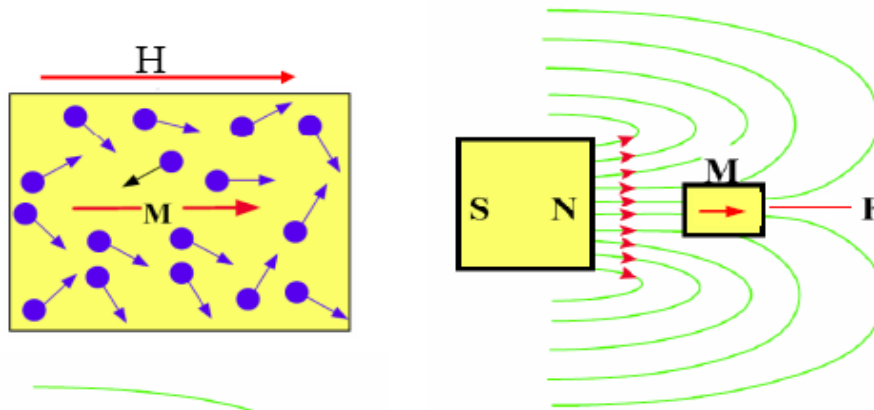


**SLIKA: M kaže v nasprotni smeri kot vzbujanje. Diamagnetik se odbija od trajnega magneta: sila je v smeri manjše gostote polja.**

**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 zunanjega polja. Take snovi so npr. aluminij (1,00002), platina, mangan, kisik, zrak (1,0000004).

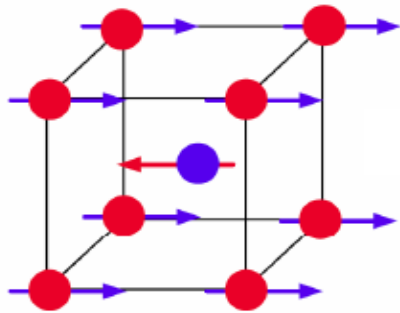
V smislu upoštevanja magnetnih lastnosti dia- in paramagnetikov bi lahko zaključili, da je njihova susceptibilnost v praksi zanemarljiva.



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

**SLIKA: B(H) KRIVULJA ZA ZRAK, DIAMAGNETIKE IN FEROMAGNETIKE.**

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

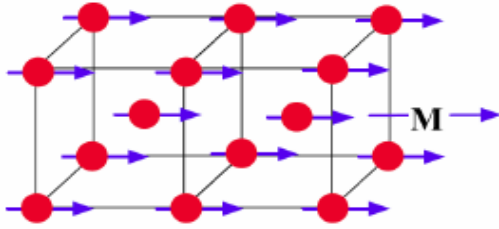


**Ferimagnetiki** imajo tudi nasprotno usmerjene magnetne momente vendar njihova vrednost ni enaka nič. Še vedno pa ni ta efekt tako izrazit kot pri feromagnetikih. So pa določeni ferimagnetiki, ki jih imenujemo **feriti** izredno pomembni v elektrotehniki, saj je v nasprotju z feromagnetiki njihova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

