Magnetska svojstva amorfnih feromagneta

Miloloža, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:609855

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek







SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



HRVOJE MILOLOŽA

MAGNETSKA SVOJSTVA AMORFNIH FEROMAGNETA

Diplomski rad

Osijek, 2016.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



HRVOJE MILOLOŽA

MAGNETSKA SVOJSTVA AMORFNIH FEROMAGNETA

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja akademskog naziva magistra edukacije fizike i informatike

Osijek, 2016.

Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Zahvaljujem se dr. sc. Đuri Drobcu s Instituta za fiziku u Zagrebu na savjetima oko mjerenja i obrade podataka te znanstveno-istraživačkoj grupi prof. dr. sc. Emila Babića na zavojnicama za mjerenje magnetskih svojstava.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Povijest magnetizma 2
3. Magnetska svojstva materijala 4
3.1 Dijamagnetizam 7
3.2 Paramagnetizam 8
3.3 Feromagnetizam 10
3.3.1 Weissova teorija feromagneta 11
3.4 Ferimagnetizam 16
3.5 Antiferomagnetizam 17
4. Karakteristična svojstva feromagnetskih materijala 18
4.1 Magnetska anizotropija 18
4.2 Krivulja magnetiziranja i petlja histereze 19
4.3 Magnetostrikcija 23
4.4 Gubici magnetiziranja 24
5. Magnetska svojstva amorfnih feromagneta 25
5.1 Amorfni materijali 25
5.2 Mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagnetskih vrpci 27
6. Metodička jedinica 33
7. Zaključak 42
8. Literatura 43
Životopis 44
Dodatak A: O programu LabVIEW vii
Dodatak B: Automatizacija mjerenja pomoću programa LabVIEW i Excel viii

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Diplomski rad

Odjel za fiziku

MAGNETSKA SVOJSTVA AMORFNIH FEROMAGNETA

HRVOJE MILOLOŽA

Sažetak

Proučavanje magnetskih svojstava amorfnih feromagneta vrlo je aktualno zbog njihove velike tehnološke primjene. U radu je ukratko opisana povijest magnetizma, dane su osnove teorije magnetizma s posebnim naglaskom na feromagnete, način proizvodnje amorfnih feromagneta te eksperimentalni postav za mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagnetskih vrpci pomoću programa LabVIEW i Excel. Dan je i detaljan opis koda za usrednjavanje signala. Obrađena je nastavna jedinica *Elektromagnetska indukacija i Lenzovo pravilo*.

(43 stranice, 30 slika, 15 literaturnih navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: feromagneti / magnetizacija / histereza

Mentor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, predsjednica

doc. dr. sc. Denis Stanić, mentor

izv. prof. dr. sc. Ramir Ristić, član

Rad prihvaćen: 8.2.2016.

J. J. Strossmayer University in Osijek
Department of Physics

Bachelor of Science Thesis

MAGNETIC PROPERTIES OF AMORPHOUS FERROMAGNETS

HRVOJE MILOLOŽA

Abstract

The study of the magnetic properties of amorphous ferromagnets is very actual because of many technological applications. This thesis briefly describes the history of magnetism, the fundamentals of theory of magnetism with special emphasis on ferromagnets, the method of production of amorphous ferromagnets and the experimental setup for measuring the magnetic properties of ferromagnetic amorphous ribbons using LabVIEW and Excel. In the end there is a detailed description of the LabVIEW's code for signal averaging. Finally, there is a teaching preparation on the subject of electromagnetic induction and Lenz's law.

(43 pages, 30 figures, 15 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: ferromagnets / magnetisation / hysteresis loop

Supervisor: doc. dr. sc. Denis Stanić

Reviewers: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, president
doc. dr. sc. Denis Stanić, supervisor
izv. prof. dr. sc. Ramir Ristić, member

Thesis accepted: 8.2.2016.

1. Uvod

Elektromagnetizam je jedna od temeljnih grana klasične fizike. Proučava međusobni odnos električnih i magnetskih pojava te objašnjava sve vrste elektromagnetskih valova i zakone geometrijske optike [1]. Najveći razvoj elektromagnetizma dogodio se u 19. stoljeću kada su otkrivene temeljne zakonitosti tog područja. Magnetizam je grana elektromagnetizma koja se bavi proučavanjem pojava vezanih s magnetskim silama i magnetskim poljima te s gibanjem električki nabijenih čestica.

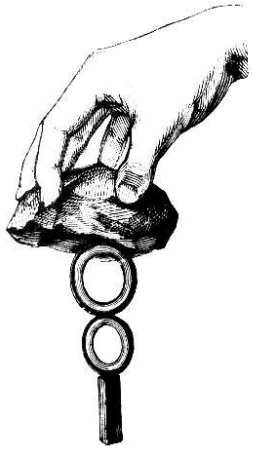
Razumijevanje elektromagnetskih pojava omogućilo je razvoj čitavih tehničkih područja poput elektrotehnike, elektronike i informacijske tehnologije [1]. Kao posljedica toga došlo je do uspona modernog društva koje se temelji na primjeni elektromagnetskih pojava. Uređaji poput elektromotora, televizora, računala, mikrovalnih pećnica, zvučnika i mnogih drugih oslanjaju se na primjenu znanja iz elektromagnetizma [2]. Valja napomenuti da pojava elektromagnetske indukcije čini temelj proizvodnje električne energije.

Proučavanje magnetskih svojstava tvari vrlo je aktualno. Posebice su u centru pažnje amorfne slitine feromagnetskih materijala zbog velike mogućnosti manipuliranja njihovim fizikalnim svojstvima. Ovisno o dobivenim magnetskim svojstvima ovi materijali se koriste za izradu transformatora, električnih generatora i motora, zvučnika, mikrofona itd.

Cilj ovoga rada je opisati magnetska svojstva materijala te osposobiti eksperimentalni postav za mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagneta.

2. Povijest magnetizma

Podaci o poznavanju magneta mogu se pronaći u svim drevnim civilizacijama od Egipta do Kine [3]. Pretpostavlja se da su Kinezi koristili magnetsku iglu oko 2500. godine pr.n.e., no o tome nema pisanih tragova [4]. Najviše pisanih tragova o ranim pokušajima objašnjenja magnetskih pojava ostavila je antička Grčka civilizacija. Grcima je bilo poznato da je prirodni magnet ruda od koje se dobiva željezo te da on privlači željezo. Poznata je legenda o pastiru Magnesu s otoka Krete kojemu se se čavli iz sandala prilijepili za željeznu rudu. Grci nisu uočili uzajamnost privlačenja prirodnog magneta i željeza kao ni njihovo odbijanje. Prvi su dali kvalitativno objašnjenje privlačenja željeza. Tales (624?-547? g.pr.n.e.) je smatrao da magnet ima dušu jer privlači željezo. Empedoklo (490.-435. g.pr.n.e.) je privlačenje željeza tumačio istjecanjem tvarnih čestica određene veličine iz magneta, a Demokrit (460.-370. g.pr.n.e.) je u tim česticama prepoznao atome. Tvrdio je da se magnet i željezo sastoje od sličnih atoma pa se prema tome privlače jer se sve giba prema onome što je iste naravi [5]. Grci su uočili da se svojstvo privlačenja prenosi na željezo pa je tako Sokrat (469.-399. g.pr.n.e.) rekao: „*Ovaj kamen ne privlači samo željezni kolut, nego mu također predaje svoju silu, tako da taj kolut opet privlači drugi željezni kolut, i na taj način nekoliko željeznih komadića može zajedno visjeti; to se događa jedino silom magneta*“ [6]. Rimljanin Lukrecije (98.-55. g.pr.n.e.) je prvi spomenuo odbijanje željeza od magneta, no nije dao objašnjenje toj pojavi [5].



Slika 1: Uz Sokratovu izjavu o sili magneta. [5]

Korištenje kompasa tijekom srednjega vijeka dalo je poticaj daljnjem proučavanju magnetizma. Tako je 1269. godine Pierre Maricurt, poznat kao Petrus Peregrinus, izdao raspravu o magnetizmu u kojoj je zabilježio da se istoimeni magnetski polovi odbijaju te da su dijelovi

magneta opet potpuni magneti [6]. Najveći doprinos razvoju magnetizma dao je William Gilbert (1540.-1603.) djelom *De magnete* u kojemu je opisao i objasnio više od 600 pokusa. Zaključio je da na magnetsku iglu djeluju magnetski polovi Zemlje koja je i sama veliki magnet. Na temelju pokusa je zaključio da se ne može dobiti magnet s jednim polom [5].

