

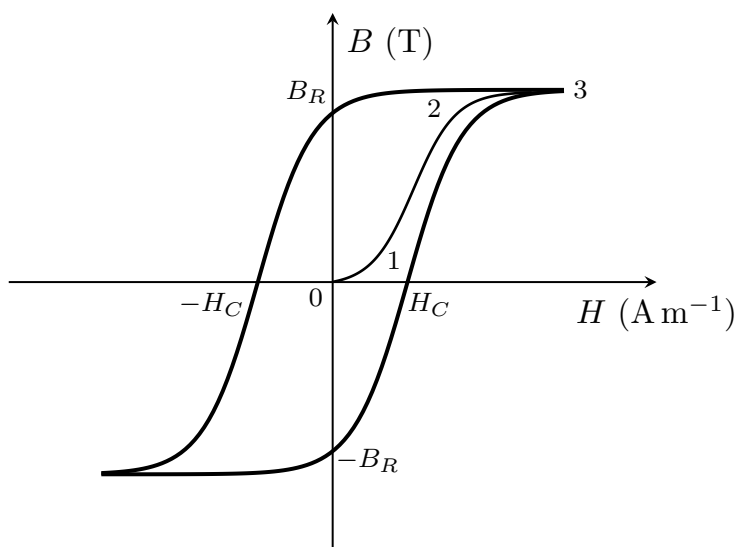
Feromagnetizem

Uvod

Železo, nikelj, kobalt in nekatere spojine in zlitine, med katerimi so pomembni materiali AlNiCo, SaCo in NdB oksidi, so feromagnetne. Magnetna permeabilnost μ teh snovi je mnogo večja od 1, vendar ni konstantna in se spreminja z jakostjo magnetnega polja H . Zveza med gostoto magnetnega polja v snovi B in med jakostjo polja H je v splošnem nelinearna, zato magnetno permeabilnost μ definiramo kot diferencialni kvocient

$$\mu(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}, \quad (1)$$

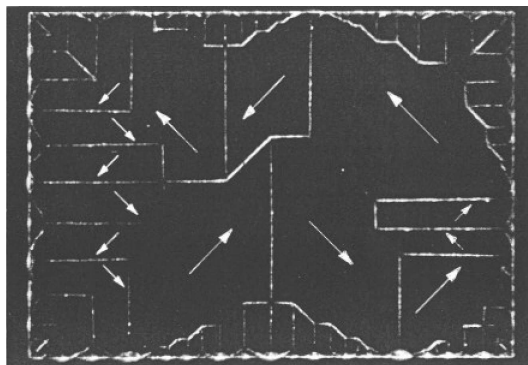
kjer je μ_0 induksijska konstanta. Pomembne podatke, ki jih hočemo poznati za feromagnetne snovi, lahko preberemo iz magnetilne in histerezne krivulje, t.j. odvisnosti $B(H)$, ki je prikazana na sliki 1. Magnetilna krivulja opiše potek $B(H)$, če izhajamo iz popolnoma razmagnetnega stanja, nasičena histerezna zanka pa predstavlja odvisnost $B(H)$ pri ponavljajočem se magnetenju izmenoma v eno in drugo smer, pri čemer mora biti jakost polja dovolj velika, da dosežemo največjo možno namagnetenje snovi.



Slika 1: Feromagnetna magnetilna krivulja (1-2-3) in nasičena histerezna krivulja. Narisana je odvisnost $B(H)$, označene pa so vrednosti jakosti koercitivnega polja H_C in remanentne gostote magnetnega polja v snovi B_R .