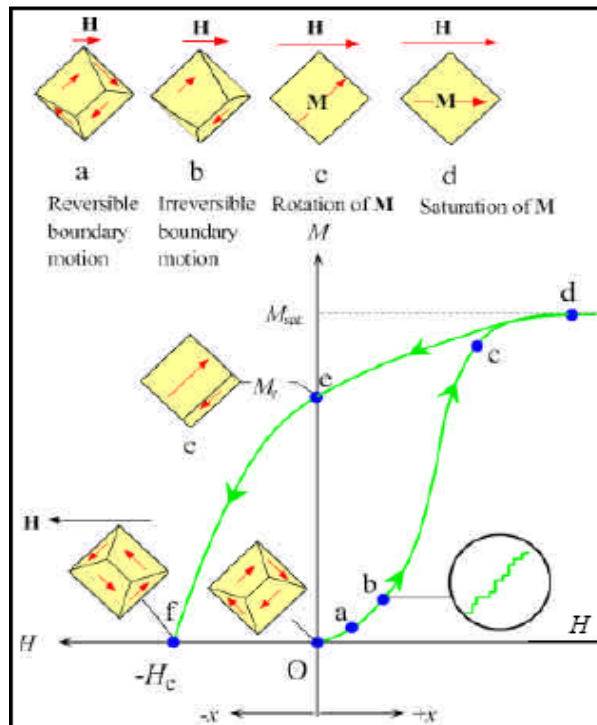
**Feromagnetiki.** V feromagnetikih ima vsak atom relativno velik magnetni dipolni moment. Le ta je posledica neuravnoveženih momentov spinov elektronov, kar se da prikazati z uporabo spoznanj kvantne fizike. Tipični predstavnik feromagnetikov so železo (5000), nikel (600) in kobalt (250), ki so v periodičnem 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 zunanje polja magnetni momenti v domenah usmerijo v smer zunanje 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 v takem momentu 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 ni več mogoče. Gostota magnetnega pretoka sicer še naprej narašča

spovečevanjem vzbujanja vendar je relativna permeabilnost enaka 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.**

Z upoštevanjem zveze med Bjem in Hjem je relativna permeabilnost definirana kot

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} . \quad (0.1)$$

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 vzbujujanju 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

$$\text{kot } \mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0 \cdot dH}.$$

**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 diferenciali v lokalni histerezni zanki  $\mu_{ri} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H}$ . Ta je manjša od dinamične permeabilnosti.

**Histerezna zanka:** Do določenega  $B_j$  je proces magnetenja še reverzibilen, ko pa je ta vrednost presežena, se pri zmanjševanju vzbujujanja B počasneje zmanjšuje kot pri povečevanju. Dobimo histrezno zanko. Ko je vzbujujanje izklopljeno, ostane v materialu določeno polje, ki ga imenujemo remanenčno in označimo z  $B_r$ . Če smer vzbujujanja obrnemo, se zmanjšuje polje in pri določeni vrednosti vzbujujanja pade na nič. Tej točki vzbujujanja rečemo koercitivna jakost polja in jo označimo s  $H_c$ . Pri še povečanem vzbujujanju 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.**

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*.

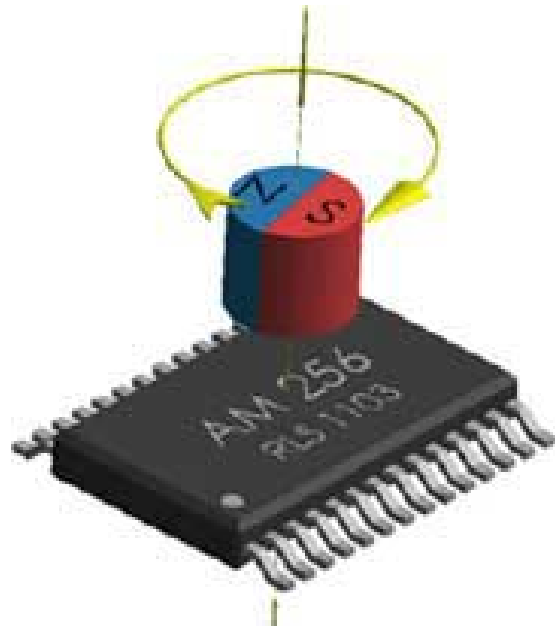
*Mehkomagnetni materiali* imajo ozko histerezno zanko in veliko permeabilnost. Tipičen mehkomagnetni material je čisto železo. Zelo ozke histerezne zanke imajo tudi feritni materiali.

**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  $T_c=770^0$  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

$$\sum_{i=1}^N H_i \cdot l_i = \mathcal{O}. \quad (0.2)$$

Desna stran enačbe predstavlja tokovno vzbujanje (lahko je več takih vzbujanj), 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).