Prvi pokušaj povezivanja elektriciteta i magnetizma potječe od Franza Aepinusa (1724.-1802.) koji je pretpostavio postojanje magnetskog fluida čije čestice međudjeluju s tvari, a čestice tvari među sobom djeluju privlačnim i odbojnim silama. Povlačeći analogiju sa zakonom gravitacije pretpostavio je da sila odbijanja magnetskih tijela opada s kvadratom udaljenosti [5]. Tu pretpostavku je 1785. godine potvrdio Charles Augustin Coulomb (1736.-1806.) svojim pokusima s torzijskom vagom. Hans Christian Oersted (1777.-1851.) je 1820. godine eksperimentalno pokazao povezanost elektriciteta i magnetizma u pokusima s otklonom magnetske igle u blizini vodiča kojim teče električna struja. Time je demonstrirano da električna struja stvara oko sebe magnetsko polje. Radovima Jean-Baptista Biota (1774.-1862.) i Felixa Savarta (1791.-1841.) otkriven je zakon za jakost magnetskog polja električne struje. Andre Marie Ampere (1775.-1836.) je postavio molekularnu teoriju magnetizma. Uočivši da se kružni tok struje ponaša kao magnet pretpostavio je da u molekulama željeza stalno teku kružne struje pa se molekule ponašaju kao magneti. Smatrao je da se magnet sastoji od mnoštva poredanih malih magneta te da ne postoji magnetski fluid već se magnetske pojave mogu objasniti elektrodinamičkim djelovanjem. Michael Faraday (1791.-1867.) je 1831. godine otkrio pojavu elektromagnetske indukcije kojom je dodatno povezao elektrostatiku s magnetizmom. Sve dotadašnje spoznaje o elektricitetu i magnetizmu je 1873. godine u jedinstvenu teoriju povezao James Clerk Maxwell (1831.-1879.). Njegovim radom je dovršen razvoj klasične elektrodinamike.

Daljni razvoj magnetizma vezan je uz razvoj kvantne mehanike i eksperimentalne fizike. Kvantna mehanika omogućila je točan opis dijamagnetizma i paramagnetizma te konceptualno razumijevanje feromagnetizma. Pri tome je veliku ulogu odigrala Weissova teorija feromagnetizma o kojoj će biti riječi u poglavlju 3.3.1.

3. Magnetska svojstva materijala

Struktura atoma određuje magnetska svojstva materijala. Negativno nabijeni elektron koji kruži oko pozitivno nabijene jezgre predstavlja elementarnu strujnu petlju koja proizvodi magnetsko polje. U mnogim materijalima ove strujne petlje su nasumično orijentirane te je ukupno magnetsko polje koje one proizvode jednako nuli. Kod nekih materijala vanjsko magnetsko polje može uzrokovati poravnavanje strujnih petlji s poljem pa njihovo magnetsko polje tada doprinosi vanjskom magnetskom polju. Za takav materijal kažemo da je magnetiziran.

Prema pojednostavljenoj slici atoma negativno nabijeni elektron mase m_e giba se po kružnoj putanji polumjera *r* brzinom *v* oko pozitivno nabijene jezgre. Takvo gibanje predstavlja strujnu petlju kojoj možemo pridružiti magnetski dipolni moment

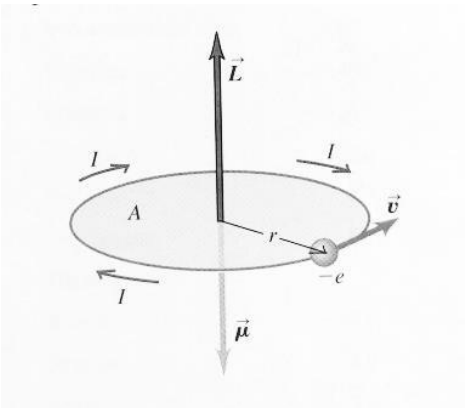
$$\mu_L = IA, \tag{3.1}$$

gdje je *I* jakost električne struje, a *A* površina strujne petlje. Uvrštavajući poznate izraze za jakost struje $I = \frac{Q}{T} = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi r}$ i za površinu kružnice $A = r^2\pi$ izraz (3.1) postaje

$$\mu_L = \frac{evr}{2} = \frac{em_e vr}{2m_e} = \frac{e}{2m_e} L, \tag{3.2}$$

gdje je $L = m_e vr$ kutna količina gibanja elektrona. U vektorskom obliku izraz (3.2) postaje

$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m_e}\vec{L} \tag{3.3}$$



Slika 2: Prikaz magnetnog dipolnog momenta $\vec{\mu}_L$ i kutne količine gibanja $\vec{L}$ elektrona. [2]

Kutna količina gibanja elektrona je kvantizirana veličina s vrijednostima $L = n\frac{h}{2\pi}$, gdje je $h = 6.626 \cdot 10^{-34}\,Js$ Planckova konstanta, a *n* poprima cjelobrojne pozitivne vrijednosti. Uvrštavanjem te relacije za *n*=1 u relaciju (3.2) dobivamo veličinu μ_B, nazvanu Bohrov magneton, koja predstavlja prirodnu jedinicu magnetskog dipolnog momenta elektrona

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_e} = 9.274 \cdot 10^{-24}\,J/T\,. \tag{3.4}$$

Osim kutne količine gibanja $\vec{L}$, magnetskom momentu elektrona pridonosi i spin $\vec{s}$. Spinski magnetski moment elektrona iznosi

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m_e}\vec{s}\,. \tag{3.5}$$

Vidimo da spinski magnetski moment ima jednaku strukturu kao magnetski moment elektrona uz različit faktor proporcionalnosti. Eksperimentom je pokazano da je spinski magnetski moment elektrona za 0,114% veći od Bohrovog magnetona [7].

Jezgra atoma također posjeduje spinski magnetski moment. Budući da je prema relacijama (3.3) i (3.5) magnetski moment obrnuto proporcionalan s masom, slijedi da je nuklearni magnetski dipolni moment puno manji od elektronskoga [8]. Eksperimentom je pokazano da je nuklearni magnetski moment jednak 1/1836 dijelu Bohrovog magnetona. Zbog tog se razloga on često zanemaruje u proračunima.

Ukupan magnetski moment atoma je vektorski zbroj magnetskih momenata $\vec{\mu}_L$ svih elektrona, spinskih magnetskih momenata $\vec{\mu}_s$ svih elektrona i nuklearnog magnetskog momenta jezgre. Ukupan magnetski moment dijela volumena neke tvari jednak je vektorskom zbroju magnetskih momenata svih atoma u tom dijelu volumena. Magnetski moment jediničnog volumena naziva se magnetizacija $\vec{M}$, a mjerna jedinica je A/m.

Kada neku tvar stavimo u vanjsko magnetsko polje $\vec{H}$ ono nastoji poravnali magnetske momente atoma u smjeru polja. Na taj način dolazi do magnetiziranja tvari. Pri tome je često magnetizacija sustava proporcionalna vanjskom magnetskom polju,

$$\vec{M} = \chi\vec{H}\,, \tag{3.6}$$

pri čemu se faktor proporcionalnosti χ [hi] naziva magnetskom susceptibilnošću[1] sustava. Kao posljedica anizotropije kristala magnetizacija može ovisiti o smjeru promatranja pa je magnetska susceptibilnost χ tenzorska veličina te vektori $\vec{M}$ i $\vec{H}$ općenito nisu paralelni . U izotropnim sustavima magnetska susceptibilnost je skalarna veličina te su vektori $\vec{M}$ i $\vec{H}$ paralelni. [9]. Magnetska indukcija, odnosno gustoća magnetskog toka koja prolazi kroz tvar koja se nalazi u vanjskom magnetskom polju $\vec{H}$ dana je s

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} , \tag{3.7}$$

gdje je koeficijent proporcionalnosti μ_0 magnetska permeabilnost[2] vakuuma. Uvrstimo li relaciju (3.6) u relaciju (3.7) slijedi

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} \tag{3.8}$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} \tag{3.9}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} , \tag{3.10}$$

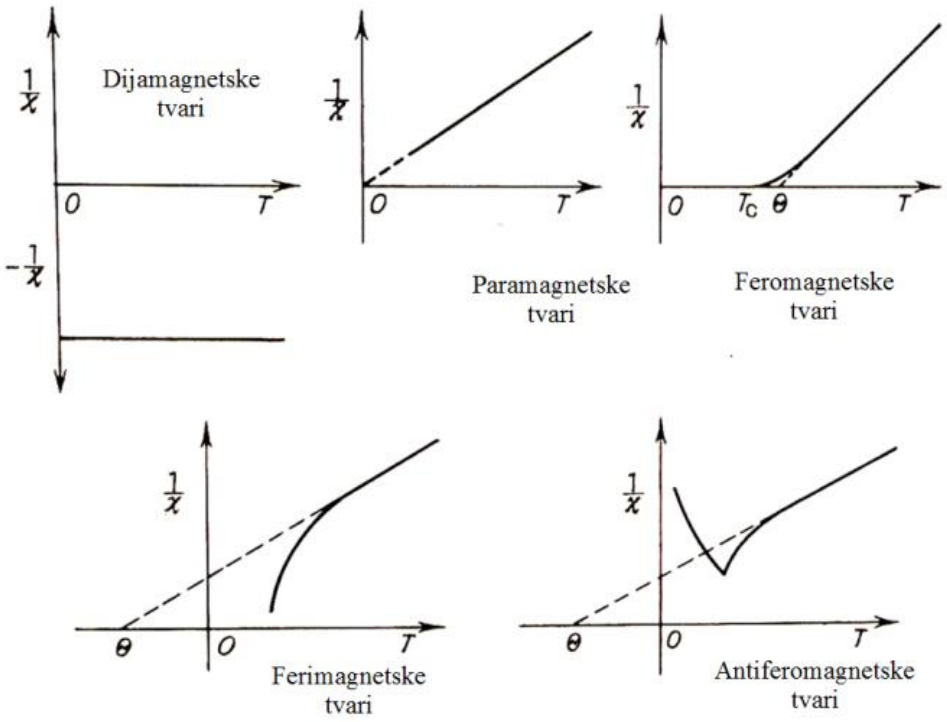
gdje je $\mu_r = (1 + \chi)$ relativna magnetska permeabilnost. Ovaj izraz možemo zapisati u obliku

$$\vec{B} = \mu \vec{H} , \tag{3.11}$$

gdje je $\mu = \mu_0 \mu_r$ (apsolutna) magnetska permeabilnost.