Feromagnetna snov je magnetizirana tudi tedaj, ko ni v zunanjem magnetnem polju. Magnetizacija je posledica urejenih magnetnih momentov ionov v kristalu feromagnetne snovi. Med temi magnetnimi momenti deluje tako imenovana "izmenjalna interakcija", ki je kvantne narave. Le redko so vsi magnetni momenti v makroskopskem kosu feromagnetnega materiala vzporedni, ker se takrat zunaj snovi pojavi magnetno polje, kar zahteva določeno energijo. V snovi zato nastanejo področja - domene, ki imajo različne smeri magnetizacije. To je tudi lepo prikazano na sliki 2. Energija magnetnega polja je najmanjša, če imajo domene tako obliko, da se magnetni pretok sklene znotraj snovi. V

feromagnetu, ki še ni bil namagneten, je tako magnetni pretok sklenjen znotraj feromagneta. Ko damo tak material v magnetno polje, se tiste domene, katerih magnetizacija kaže približno v smeri zunanega polja, povečajo na račun ostalih. Pri dovolj velikih jakostih magnetnega polja se magnetizacija v vseh domenah uredi v smeri zunanega polja. Zmanjša se tudi število domen, ker se posamezne domene združujejo in domenske stene med njimi izginjajo, ta proces pa je odvisen predvsem od vrste materiala.



Slika 2: Posnetek feromagnetnih domen na ploščici kristala niklja Ni. S puščicami so narisane usmeritve magnetizacije v domenah. (vir [1])

Ko manjšamo jakost magnetnega polja, je v splošnem odvisnost $B(H)$ drugačna kot pri povečevanju. Temu pojavu pravimo histereza. Pri $H = 0$ gostota polja B ne pade na nič, ker lahko domene še vedno ostanejo delno urejene. Vrednosti B_R pri $H = 0$ rečemo remanentna gostota magnetnega polja. Gostoto B spravimo na nič šele, če delujemo na snov z magnetnim poljem v obratni smeri. Jakost polja, ki je za to potrebna, se imenuje koercitivna jakost magnetnega polja H_C in jo odčitamo iz histerezne krivulje. Vendar je potrebno opozoriti, da na ta način (z uporabo polja v obratni smeri) ne moremo dobro razmagnetiti snovi. Če bi v točki $B = 0$, $H = -H_C$ izklopili zunanje polje, bi se gostota B vrnila na vrednost različno od 0. Za razmagnetenje navadno uporabimo pojemajoče izmenično magnetno polje. Celotno histerezno krivuljo izmerimo tako, da posnamemo eno krožno spremembo $B(H)$, pri čemer moramo tako v pozitivni, kakor tudi v negativni smeri doseči jakosti magnetnega polja precej večje od H_C . Feromagnetne snovi imajo zelo različna parametra B_R in H_C , ki karakterizirata histerezno zanko. Snovi s široko histerezno zanko (velike vrednosti B_R in H_C) uporabljamo za trajne magnete, snovi z ozko in strmo zanko (majhna B_R in H_C) pa za jedra transformatorjev.

Sklenjeni magnetni krog Magnetni krogi so navadno sestavljeni iz različnih feromagnetnih materialov, npr. permanentnih magnetov z enostavno geometrijo, mehkih magnetnih materialov, ki vodijo magnetne silnice in tankih zračnih rež. Primerov uporabe takih krogov je mnogo, omenimo naj le električne generatorje, motorje in zvočnike. Idealen sklenjeni krog je toroid. Zapletenejši, a še vedno dovolj enostaven je magnetni krog iz ene vrste feromagnetnega materiala, ki ima tanko režo. Poglejmo si opis magnetnega pretoka po takem krogu iz feromagneta s konstantnim presekom in z majhno režo z enakim presekom S .