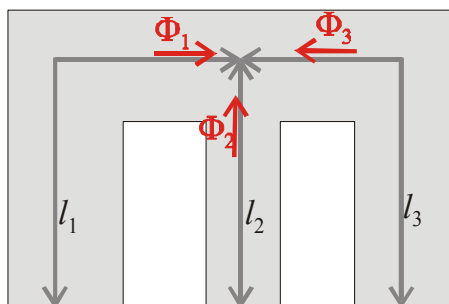
Poleg zgornjega zapisa, ki spominja na Kirchofov zakon o vsoti napetosti po zaključeni poti,

potrebujemo še povezavo med gostotami pretoka v sosednjih odsekih poti. To zvezo dobimo

iz zakona o brezizvornosti magnetnega polja, ki ga zopet zapišemo v diskretni obliki

$$\sum_{i=1}^N \Phi_i = 0, \quad (0.3)$$

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  $1 \text{ cm}^2$  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.

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 stresa polja (enako homogeno kot v jedru). Kolikšno polje dobimo v zračni reži in feromagnetiku pri enakem vzbujanju ter kolikšna je induktivnost navitja?

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:

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

relativne permeabilnosti (v zraku le  $\mu_0$ ):  $\frac{B_m}{\mu_{rm}\mu_0} \cdot l_m + \frac{B_{zr}}{\mu_0} \cdot l_{zr} = NI$ . Da dobimo zvezo med

poljem v feromagnetiku in zračni reži uporabimo enačbo (0.3) iz katere sledi, da mora biti fluks skozi jedro enak fluksu skozi zračno režo:

$$\Phi_m = \Phi_{zr} \text{ torej zaradi predpostavljene homogenosti polja } B_m \cdot A_m = B_{zr} \cdot A_{zr}. \text{ Ker zanemarimo}$$

stresanje polja v zračni reži ( $A_m = A_{zr}$ ), velja oziroma kar  $B_m = B_{zr}$ . Iz tega sledi, da bo polje v

zračni reži in feromagnetiku določala enačba  $B_m = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l_m}{\mu_{rm}} + l_{zr}}$ . Vidimo, da se je polje znotraj

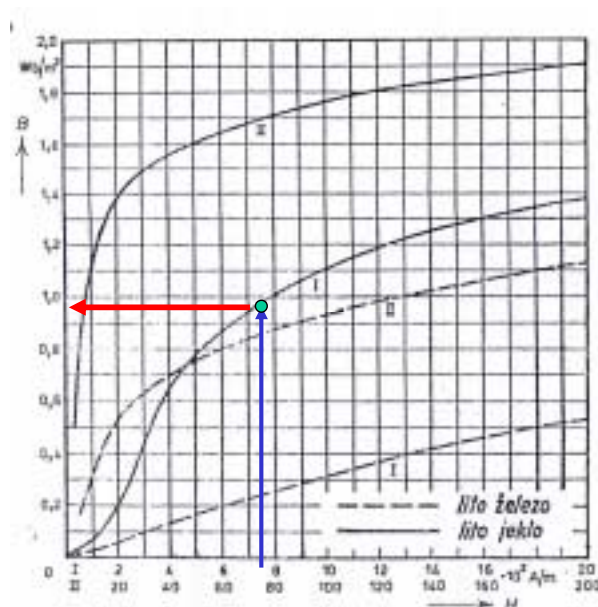
feromagnetika zmanjšalo glede na prejšnji primer (0,9 T) in sedaj znaša 0,16 T. Prav tako se zmanjša tudi lastna induktivnost, ki je sedaj 2 mH.