Prema veličini i predznaku magnetske susceptibilnosti (relacija (3.6)) te njene ovisnosti o temperaturi, tvari dijelimo u dijamagnetske, paramagnetske, feromagnetske, ferimagnetske i antiferomagnetske. Na Slici 3 prikazana je ovisnost magnetske susceptibilnosti o temperaturi za svih pet skupina.

[1] *srlat*. susceptibilitas: prijemljiv, prijemčiv (koji lako prima, prihvaća) [8].
[2] *lat*. permeabilis: propusnost, koji je propustan [8].



Slika 3: Prikaz ovisnosti recipročne magnetne susceptibilnosti o temperaturi za dane tvari. [7]

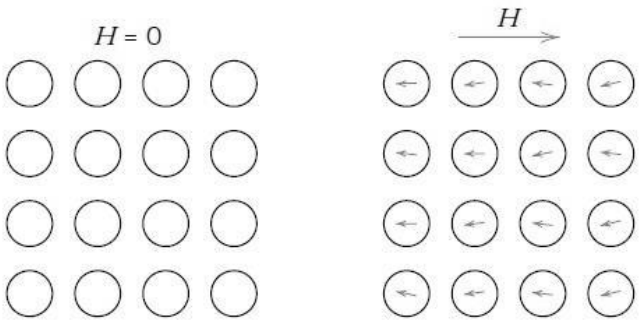
3.1 Dijamagnetizam

Kod dijamagnetskih[3] tvari rezultantni magnetski momenti atoma jednaki su nuli. Magnetska susceptibilnost dijamagnetskih tvari je negativna, vrlo mala (10^{-6} do 10^{-5}) i temperaturno neovisna (vidi Sliku 3),

$$\vec{M} = \chi_d \vec{H} \ , \ \chi_d < 0 \ . \tag{3.12}$$

Stavljanjem dijamagnetske tvari u vanjsko magnetsko polje dolazi do induciranja električne struje koja stvara magnetski dipolni moment, a on se prema Lenzovu pravilu postavlja suprotno od smjera vanjskog magnetskog polja (vidi Sliku 4) [9]. Uslijed toga dolazi do smanjenja djelovanja vanjskog magnetskog polja. Posljedica toga je odbojno međudjelovanja vanjskog magnetskog polja i dijamagnetskih tvari. Inducirane struje teku sve dok postoji vanjsko magnetsko polje jer se elektroni u atomima gibaju bez otpora.

[3] *grč*. di(a): preko [8].

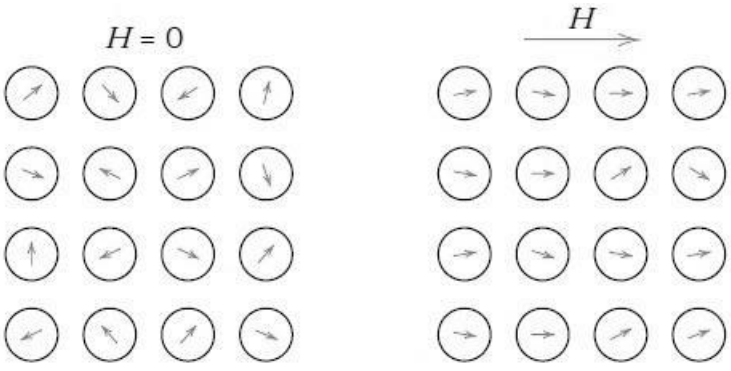


Slika 4: Prikaz magnetskih momenata kod dijamagneta. [10]

Dijamagnetizam postoji u svim tvarima, no njegov učinak dolazi do izražaja samo u tvarima kod kojih nema permanentnih magnetskih dipola. Dijamagnetske tvari su većina nemetala, mnogi organski spojevi, mnogi metali (bakar, zlato, srebro, cink, olovo, živa, bizmut, berilij) i poluvodiči (germanij, silicij, selen) te plinovi (vodik, dušik, plemeniti plinovi) i tekućine (voda) [7]. Supravodiči u supravodljivom stanju također spadaju u dijamagnetske tvari.

3.2 Paramagnetizam

Kod paramagnetskih[4] tvari su rezultantni magnetski momenti atoma različiti od nule. Uslijed toplinskog gibanja atoma njihovi rezultantni magnetski momenti stalno mijenjaju smjer, tako da je ukupni magnetski moment tijela od paramagnetske tvari jednak nuli.



Slika 5: Prikaz magnetskih momenata kod paramagneta. [10]

[4] *grč*. para: nalik, prema [8].

Kada paramagnetsku tvar stavimo u vanjsko magnetsko polje pojedini magnetski momenti se, usprkos toplinskom gibanju, postave u smjeru polja (vidi Sliku 5). Na taj način ukupni magnetski moment paramagnetske tvari postane različit od nule. Nakon uklanjanja vanjskog magnetskog polja magnetski dipoli se ponovno orijentiraju nasumično. Magnetska susceptibilnost paramagnetskih tvari je pozitivna, vrlo mala (10^{-6} do 10^{-3}) i obrnuto proporcionalna apsolutnoj temperaturi (vidi Sliku 3).

$$\vec{M} = \chi_p \vec{H}, \ \chi_p > 0 \tag{3.13}$$

Magnetizacija paramagneta dana je sljedećim izrazom

$$M = N\mu_B \mathrm{th}\frac{\mu_B B}{k_B T}, \tag{3.14}$$

gdje je N koncentracija atoma, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} J/K$ Boltzmannova konstanta, a T apsolutna temperatura. Za $k_B T << \mu_B B$ gornji izraz se može zapisati u obliku

$$M = N\mu_B, \tag{3.15}$$

i predstavlja magnetizaciju zasićenja. U slučaju da vrijedi $k_B T >> \mu_B B$ izraz (3.14) se može zapisati u obliku

$$M = \frac{N{\mu_B}^2}{k_B T} B. \tag{3.16}$$

Primjenimo li vezu $B = \mu_0 H$ gornji izraz postaje

$$M = \frac{N\mu_0{\mu_B}^2}{k_B T} H, \tag{3.17}$$

te dobijemo izraz za magnetsku susceptibilnost paramagneta $\chi_p = M/H$,

$$\chi_p = \frac{N\mu_0{\mu_B}^2}{k_B T}. \tag{3.18}$$

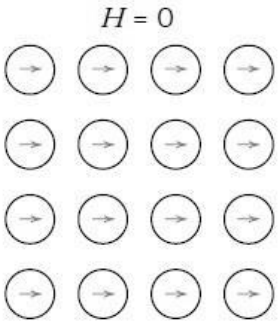
Ovaj izraz poznat je kao Curieov zakon i pokazuje da je paramagnetska susceptibilnost obrnuto proporcionalna s temperaturom.

Orijentiranje magnetskih dipola u smjeru vanjskog magnetskog polja bit će najizraženije pri temperaturi apsolutne nule. Povišenjem temperature povećava se odstupanje magnetskih dipola

od paralelne orijentacije s vanjskim poljem jer termičko gibanje uzrokuje nered u sustavu magnetskih dipola [8]. Paramagnetske tvari su soli metala, alkalni metali, aluminij, magnezij, platina, tantal, volfram te mnogi plinovi (zrak, kisik i dr.) [7].

3.3 Feromagnetizam

Temeljno svojstvo feromagneta[5] je spontana magnetizacija. Naime, pri određenoj udaljenosti atoma ili iona u kristalnoj rešetki nekih metala i slitina dolazi do snažnog međudjelovanja susjednih magnetskih momenata, koje ih nastoji orijentirati paralelno. U malim dijelovima kristala, nazvanim Weissova područja ili domene, svi magnetski momenti su orijentirani u istom smjeru bez djelovanja vanjskog magnetskog polja (vidi Sliku 6). Dakle, domene su spontano magnetizirane.