Na feromagnetno jedro naj bo navita tuljava z n ovoji, po kateri teče tok I . Za magnetno napetost $U_m = \int \vec{H} d\vec{s}$ velja, da je v sklenjenem krogu enaka vsoti objetih električnih

tokov, tako da velja

$$U_m = \oint \vec{H} d\vec{s} = \sum I = nI. \quad (2)$$

V našem primeru integriramo po zanki, ki poteka večinoma v feromagnetnem jedru, malo pa v reži,

$$U_m = U_{\text{fero}} + U_{\text{reža}} = LH_{\text{fero}} + xH_{\text{reža}} = nI, \quad (3)$$

kjer je L dolžina feromagnetnega jarma in x širina reže. Magnetni pretok Φ_m je v reži in v jedru enak, kar zapišemo kot

$$\Phi_m = SB_{\text{fero}} = SB_{\text{reža}}, \quad (4)$$

in nam pove, da sta enaki tudi gostoti magnetnega polja v feromagnetu in reži. Enačbi (3) in (4) sta enolično rešljivi le v primeru, da nimamo histereze, da je torej zveza $B(H)$ v feromagnetu enolična. Zvezo $B(H)$ lahko v splošnem preberemo iz histerezne krivulje, če seveda poznamo zgodovino materiala. V reži pa zvezo $B_{\text{reža}} = \mu_0 H_{\text{reža}}$ seveda poznamo. Oglejmo si enostavnejši primer.

Ko v tuljavi nimamo električnega toka ($I = 0$), sta jakosti polj v feromagnetu in v reži lahko še vedno različni od 0 in ob upoštevanju enačbe (3) dobimo zvezo

$$H_{\text{reža}} = -\frac{L}{x} H_{\text{fero}}, \quad (5)$$

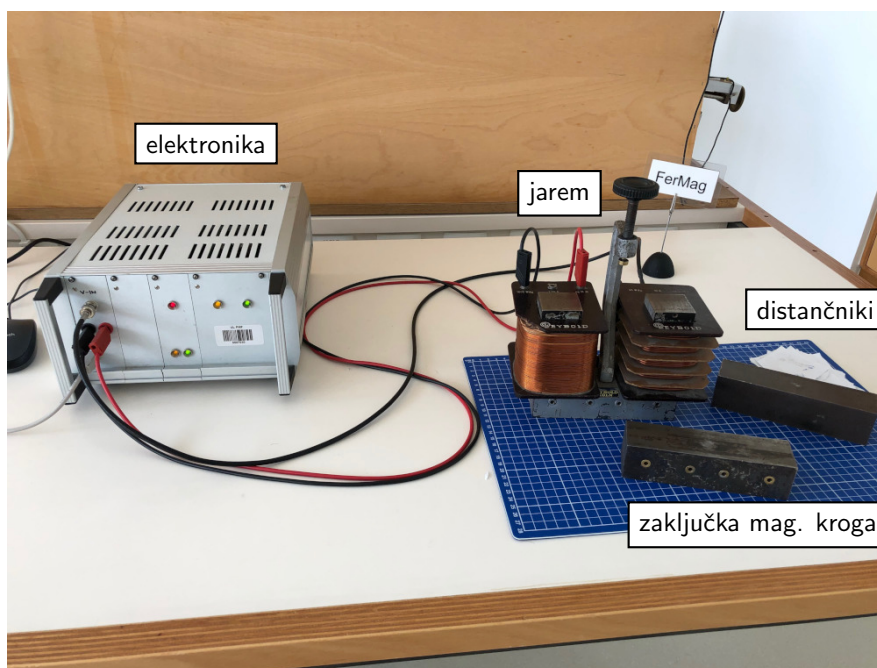
ki pove, da ima jakost polja v reži nasproten predznak in je precej večja od jakosti polja v feromagnetu. Za gostoti polja pa vemo že od prej, da morata biti v feromagnetu in v reži enaki. Zato lahko enačbo (5) zapišemo le s količinama $B(H)$ v feromagnetu in dobimo

$$B_{\text{fero}} = -\mu_0 \frac{L}{x} H_{\text{fero}}, \quad (6)$$

kar nam pove, da ležijo možna stanja našega sistema na premici, katere strmina je odvisna od razmerja med širino reže in dolžino feromagnetnega jarma, predznaka gostote in jakosti polja v feromagnetu sta nasprotna, zato jakost polja v namagnetnem feromagnetu navadno imenujemo demagnetizacijsko polje. Največje možno polje v reži preberemo iz histerezne krivulje kot presečišče med njo in med premico podano z enačbo (6). Za tanke reže je vrednost $B_{\text{reža}} = B_{\text{fero}} = B_R$ približno enaka remanentni gostoti magnetnega polja v feromagnetu.