**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 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 in je 0,95 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 kot v primeru 3 vendar z dodano 1 mm dolgo 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

$$H_m \cdot (l_m - l_{zr}) + \frac{B_m}{\mu_0} \cdot l_{zr} = NI$$

lahko rešimo s preizkušanjem ali pa grafično:

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

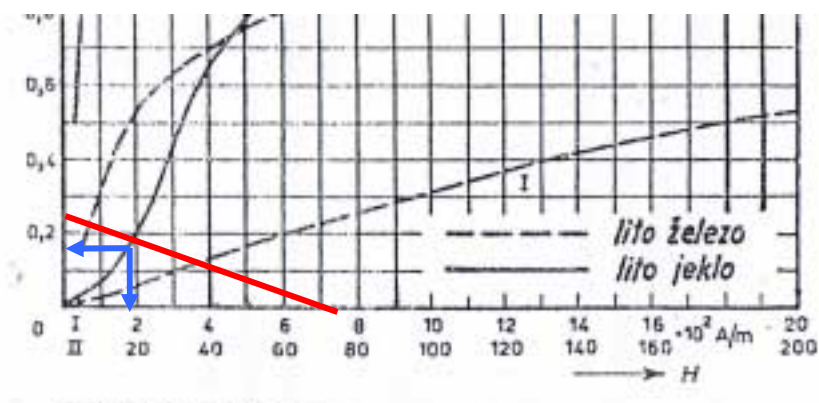
$B_m = 0,5 \text{ T}, H_m = 320 \text{ A/m}, H_m \cdot 0,24 + B_m \cdot 796 = 475$ ; mnogo preveč

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

Grafičen postopek: 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  $B = 0,5$  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  $B = 0,5$  T, ki je  $320$  A/m in vstavimo v enačbo. Dobimo  $475$  A.

**Primer 6: Izračun trajnega magneta.**

Poiščimo velikost magnetizacije trajnega magneta z zračno režo dolžine  $5$  mm, pri čemer je magnet oblike toroida okroglega preseka notranjega polmera  $2,5$  cm in zunanjsega polmera  $3,5$  cm. V zračni reži smo izmerili polje  $0,5$  T.

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

$$H_m = -\frac{H_{zr} \cdot l_{zr}}{l_m}. \text{ Vidimo, da je smer jakosti polja v magnetu različna kot v zračni reži. In ker}$$

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. Ker zvezo med  $B$  in  $H$  v zraku vedno

$$\text{poznamo, lahko določimo } H \text{ v železu } H_m = \frac{\frac{B_{zr}}{\mu_0} l_m}{l_m} = 10,8 \text{ kA/m} \quad H_m = -\frac{\frac{B_{zr}}{\mu_0} \cdot l_{zr}}{l_m} = 10,8 \text{ kA/m}. \text{ Pri}$$

tem nismo upoštevali stresanja polja v zračni reži. Z upoštevanjem stresanja bi morali upoštevati efektivno zmanjšanje zračne reže za (Carterjev) faktor približno  $0,7$ . Ker sta fluksa v zračni reži in magnetu enaka, sta tudi gostoti pretoka enaki (če ne upoštevamo stresanja polja) in je torej polje v magnetu tudi  $0,5$  T. Magnetizacijo pa dobimo iz izraza

$$B_m = \mu_0 H_m + \mu_0 M, \text{ od koder je } M = \frac{B_m}{\mu_0} - H_m = 3,8 \cdot 10^5 \text{ A/m}.$$