Slika 6: Prikaz magnetskih momenata unutar domene kod feromagneta. [10]

Magnetska energija je maksimalna u homogenom sustavu te se smanjuje ako sustav podijelimo na više podsustava. Za stvaranje domena potrebna je određena energija. Sustav se dijeli u sve više domena sve dok je smanjenje magnetske energije veće od energije potrebne za stvaranje površinskog sloja između domena. Linearne dimenzije domena su reda veličine 10^{-3} do 10^{-2} cm [9]. Budući da su u nemagnetiziranoj feromagnetskoj tvari domene orijentirane nasumično, ukupni magnetski moment je jednak nuli. Stavljajući feromagnetski materijal u vanjsko magnetsko polje dolazi do povećavanja onih domena čiji je magnetski moment usmjeren u smjeru polja, dok se ostale domene smanjuju (vidi Sliku 17). Već primjenom malih magnetskih polja dolazi do velike magnetizacije feromagnetskih materijala. Daljnjim povećanjem

[5] *lat*. fero: željezo [8].

magnetskog polja dolazi do zasićenja kada su sve domene usmjerene u smjeru magnetskog polja te je postignuta magnetizacija zasićenja M_S.

Magnetska susceptibilnost feromagnetskih materijala je pozitivna (10^0 do 10^6), ovisna o jakosti i frekvenciji magnetskog polja i temperaturi (vidi Sliku 3) [7]. Spontana magnetizacija domene ima maksimalnu vrijednost pri temperaturi apsolutne nule. Tada su svi magnetski dipoli međusobno paralelni. Povećanjem temperature povećava se termičko gibanje atoma te se smanjuje spontana magnetizacija te pri Curieovoj temperaturi pada na nulu. Daljnim povećanjem temperature tvar gubi feromagnetska svojstva i postaje paramagnetska, a susceptibilnost dalje opada po Curie-Weissovom zakonu

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \tag{3.19}$$

gdje je T_C tzv. paramagnetska Curieva temperatura koja je za približno desetak stupnjeva viša od Curieve temperature [7].

Feromagnetske tvari su željezo, nikal, kobalt i gadolinij, niz njihovih slitina, neke slitine neferomagnetskih metala: mangana, bizmuta, bakra, aluminija i kositra.

3.3.1 Weissova teorija feromagneta

Prvo objašnjenje postojanja spontane magnetizacije kod feromagneta ponudio je Pierre Weiss (1865.-1940.). Pretpostavio je da u domeni postoji unutrašnje magnetsko polje (tzv. Weissovo polje $\vec{B}_W$) koje je proporcionalno s magnetizacijom sustava

$$\vec{B}_W = \gamma \vec{M} \tag{3.20}$$

Postojanje Weissovog polja objasnio je Werner Heisenberg (1901.-1976.) kao rezultat spinskog međudjelovanja elektrona u susjednim atomima u domeni. Prema njegovoj teoriji potencijalna energija spinskog međudjelovanja *i*-tog i *j*-tog atoma u domeni dana je s

$$E_{ij} = -2A_{ij}\vec{S}_i\vec{S}_j \tag{3.21}$$

gdje je A_{ij} tzv. integral izmjene koji raste sa stupnjem prekrivanja elektronskih oblaka *i*-tog i *j*-tog atoma, a $\vec{S}_i$ i $\vec{S}_j$ su rezultantni spinovi *i*-tog i *j*-tog atoma. Prekrivanje elektronskih oblaka

praktički je ograničeno samo na susjedne atome unutar domene. Pri temperaturi apsolutne nule spinovi susjednih atoma će se postaviti međusobno paralelno te će izraz (3.21) biti minimalan za $A_{ij} > 0$, tj. integral izmjene je kod feromagneta pozitivan. U osnovnom stanju svi spinovi u domeni bit će orijentirani paralelno. Budući da spin stvara magnetski dipol u unutrašnjosti feromagneta, magnetski dipoli spontano stvaraju vlastito magnetsko polje. Time je objašnjeno postojanje Weissovog polja, a faktor proporcionalnosti γ iz relacije (3.20) izražava jačinu međudjelovanja magnetskih dipola.

Izraz za spontanu magnetizaciju paramagneta $M_S(T)$ na nekoj temperaturi može se dobiti primjenom relacije (3.14) za magnetizaciju paramagneta. Pri tome je vanjsko magnetsko polje B jednako nuli, ali postoji unutrašnje Weissovo polje B_W dano relacijom (3.20). Nakon uvrštavanja dobijemo sljedeći izraz

$$M_S(T) = N\mu_B \mathrm{th}\frac{\mu_B \gamma M_S(T)}{k_B T} \tag{3.22}$$

Za $T \to 0$ gornji izraz se reducira na

$$M_S(0) = N\mu_B \tag{3.23}$$

čime je dana spontana magnetizacija na temperaturi apsolutne nule. Spontana magnetizacija tada postiže maksimum i svi magnetski dipoli u domeni su postavljeni međusobno paralelno izgrađujući snažno unutarnje polje.

Spontanu magnetizaciju pri proizvoljnoj temperaturi manjoj od Curieove temperature možemo izračunati uvodeći pokrate

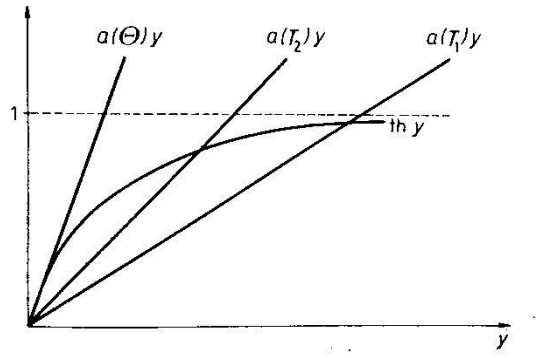
$$a(T) = \frac{k_B T}{N\gamma\mu_B{}^2} \tag{3.24}$$

$$y = \frac{\mu_B \gamma M_S(T)}{k_B T} \tag{3.25}$$

tako da izraz (3.22) možemo zapisati u obliku

$$a(T)y = \mathrm{th}y \tag{3.26}$$

Grafičko rješenje jednadžbe (3.26) prikazano je na Slici 7.



Slika 7: Grafičko rješenje jednadžbe (3.26). [8]

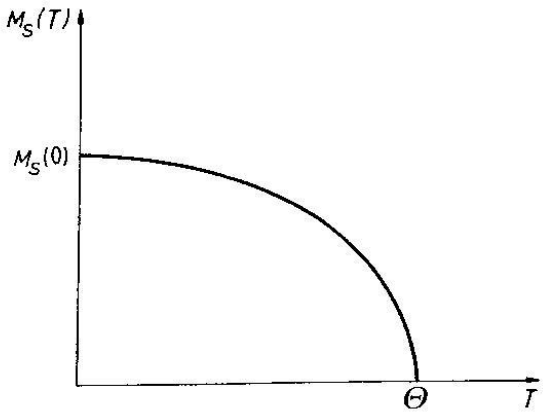
Povišenjem temperature povećava se nagib pravca $a(T)y$ pa se njegovo sjecište s krivuljom $\text{th}y$ približava ishodištu. To znači da se iznos spontane magnetizacije smanjuje s povišenjem temperature. Dolaskom do Curieve temperature Θ spontana magnetizacija iščezava. Pri toj temperaturi pravac $a(\Theta)y$ postaje tangenta na krivulju $\text{th}y$, a feromagnet prelazi u paramegnetsku fazu. Za mali y vrijedi $\text{th}y = y$ pa relacije (3.26) postaje

$$a(\Theta) = 1 \tag{3.27}$$

odakle dobijamo izraz za Curievu temperaturu

$$\Theta = \frac{\gamma N \mu_B{}^2}{k_B} \tag{3.28}$$

Curieva temperatura povećava se s povećanjem spinskog međudjelovanja, odnosno parametra γ. Temperaturana ovisnost spontane magnetizacije u domeni prikazana je na Slici 8.



Slika 8: Ovisnost spontane magnetizacije u domeni o temperaturi. [9]

Oko temperature apsolutne nule spontana magnetizacija sporo opada s povišenjem temperature. Uočava se sve brže opadanje spontane magnetizacije što je temperatura bliže Curieovoj temperaturi. Međudjelovanje magnetskih dipola određuje takvu ovisnost spontane magnetizacije. Prvi dipoli koji se preokreću nalaze se u jakom magnetskom polju svih ostalih dipola pa je za njihovo preokretanje potrebna velika termička energija. Povećanjem temperature povećava se broj preokrenutih dipola te ukupno unutarnje polje slabi. To znači da je potrebna sve manja termička energija za preokretanje preostalih dipola. Zato je prijelaz iz feromagnetske u paramagnetsku fazu tako oštar [9].