Potrebščine

- transformatorski krog (jarem), zaključek magnetnega kroga iz transformatorskega jekla in iz železa,
- distančniki,
- primarna tuljava ($N_1 = 1000$) in sekundarna tuljava ($N_2 = 46$),
- elektronsko procesno vezje v škatli, ki je povezano preko USB povezave z računalnikom



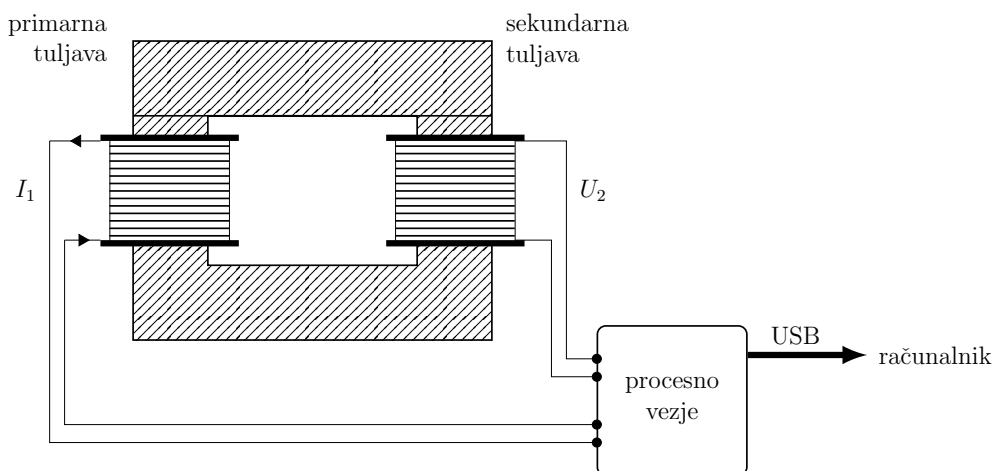
Slika 3: Postavitev eksperimenta z označenimi potrebščinami.

Naloga

1. Izmeri histerezno zanko transformatorskega jekla.
2. Določi vrednosti gostote magnetnega polja v reži magnetnega kroga sestavljenega iz transformatorskega jekla, kot funkcijo debeline reže, in toka napajanja. Primerjaj izmerjeni rezultat $B_{\text{reža}}$ pri $I = 0$ z vrednostjo, ki jo določiš iz prej izmerjene histerezne krivulje.
3. Izmeri histerezno krivuljo za magnetni krog sestavljen iz dveh delov. Prvi del je transformatorsko jeklo, drugi del je masivni kos železa. Dodatno: Izračunaj histerezno krivuljo kosa masivnega železa.

Navodilo

Osnova magnetnega kroga je transformatorski jarem oblike U, slika 4. Na njem sta dve tuljavi, od katerih eno napajamo preko izvora konstantnega toka, v drugi pa merimo inducirano napetost, kadar spreminjamo razmere v krogu. Magnetni krog zaključimo s priloženimi kosi transformatorskega jekla ali masivnega železa, z distančniki pa lahko izbiramo širino zračne reže (oz. reže iz nemagnetnega materiala s permeabilnostjo 1). Osrednji del merilne naprave je procesno vezje, vgrajeno v škatlico in preko USB povezave priključeno na računalnik. V grobem je procesno vezje sestavljeno iz dveh delov: regulatorja toka skozi primarno tuljavo in sledilnika napetosti na sekundarni tuljavi. Računalnik lahko prejema in posreduje podatke le v digitalni obliki, zato regulator toka vsebuje še DA (digitalno-analogni) pretvornik, sledilec napetosti pa AD (analogno-digitalni) pretvornik. S programom na računalniku krmilimo tok I_1 skozi primarno tuljavo in obenem zajemamo inducirano napetost U_2 . Pred začetkom meritev procesno