### 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.

#### \* Dodatki iz prakse:

Enačbo, ki smo jo izpeljali za polje v feromagnetiku z zračno režo se v praksi pogosto zasledi v katalogih proizvajalcev feromagnetnih in feritnih jeder zapisano v smislu efektivne relativne permeabilnosti. Z dodatkom zračne reže v jedro se namreč polje zmanjša in lahko pišemo

$$B_m = B_{zr} = \frac{\mu_0 NI}{\frac{l_m}{\mu_{rm}} + l_{zr}} = \frac{\mu_{rm} \mu_0 NI}{l_m + \mu_{rm} l_{zr}} = \frac{\mu_{rm} \mu_0 NI}{l_m \left( 1 + \mu_{rm} \frac{l_{zr}}{l_m} \right)} = \frac{\mu_{ref} \mu_0 NI}{l_m}, \text{ kjer je}$$


efektivna relativna permeabilnost določena kot  $\frac{\mu_{rm}}{1 + \mu_{rm} \frac{l_{zr}}{l_m}}$ . Zapis z efektivno relativno

permeabilnostjo je posebno pogost pri zapisu induktivnosti feromagnetnega jedra z zračno

režo, kjer dobimo induktivnost kot  $L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu_{ref}\mu_0 N^2 A}{l_m}$ . Pogosto je za jedra podan t.i.

faktor induktivnosti  $A_L$ , ki je  $A_L = \frac{L}{N^2}$ , kar popolnoma poenostavi izračun potrebne

induktivnosti, saj jo dobimo kar z množenjem faktorja induktivnosti s kvadratom števila obojev.



**RM cores**  
(Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4)

	Dimensions						$A_L$ [nH]			Fig	
	a	c	d2	d3	2h1	2h2	2h3	15G	45G		35G
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	+30/-20%	+30/-20%	+30/-20%	
RM 4 P	10,4-11,0	9,4-9,8	7,95-8,35	3,7-3,9	10,3-10,5	7,0-7,4	8,75-9,25	1000	1100	1100	2
RM 5 P	14,0-14,6	11,8-12,3	10,2-10,6	4,7-4,9	10,3-10,5	6,3-6,7	8,75-9,25	1800	2000	2000	2

**SLIKA: Izsek prospekta podjetja Iskra FERITI (skupina Kolektor), ki kaže primere uporabe feritnih jeter, ki jih izdeluje podjetje. Prospekti so na voljo na spletnih straneh podjetja, žal le v angleškem jeziku: [www.iskra-feriti.si](http://www.iskra-feriti.si). Poleg je prikazan primer RM jedra z izmerami in pomembnim podatkom  $A_L$ , iz katere določimo potrebno induktivnost z množenjem s kvadratom obojev.**