Povećanjem temperature iznad Curieove više ne dolazi do spontane magnetizacije. Magnetizacija se stvara tek djelovanjem vanjskog magnetskog polja $\vec{H}$ te ona prema relacijama (3.14) i (3.20) iznosi

$$M = N\mu_B \mathrm{th}\mu_B \frac{\mu_0 H + \gamma M}{k_B T} \tag{3.29}$$

Pri visokim temperaturama gornji izraz se može zapisati u obliku

$$M = N\mu_B{}^2 \frac{\mu_0 H + \gamma M}{k_B T} \ , \tag{3.30}$$

iz čega možemo izraziti magnetizaciju sustava kao

$$M = \frac{N\mu_0 \mu_B{}^2}{k_B T - N\mu_B{}^2 \gamma} H \tag{3.31}$$

i susceptibilnost u paramagnetskoj fazi

$$\chi_p = \frac{N\mu_0 \mu_B{}^2}{k_B T - N\mu_B{}^2 \gamma} \tag{3.32}$$

Koristeći se pokratama $C = N\mu_0 \mu_B{}^2 / k_B$ i $T_c = N\mu_B{}^2 \gamma / k_B$ gornji izraz možemo zapisati u obliku

$$\chi_p = \frac{C}{T - T_c} . \tag{3.33}$$

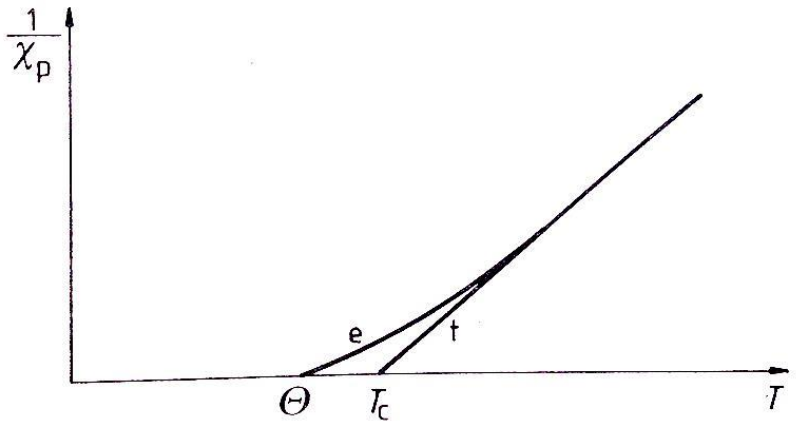
Taj izraz poznat je kao Curie-Weissov zakon i daje ovisnost magnetizacije feromagneta u paramagnetskoj fazi. Uspoređujući pokratu T_c sa relacijom (3.28) uočavamo da je

$$T_c = \Theta \tag{3.34}$$

Relaciju (3.33) možemo zapisati u obliku

$$\frac{1}{\chi_p} = -\frac{T_c}{C} + \frac{T}{C} \tag{3.35}$$

te ju prikazati grafički.

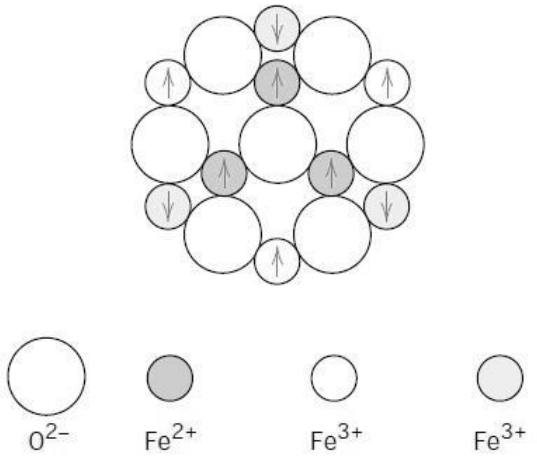


Slika 9: Grafički prikaz ovisnosti recipročne susceptibilnosti o temperaturi za feromagnete. Θ-Curieva temperatura, T_C - temperaturni parametar. [8]

S grafa se vidi da je slaganje teorijske krivulje s eksperimentalnom to bolje što je temperatura viša.

3.4 Ferimagnetizam

Kod pojedinih materijala magnetski momenti susjednih atoma u domenama se uslijed međusobnog djelovanja djelomično poništavaju (vidi Sliku 10). Pri temperaturi apsolutne nule magnetizacija ferimagnetika[6] je različita od nule.



Slika 10: Prikaz magnetskih momenata kod ferimagneta Fe_3O_4. [9]

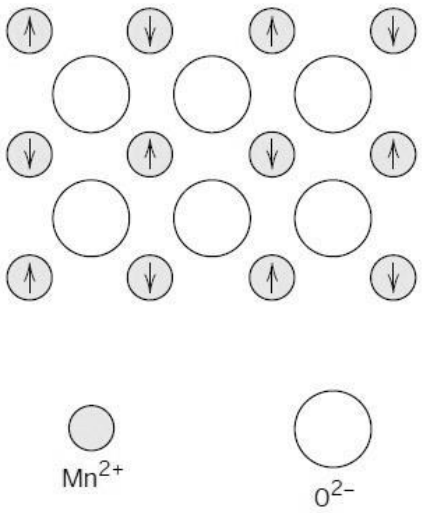
Magnetska susceptibilnost ferimagnetskih tvari je pozitivna (10^0 do 10^4), ovisna o jakosti i frekvenciji magnetskog polja te o temperaturi. Na temperaturama višim od Curieove ferimagnetska tvar postaje paramagnetska, a magnetska susceptibilnost opada s porastom temperature prema Curie-Weissovom zakonu (relacija 3.33) [7].

Ferimagnetske tvari imaju $10^6 \cdots 10^{15}$ veći specifični električni otpor od feromagnetskih tvari te se na tom svojstvu temelji njihova primjena u visokofrekventnoj tehnici. Naime, oscilacijsko magnetsko polje inducira vrtložne struje u vodičima koje stvaraju nepoželjnu Jouleovu toplinu. Primjenom ferimagnetika koji su praktički izolatori vrtložne struje postaju zanemarivo male kao i stvorena Jouleova toplina. Osim u visokofrekventnoj tehnici, ferimagnetske tvari se upotrebljavaju za memorije računala te za jezgre zavojnica, visokofrekventnih transformatora i magnetskih antena [11].

[6] *kem*. feri: spojevi trovalentnog željeza [8].

3.5 Antiferomagnetizam

Kod antiferomagnetskih materijala magnetski momenti u domenama se orijentiraju antiparalelno i pri temperaturi apsolutne nule se potpuno poništavaju (vidi Sliku 11).



Slika 11: Prikaz magnetskih momenata kod antiferomagneta MnO. [9]

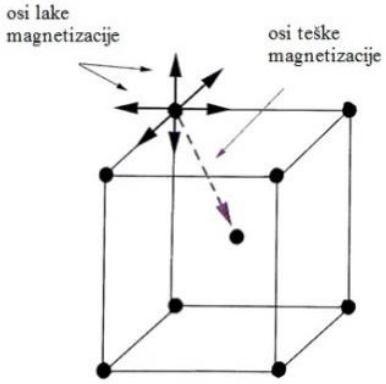
Povišenjem temperature narušava se antiparalelno uređenje te se djelovanjem vanjskog magnetskog polja stvara rezultantni magnetski moment u smjeru polja. Magnetska susceptibilnost antiferomagnetskih tvari je pozitivna, reda veličine 10^{-2} i ovisi o temperaturi (vidi Sliku 3). Antiferomagnetske tvari su oksidi mangana, željeza, nikla i kobalta, neki metali (mangan, krom) i neke rijetke zemlje (npr. samarij) [7].

4. Karakteristična svojstva feromagnetskih materijala

Feromagnetski materijali pokazuju nekoliko karakterističnih svojstava. Jedno od njih je i krivulja histereze koja će biti izmjerena u eksperimentalnom dijelu rada.

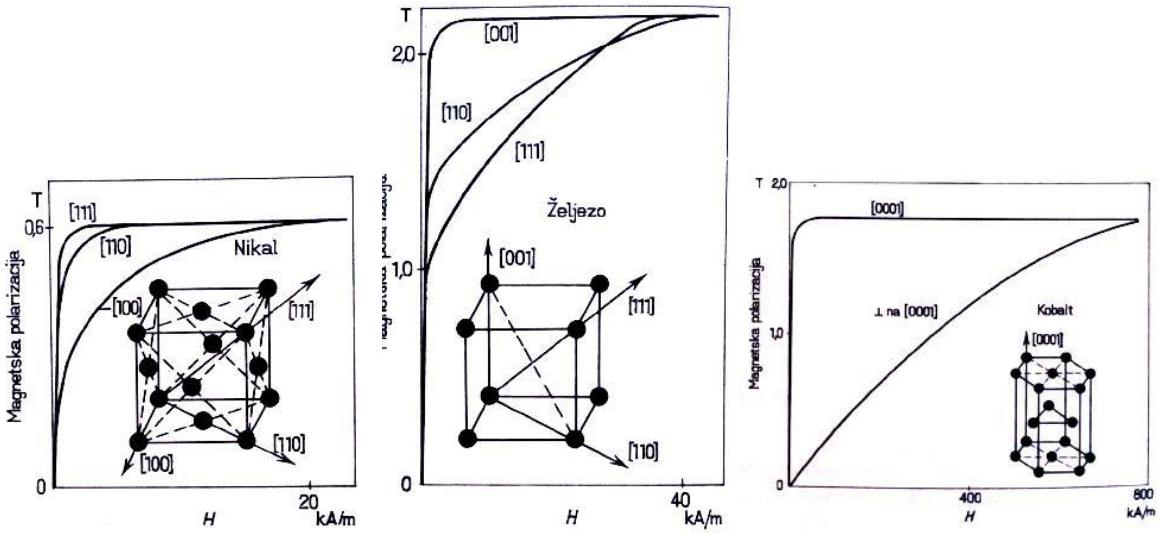
4.1 Magnetska anizotropija

Unutar feromagneta postoje preferirani smjerovi u kojima se on spontano magnetizira. Ta pojava naziva se magnetska anizotropija. Magnetska anizotropija je posljedica međudjelovanja spinskih i orbitalnih magnetskih momenata elektrona. Orbitalni magnetski momenti dalje stupaju u međudjelovanje s kristalnom strukturom preko elektrostatskog polja i prekrivanja valnih funkcija susjednih atoma u rešetki [12]. Rezultat tog međudjelovanja je postojanje povoljnijih smjerova magnetizacije (lake osi) i nepovoljnijih smjerova magnetizacije (teške osi).