Slika 4: Shema vezave obeh tuljav nameščenih na feromagnetnem obroču s procesnim vezjem in le-tega z osebnim računalnikom. Na primarni tuljavi vsiljujemo tok I_1 in na sekundarni merimo inducirano napetost U_2 .

vezje vklopimo in ob zaključku meritev izklopimo.

Inducirana napetost v merilni/sekundarni tuljavi meri spremembe magnetnega pretoka v magnetnem krogu in zato velja

$$U_2 = \frac{d\Phi_m}{dt}. \quad (7)$$

Celotno gostoto magnetnega polja $B(t)$ torej lahko dobimo iz integrala inducirane napetosti po času in iz znanega preseka magnetnega kroga S kot

$$B(t) = \frac{1}{SN_2} \int_0^t U_2(t') dt' + B_0, \quad (8)$$

kjer je B_0 začetna vrednost. Gornji integral je izveden popolnoma digitalno s programom **FerMag** na prenosniku, ki nam vrne vrednost

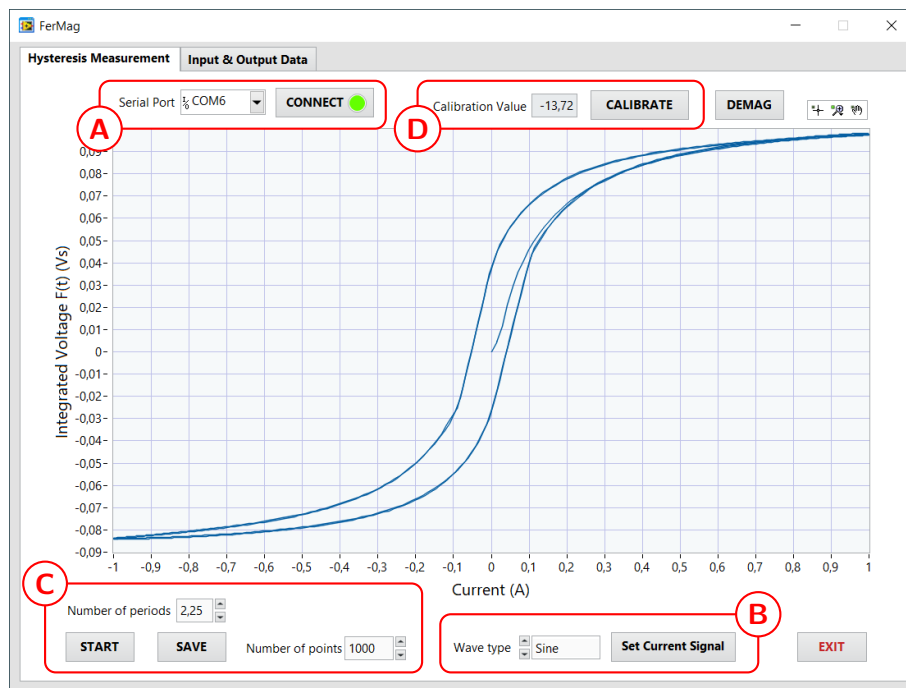
$$F(t) = \int_0^t U_2(t') dt' + F_0, \quad (9)$$

pri čemer je F_0 začetna vrednost na integratorju. Vrednost iz integratorja $F(t)$, ki nam jo poda program, umerimo z relacijo $B(t) = \frac{1}{SN_2} F(t) + B_0$. Konstanto B_0 določimo tako, da je nasičena histerezna krivulja simetrična glede na inverzijo ($B \rightarrow -B$ in $H \rightarrow -H$).