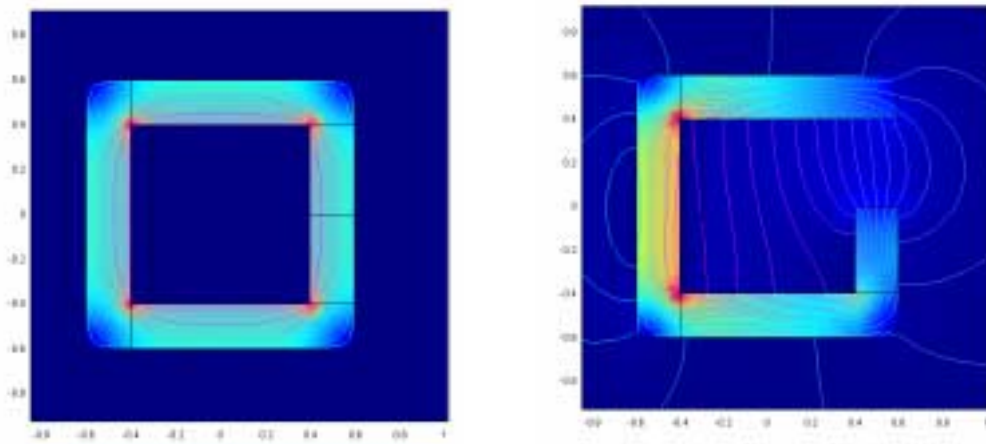
### Application survey

APPLICATION	PROPERTIES	MATERIALS	AVAILABLE SHAPES
Common mode chokes	Very high $\mu$ , low losses	19G, 22G, 22GN 12G, 32G, 45G	toroids, U, E
Filter inductors	High Q, high temperature & time stability	10G, 16G, 26G	RM, pot
Power inductors	low power losses, high saturation	15G, 25G, 35G 45G, 55G, 75G	toroids, E, ETD, ER, U, RM, RMLPL, PQ, Eplanar
Power transformers	low power losses, high saturation	15G, 25G, 35G 45G, 55G, 75G	E, ETD, EFD, ER, RM, RMLP, pot, PQ, toroids, Eplanar
xDSL transformers	Very high $\mu$ , low THD	12G	EP, EPX, RM, ER, pot
Wideband transformers	Very high $\mu$	19G, 22G, 12G, 32G	RM, pot, E, EFD, ETD, EP, toroids
Proximity switches	High Q and high temperature stability	10G, 16G, 19G	pot, custom design shapes
Radio-frequency transformers	low losses, high frequency range	2E, 1F, 2C	toroids, double aperture cores
Inductors in resonant circuit and open filters	low losses, high frequency range	1F, 2C, 10G	rods, tubes, screws, custom design shapes

**SLIKA: Aplikacije in primeri jeter, ki so predlagani za te aplikacije.**

**Upoštevanje stresanja fluksa v zračni reži.** V dosedanjih primerih smo predpostavili, da je polje homogeno tudi v zračni reži. To je dober približek le v primeru, ko je zračna reža ozka v primerjavi z dolžino preseka jedra. Če to ne velja, je potrebno upoštevati, da se gostotna cevka v zračni reži razširi, oziroma, da je polje stresano v okolici zračne reže. To lahko upoštevamo kot povečano (efektivno) površino preseka zračne reže ali pa kot efektivno podaljšano širino zračne reže. To podaljšanje upoštevamo s t.i. *Carterjevim faktorjem*, ki je odvisen od širine zračne reže in dolžina preseka jedra  $d$ :  $\delta_c = C \cdot \delta$ :

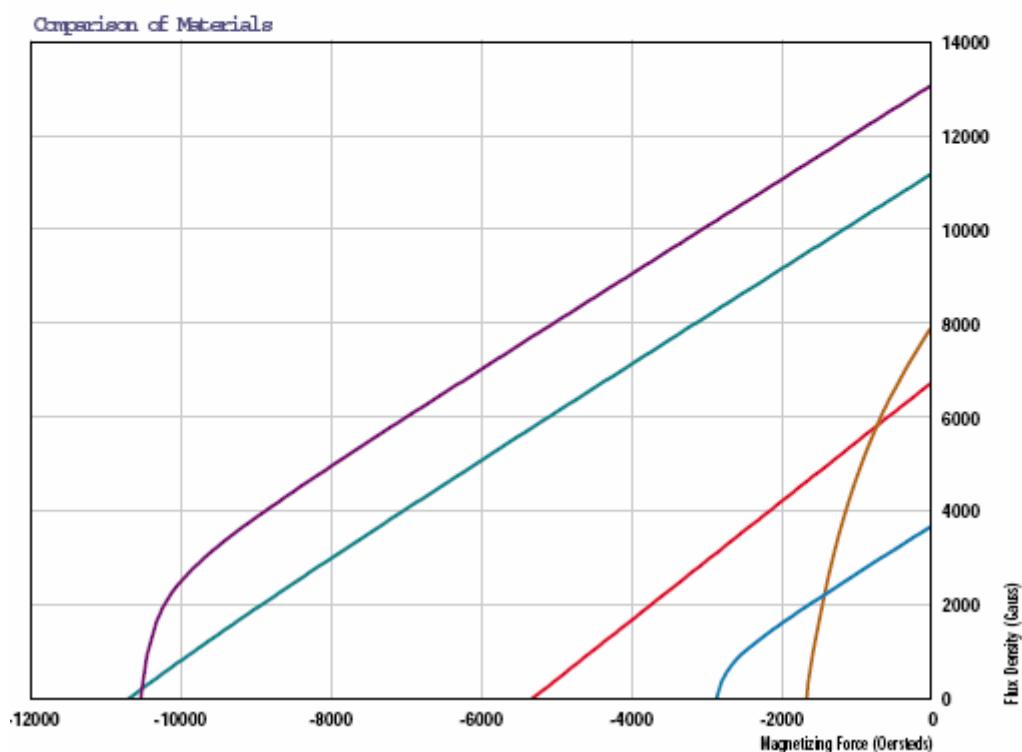
$d/\delta$	3 - 6	10 - 20	30 - 100
C	0,67 - 0,76	0,80 - 0,87	0,90 - 0,96