Slika 12: Prikaz lakih i teških osi magnetizacije kod kristala željeza. [11]

Dakle, magnetiziranje kristala ovisi o smjeru djelovanja magnetskog polja. Na Slici 13 prikazane su krivulje magnetiziranja za monokristale Fe, Ni i Co u ovisnosti o smjeru magnetskog polja. Kod željeza su smjerovi lakog magnetiziranja, odnosno lake osi, bridovi kocke [001], kod nikla prostorne dijagonale [111], a kod kobalta aksijalna os [0001]. Kod sva tri monokristala uočava se brže postizanje magnetizacije zasićenja kada je magnetsko polje usmjereno duž lake osi magnetizacije u odnosu na druge smjerove.



Slika 13: Prikaz krivulja magnetiziranja monokristala nikla, željeza i kobalta u ovisnosti o smjeru magnetnog polja. [7]

Zakretanje smjera magnetizacije domene iz smjera lake osi u neki drugi smjer zahtijeva ulaganje određene energije, tzv. energije kristalne anizotropije. Za kubne kristale energija kristalne anizotropije po jedinici volumena iznosi

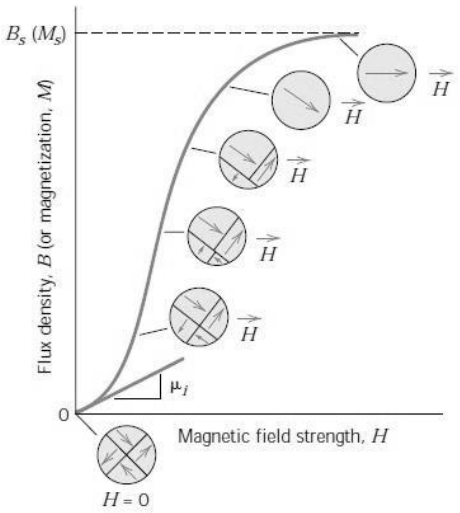
$$E_K = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \,, \tag{3.31}$$

gdje su α_i kosinusi smjerova između vektora magnetizacije i smjerova bridova kocke, a K_1 i K_1 su konstantne kristalne anizotropije.

4.2 Krivulja magnetiziranja i petlja histereze

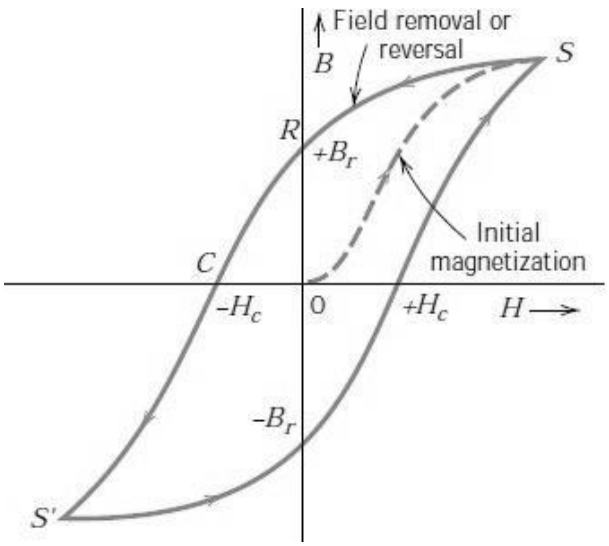
Feromagnetski materijali pokazuju nelinearnu vezu između magnetizacije $\vec{M}$ i jakosti vanjskog magnetskog polja $\vec{H}$. Grafički prikaz te ovisnosti za prethodno potpuno razmagnetizirani uzorak naziva se krivulja prvog magnetiziranja (vidi Sliku 14).

Magnetizacija feromagneta ne ovisi samo o jakosti vanjskog magnetskog polja već i o magnetskoj prošlosti materijala. Brisanje magnetske prošlosti, odnosno razmagnetiziranje materijala može se obaviti na dva načina: zagrijavanjem materijala na temperaturu višu od Curieove temperature ili postepenim smanjivanjem dovoljno jakog izmjeničnog magnetskog polja do nule [7].



Slika 14: Krivulja prvog magnetiziranja [10].

Kružni proces magnetiziranja makroskopskog uzorka feromagnetskog materijala opisuje petlja histereze (vidi Sliku 15).



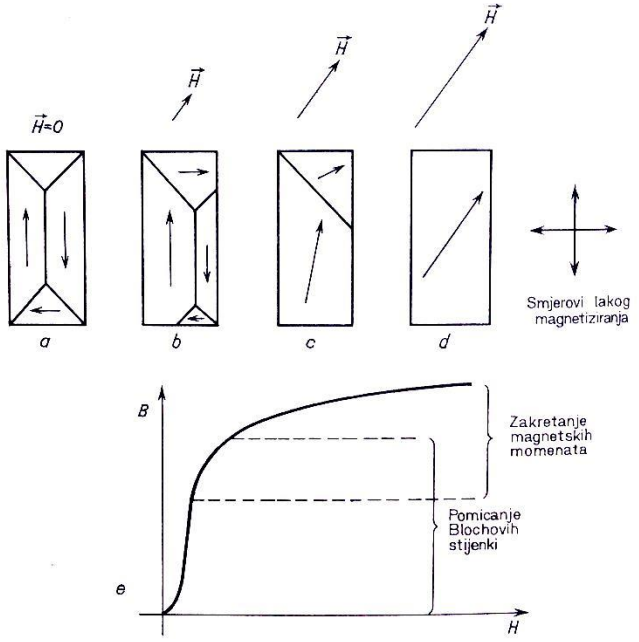
Slika 15: Petlja histereze. [10]

Povećanjem jakosti vanjskog magnetskog polja povećava se broj domena čiji je magnetski moment usmjeren u smjeru vanjskog polja pa raste i magnetizacija. Pri dovoljno jakom polju sve su domene orijentirane u smjeru vanjskog polja i dolazimo do područja zasićenja ili saturacije (točka S). Smanjivanjem vanjskog polja sve više domena orijentira magnetske momente nasumično te se magnetizacija smanjuje, ali ne po krivulji prvog magnetiziranja. Kada vanjsko polje smanjimo na nulu u materijalu će postojati zaostala magnetizacija koju nazivamo remanentna magnetizacija M_r (točka R). Magnetizaciju možemo smanjiti na nulu tek primjenom dovoljno jakog magnetskog polja suprotnog smjera, $-H_c$ kojeg nazivamo koercitivno polje. Pri tom polju uzorak se demagnetizira (točka C). Povećanjem jakosti suprotnog polja povećava se magnetizacija uzorka u suprotnom smjeru sve do zasićenja (točka S'). Slabljenjem suprotnog polja smanjuje se suprotna magnetizacija te pri $H = 0$ u uzorku ostaje negativna remanencija $-M_r$ koja iščezava primjenom polja H_c . Daljnjim povećanjem jakosti polja magnetizacija se povećava do točke zasićenja A. Time je opisan jedan ciklus magnetiziranja feromagneta.

Ukratko ćemo opisati mehanizme koji određuju izgled petlje histereze i krivulje magnetiziranja (Slika 16). Feromagnetski materijal sastavljen je od međusobno sraslih kristalita. Svaki kristalit sastoji se od jednog ili više ograničenih područja, tj. domena, koja su spontano magnetizirana u smjerovima lakog magnetiziranja. Domene su međusobno razdvojene domenskim zidovima u kojima magnetski momenti mijenjaju orijentaciju iz smjera spontane magnetizacije jedne domene u smjer spontane magnetizacije susjedne domene.