Program **FerMag** se nahaja na namizju uporabnika **student** z geslom **praktikum2**. Slika 5 prikazuje glavno okno programa **FerMag** z oznakami razlag delov programa.

- A.** V glavnem oknu programa najprej iz seznama izberemo serijski vmesnik (**Serial Port**), običajno je to **COM6** in nato **Connect**. Ko je povezava s procesno elektroniko vzpostavljena, se omogočijo vsi ostali gumbi v oknu programa.
- B.** V naslednjem koraku izberemo profil toka (**Wave type**) iz seznama profilov, ki so na voljo. Za začetek priporočamo sinusni (**Sine**) profil toka, kasneje lahko poizkušiš tudi ostale profile. Nato s pritiskom na gumb **Set Current Signal** program



Slika 5: Okno programa FerMag z oznakami razlag delov programa uporabljenih v tekstu.

pošlje izbrani profil v procesno elektroniko, kar traja nekaj sekund. **Opomba:** Priporočamo, da pred vsako meritvijo histerezne zanke magnetni krog najprej demagnetiziraš s pritiskom na gumb Demag.

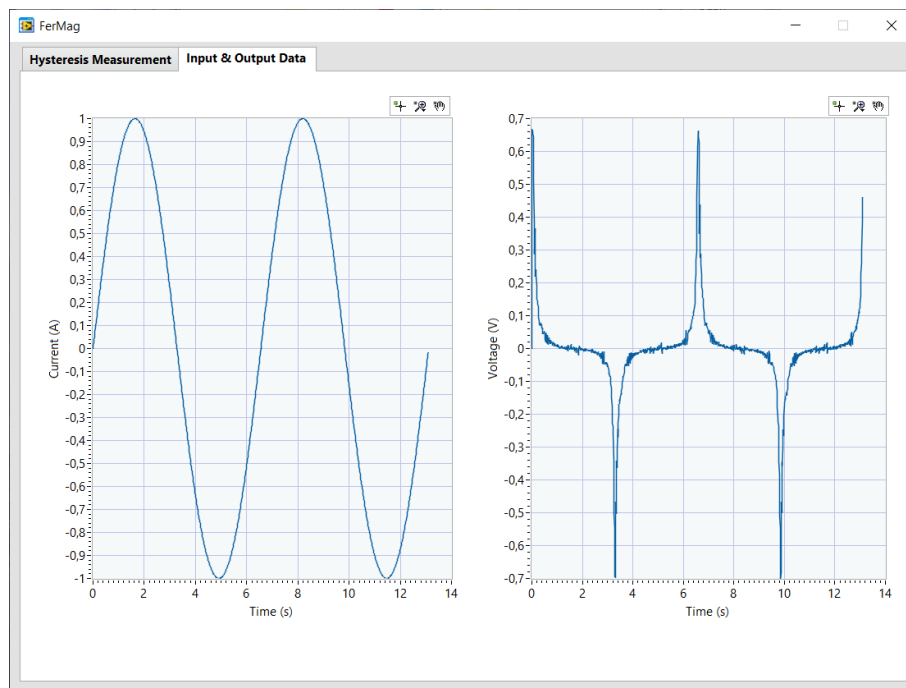
- C. Sedaj najprej izbereš število ponovitev izbranega profila (Number of periods), kjer je priporočeno število 2.25, da se izmeri celotna histerezna zanka (premišljaj zakaj 1 ponovitev ne zadostuje). Z izbiro števila točk (Number of points) lahko določiš koliko točk celotne meritve se dejansko prikaže na grafu - priporočeno število je 1000. Končno s pritiskom na Start izvedeš celo meritev: procesna elektronika generira tok $I_1(t)$, bere inducirano napetost $U_2(t)$ in slednjo nato integriramo numerično v $F(t)$

$$F(t) \doteq \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} U_2(n\Delta t) + F_0, \quad N = \left\lfloor \frac{t}{\Delta t} \right\rfloor, \quad (10)$$

kjer je časovni korak $\Delta t = 10^{-4}$ s in oznaka $\lfloor \bullet \rfloor$ pomeni celi del števila. Meritev traja približno minuto, tako da počakaj dokler se na grafu ne prikaže rezultat meritve (histerezna zanka). Izbrani vhodni tok $I_1(t)$ ter izmerjena inducirana napetost $U_2(t)$ sta prikazana v zavihku Input & Output Data, slika 6.