**SLIKA:** Prikaz numeričnega izračuna polja v jedru brez in z zračno režo. Numeričen izračun upošteva realno geometrijo jedra in s tem tudi prikaže efekt stresanje polja v zračni reži kot tudi vse druge nehomogenosti, ki so posledica geometrijskih danosti. Ugotovimo lahko, da je polje v jedru precej homogeno, v zračni reži pa se razširi po okolici. Če primerjamo še velikosti polja pri enakem vzburjanju v obeh primerih, ugotovimo precejšnje zmanjšanje polja v primeru uporabe zračne reže.



Material	Maximum Operating Temperature	Maximum Magnetic Energy	Relative Cost	Resistance to Demagnetization
NdFeB	150°C	48 MGOe	High	High
SmCo	300°C	32 MGOe	Very High	Very High
NeoForm™ Bonded NdFeB	150°C	10 MGOe	High	High
Alnico	550°C	7.5 MGOe	Moderate	Low
Ceramic Ferrite	300°C	4 MGOe	Very Low	Moderate



**SLIKA:** Primer grafa iz prospekta podjetja Dexter, ki prikazuje demagnetizacijske krivulje najpogosteje uporabljenih materialov za trajne magnete. Opazimo lahko tudi vztrajanje proizvajalcev pri starih (nedovoljenih) enotah za gostoto magnetnega pretoka in magnetno poljsko jakost, kar pa običajno podajo v dodatni preglednici, glej naslednjo sliko. Pogosto odločitev o uporabi določenega materiala za trajni magnet ne temelji na kakovosti magneta pač pa na ceni: izberemo tak material, ki še zadovoljuje naše potrebe in je cenen.

	CGS unit	SI unit	Conversion Factors
Permeability of Free Space	Unity	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{WbA}^{-1}\text{m}^{-1}$	
Induction in Free Space (Field)	B gauss (G)	$B_0$ Tesla (T)	1G = $10^{-4}$ T
Magnetic Field Strength	H Oersted (Oe)	H ( $\text{Am}^{-1}$ )	1Oe = $79.58 \text{Am}^{-1}$
Induction in Free Space	$B = H$	$B_0 = \mu_0 H$	1G = $10^{-4}$ T
Induction in Medium	$B = H + 4\pi M$	$B = B_0 + \mu_0 M = \mu_0 (H + M)$	1G = $10^{-4}$ T
Magnetization per Unit Volume	M (erg Oe $^{-1}$ cm $^{-3}$ ) (emu cm $^{-3}$ )	M ( $\text{kJT}^{-1}\text{m}^{-3}$ )	1emu cm $^{-3}$ = $1 \text{kJT}^{-1}\text{m}^{-3}$
Maximum Energy Product	$(BH)_{\text{max}}$ (MGOe)	$(BH)_{\text{max}}$ ( $\text{kJm}^{-3}$ )	1MGOe = $7.958 \text{kJm}^{-3}$

**SLIKA: Preglednica, ki se uporablja za pretvorbo med starimi (žal še vedno v praksi uporabljanimi) CGS enotami in mednarodno sprejetim sistemom SI enot (iz kataloga podjetja Dexter: [www.dextermag.com](http://www.dextermag.com)).**

**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