Kada feromagnetski materijal magnetiziramo vrlo slabim magnetskim poljem domenski zidovi se pomiču na način da se povećava volumen onih domena čiji je smjer spontane magnetizacije blizak ili jednak smjeru vanjskog polja. Smanjivanjem vanjskog polja na nulu, domenski zidovi se vraćaju u prvobitni položaj, tj. proces je povratan. Primjenom većih magnetskih polja domenski zidovi se više ne pomiču kontinuirano jer nailaze na nesavršenosti kristalne rešetke (šupljine, postojanje primjesa i nečistoća, dislokacije itd.), nego skokovito zbog uzajamnog djelovanja nesavršenosti kristalne rešetke i domenskih zidova [7]. Skokovito pomicanje domenskih zidova naziva se Barkhausenov učinak i kao posljedicu ima nagle, ali mikroskopski male promjene magnetizacije. Spomenute nesavršenosti kristalne rešetke stvaraju smetnje u kretanju domenskih zidova u obliku protusila. Kada sila na domenski zid, uzrokovana djelovanjem vanjskog magnetskog polja, svlada protusilu nastalu djelovanjem nesavršenosti kristalne rešetke, domenski zid se naglo pomakne preko područja kristala s manjim protusilama i

zaustavlja se na novoj prepreci odnosno na mjestu na kojemu su sile koje djeluju na domenski zid u ravnoteži. Smanji li se zatim magnetsko polje, domenski zid se neće vratiti u početni položaj, već u prvi položaj u kojemu su sile na njega u ravnoteži. Ovaj je proces, dakle, nepovratan. Smanjenjem vanjskog polja na nulu u materijalu je prisutna remanentna magnetizacija. Skokovito povećavanje i smanjivanje magnetizacije feromagneta nije uočljivo na makrorazini. Naime, zbog velikog broja domenskih zidova i nepravilnog rasporeda nesavršenosti u kristalitima skokovi domenskih zidova događaju se, makroskopski gledano, statistički nepravilno [7]. Vidimo da proces magnetiziranja možemo podijeliti na povratni i nepovratni dio. Magnetizacija će biti povratna sve dok je vanjsko polje dovoljno malo da domenski zidovi ne prelaze ni jednu energretsku barijeru uzrokovanu nesavršenostima kristalne rešetke. Kada vanjsko polje poraste i neki domenski zidovi prijeđu jednu ili više energetskih barijera, proces postaje nepovratan jer se smanjenjem vanjskog polja domenski zidovi zaustavljaju u najbližoj energetskoj udolini. Kod većih magnetskih polja dominantan proces magnetiziranja postaje zakretanje magnetskih momenata, a ne pomicanje domenskih zidova koji su sad zakočene jakim protusilama. Dovoljno snažnim vanjskim poljem postiže se zasićenje kada su svi magnetski momenti poravnati s poljem, te je cijeli materijal postao jedna domena, tj. više nema domenskih zidova. Uklanjanjem vanjskog polja magnetski momenti se vraćaju u smjerove lakog magnetiziranja, ali materijal je i dalje magnetiziran s remanentnom magnetizacijom M_r.

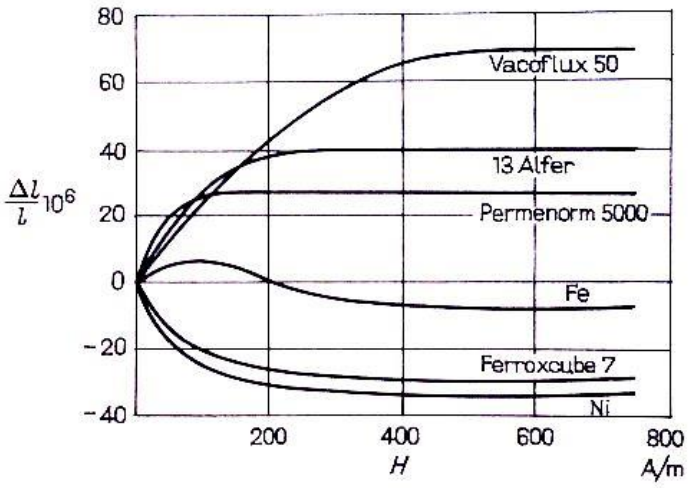


Slika 16: Proces magnetiziranja. *a* Nemagnetizirano stanje, *b* pomicanje domenskih zidova, *c* pomicanje domenskih zidova i zakretanje magnetnih momenata, *d* zakretanje magnetskih momenata do zasićenja. [7]

Udio pomicanja domenskih zidova i zakretanja magnetskih momenata u procesu magnetizacije ovisi o nekoliko čimbenika: broju osi lakog magnetiziranja kristalita, smjeru magnetskog polja u odnosu na smjerove lakog magnetiziranja, mehaničkoj i magnetskoj prošlosti kristalita, pokretljivosti domenskih zidova, te obliku i veličini kristalita i tijela [7].

4.3 Magnetostrikcija

Magnetostrikcija je pojava relativne promjene dimenzija magnetskog materijala uslijed djelovanja magnetskog polja. Razlikujemo dužinsku ($\Delta l / l$) i volumnu ($\Delta V / V$) magnetostrikciju. Tijelo se u smjeru magnetskog polja može izdužiti ili skratiti, dakle magnetostrikcija može biti pozitivna ili negativna. Predznak magnetostrikcije ovisi i o jakosti magnetskog polja pa se tako željezo pod utjecajem malih polja izdužava, a pod utjecajem jakih polja skraćuje. Pri jakim poljima magnetostrikcija postiže zasićenje. Na Slici 17 je prikazana magnetostrikcija za nekoliko metala i slitina.

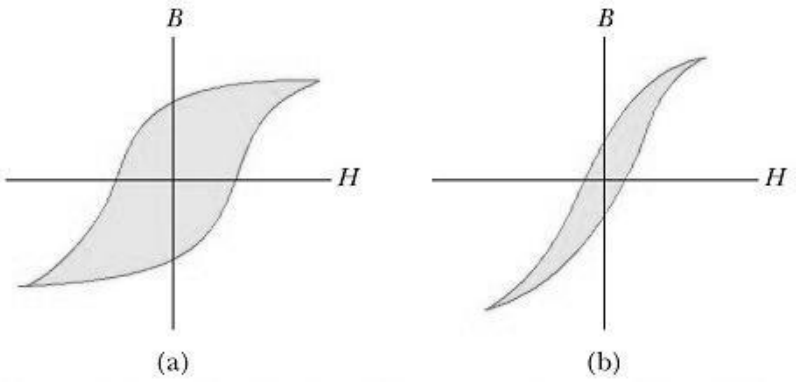


Slika 17: Dužinska magnetostrikcija nekih metala i slitina. [7]

Magnetostrikcija se pojavljuje zbog sličnih razloga kao magnetska anizotropija. Vanjsko magnetsko polje zakreće spinske magnetske momente atoma u kristalu. Međudjelovanjem spinskih i orbitalnih magnetskih momenata atoma dolazi do povećanja unutarnje energije. Kako bi se unutarnja energija kristala smanjila dolazi do promjene međusobnog razmaka atoma što uzrokuje deformaciju uzorka [12].

4.4 Gubici magnetiziranja

Tijekom periodičkog magnetiziranja materijala izmjeničnim magnetskim poljem dolazi do gubitaka energije. Oni potječu od gubitaka histereze i gubitaka vrtložnih struja. Gubici histereze ovise samo o magnetskim svojstvima materijala. Što je petlja histereze uža gubici su manji, a što je šira gubici su veći. Feromagneti s uskom petljom histereze se nazivaju meki fermagneti i pogodni su za izradu jezgri transformatora i generatora izmjeničnih struja. Kod takvih primjena poželjna je što manja disipacija energije. Feromagneti sa širokom petljom histereze nazivaju se tvrdim feromagnetima, a koriste se za izradu permanentnih feromagneta.



Slika 18: Petlja histereze za (a) tvrde feromagnete i (b) meke feromagnete. [10]

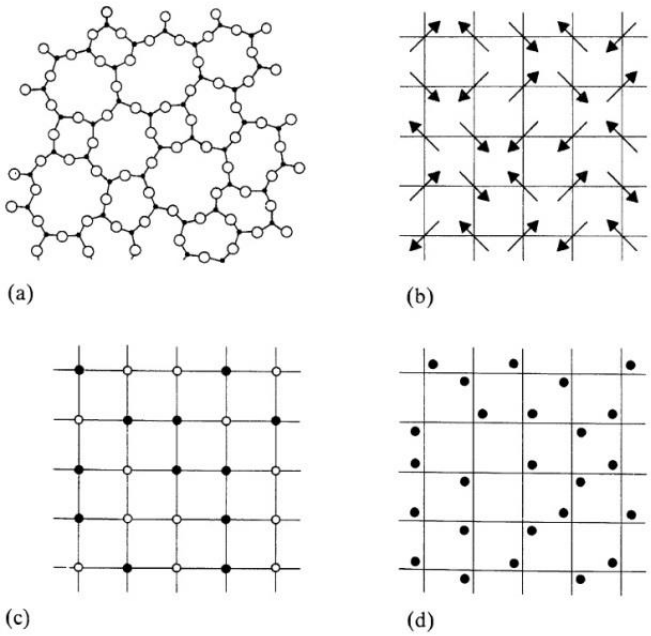
Gubici vrtložnih struja ovise o specifičnom električnom otporu materijala i o obliku presjeka magnetskog kruga, te se mogu smanjiti ako se magnetski krug sastoji od tankih limova koji su međusobno izolirani [7].