Če je meritev uspela, jo shrani s pritiskom na gumb Save v glavnem oknu programa, slika 5. Meritve v datoteki so organizirane v štiri stolpce: prvi predstavlja čas t [s], drugi tok $I_1(t)$ [A], tretji inducirano napetost $U_2(t)$ [V] in četrti integrirano inducirano napetost $F(t)$ [Vs]. Datoteka se privzeto shrani v mapo FerMag na namizju uporabnika student.

- D. V primeru, da pri meritvi histerezne zanke z dvema ponovitvama profila toka opaziš dve zamaknjeni histerezni krivulji, je potrebno znova poiskati kalibracijsko konstanto. To narediš tako, da pritisneš gumb Calibrate in počakaš dokler



Slika 6: Okno programa FerMag z odprtim zavihkom **Input & Output Data**, kjer sta prikazana izbrani vhodni tok $I_1(t)$ (levo) in izmerjena inducirana napetost $U_2(t)$ (desno).

program ne sporoči, da je bila kalibracija zaključena, kar traja nekaj minut. Kalibracija poteka tako, da se izmeri 5 ponovitev sinusnega profila toka in s tem 5 histereznih krivulj. Nato se avtomatično izmeri zamik med histereznimi krivuljami, kar se uporabi kot kalibracijski parameter. Po kalibraciji ponovi meritev: najprej demagnetiziraj sistem, nato šele izmeri histerežno krivuljo kot je razloženo pod točko **C**.

Obdelava meritev

1. Nariši histerežno krivuljo transformatorskega jekla z umerjenimi osmi. Os Y umeri kot je opisano v gornjem besedilu in os X s pomočjo naslednje enačbe

$$H = \frac{N_1 I_1}{L}, \quad (11)$$

kjer je L efektivna (srednja) dolžina magnetnega kroga (jarma), ki jo je tudi potrebno izmeriti.

2. Sestavi magnetni krog iz transformatorskega jekla in pusti tanko (npr. 0.1 mm) režo med dvema deloma. Koščki papirja dobro služijo temu namenu. Nariši histerežno krivuljo takega kroga. Os Y umeri enako kot prej. Os X pa umeri v enotah magnetne napetosti $U_m = N_1 I_1$. Iz krivulje odčitaj vrednost gostote magnetnega polja pri $U_m = 0$ (torej tudi $I_1 = 0$), ki je enaka gostoti magnetnega polja v reži, ki ga povzroča namagneteno jeklo. Primerjaj to vrednost s tisto, ki jo določiš iz enačbe (6) in izmerjene histerezne krivulje transformatorskega jekla.

3. Izriši histerezo krivuljo za magnetni krog sestavljen iz dveh delov, fiksnega dela iz transformatorskega jekla in dodatnega kosa iz masivnega železa. Os Y umeri enako kot prej. Z osjo X je problem bolj zapleten in vrednosti na njej ne moremo direktno povezati z jakostjo polja v enem ali drugem feromagnetnem materialu, pač pa velja

$$U_m = H_1 L_1 + H_2 L_2 = N_1 I_1, \quad (12)$$

zato to os umeri v enotah magnetne napetost U_m .

Kako bi iz vseh meritev, ki si jih opraviš doslej, določil histerezo krivuljo kosa železa?

Literatura

- [1] Charles Kittel. *Introduction to solid state physics*. New York [etc.] : John Wiley, 1986.