5. Magnetska svojstva amorfnih feromagneta

Ovo poglavlje opisuje strukturu i način proizvodnje amorfnih feromagneta te eksperimentalni postav za mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagnetskih vrpci.

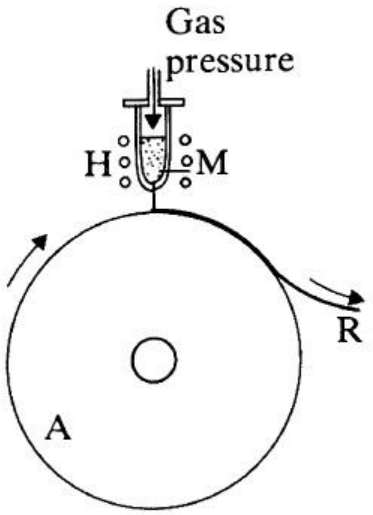
5.1 Amorfni materijali

Amorfna čvrsta tvar je tvar u čvrstom agregatnom stanju koja nema kristalnu strukturu [1]. Takvi materijali se mogu pronaći i u prirodi, no uglavnom su umjetno proizvedeni. Dok se kod kristala atomi pojavljuju u pravilnom periodičkom prostornom rasporedu, tj. u kristalnoj rešetki, kod amorfnih tvari dolazi do nekoliko vrsta neuređenosti u rasporedu atoma. Najčešća vrsta neuređenosti je geometrijska neuređenost kod koje nema translacijske periodičnosti (Slika 19a). Kod pojedinih materijala dolazi do periodičnosti kratkoga dosega, no nema periodičnosti dugoga dosega. Spinska neuređenost odnosi se na nasumičnu orijentaciju spina atoma koji se nalaze u pravilnoj kristalnoj rešetki (Slika 19b). Kod supstitucijske neuređenosti atom jednog elementa nasumično popunjava mjesto drugog elementa unutar kristalne rešetke pa je takav materijal slitina (Slika 19c). Zadnja vrsta neuređenosti odnosi se na vibracijsku neuređenost kod koje atomi titraju oko ravnotežnih položaja kristalne rešetke (Slika 19d).



Slika 19: Vrste neuređenosti kod amorfnih materijala: *a)* geometrijska, *b)* spinska, *c)* supstitucijska, *d)* vibracijska. [13]

Dva osnovna načina proizvodnje amorfnih materijala su brzo hlađenje taljevine i nasumično deponiranje atoma na podlogu. Kod brzog hlađenja taljevine tanki mlaz taljevine se pod pritiskom ispušta na rotirajući valjak pri čemu se dobivaju uske i tanke vrpce proizvoljne dužine (Slika 20). Valjak je često izrađen od bakra zbog njegovih povoljnih termičkih svojstava. Ovom metodom postiže se velika brzina hlađenja ($10^6 \cdots 10^8$ K/s) pa se materijal ne stigne kristalizirati već zadržava amorfnu strukturu. Brzina hlađenja koja je ključna za postizanje amorfne strukture ovisi o nizu parametara: brzini vrtnje diska, površinskom sastavu diska, promjeru, brzini i kutu upada mlaza taljevine na disk te o tlaku i sastavu okolnog zraka.



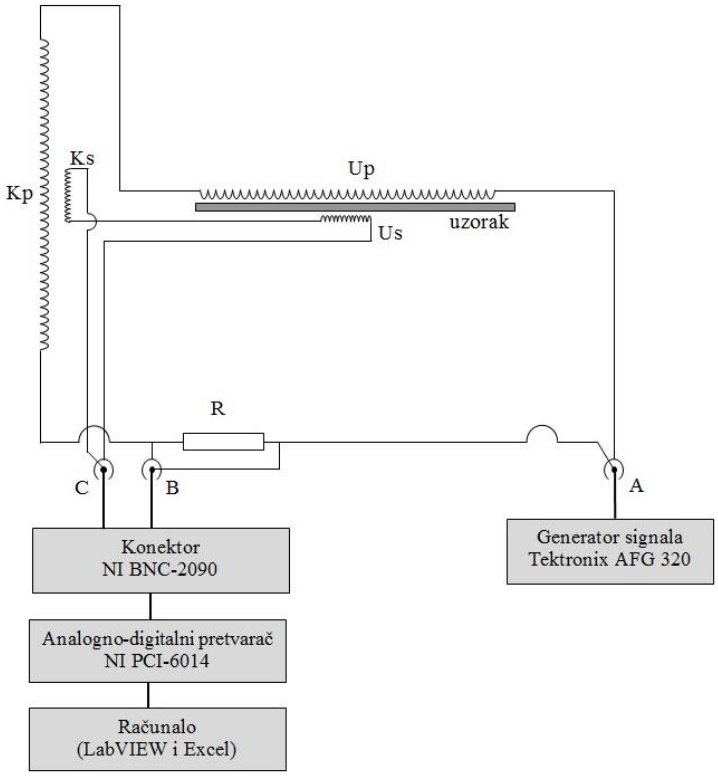
Slika 20: Proizvodnja amorfnih materijala metodom brzog hlađenja taljevine.
A- rotirajući valjak, H- grijač, M- taljevina, R- vrpca. [14]

Nasumično deponiranje atoma na podlogu postiže se različitim tehnikama: termičkim naparivanjem u vakuumu, katodnim prskanjem, ionskom implantacijom i elektrolitskom depozicijom.

Amorfni materijali su termodinamički nestabilni i teže kristalizaciji. Budući da su vremena kristalizacije vrlo duga stječe se dojam o trajnoj stabilnosti takvih materijala. Većom brzinom hlađenja pri proizvodnji dobiva se materijal s dužim vremenom kristalizacije. Materijali prikladni za neku upotrebu odabiru se na temelju podataka dobivenih iz krivulje histereze, a način dolaska do tih podataka opisan je u sljedećem poglavlju.

5.2 Mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagnetskih vrpci

Magnetska svojstva amorfnih feromagneta mjere se eksperimentalnim postavom čija je shema prikazana na Slici 21. Mjerenja smo obavljali s materijalom VITROVAC 6025Z dimenzija 2.3mm x 0.0028mm x 200mm.



Slika 21: Shema eksperimentalnog postava za mjerenje magnetskih svojstava amorfnih feromagnetskih vrpci. [4]

Postav se sastoji od četiri zavojnice (Up, Us, Kp i Ks), posebnog otpornika (R), vodiča za povezivanje, postolja s priključnicama za napajanje (A) i mjerenje signala (B i C). Navedeni elementi su spojeni na generator signala (Tektronix AFG 320), konektor (NI BNC 2090), analogno-digitalni pretvarač (PCI 6014) i računalo na kojemu se nalazi program za prikupljanje (LabVIEW) i obradu podataka (Excel). Primarne zavojnice (oznaka Up i Kp) imaju isti broj namotaja N, duljinu l i površinu poprečnog presjeka S te su spojene serijski. Unutar primarnih zavojnica smještene su kratke sekundarne zavojnice (Us i Ks) koje imaju isti broj namotaja N', duljinu l' i površinu poprečnog presjeka S' i također su spojene serijski. Sekundarne zavojnice su kratke kako bi se cijele nalazile u homogenom polju primarnih zavojnica i smještene su u

njihovim sredinama. Unutar prve sekundarne zavojnice (Us) stavlja se dugačka vrpca amorfnog feromagneta površine poprečnog presjeka S_M, a sve to stavi se unutar prve primarne zavojnice (Up). Potrebno je koristiti dugački uzorak kako bi se smanjio utjecaj demagnetizirajućeg polja koje se javlja na krajevima uzorka, dok se dugačka primarna zavojnica upotrebljava radi dobivanja što homogenijeg polja u njenoj unutrašnjosti. Zavojnice koje sadrže uzorak (Up i Us) postavljene su okomito na zavojnice za kompenzaciju (Kp i Ks) kako bi se spriječio utjecaj magnetizacije uzorka na sekundarnu zavojnicu za kompenzaciju (Ks) [15]. Prilikom promjene jakosti struje koja teče primarnim zavojnicama dolazi do promjene jakosti magnetskog polja u njihovoj unutrašnjosti, a time se mijenja i magnetski tok pa se u sekundarnim zavojnicama inducira napon. Sekundarne zavojnice su tako spojene da se inducirani naponi poništavaju dok nema uzorka u prvoj sekundarnoj zavojnici (Us). Kada u prvu sekundarnu zavojnicu (Us) stavimo amorfnu feromagnetsku vrpcu na krajevima te zavojnice se inducira napon

$$U_2 = -N'\left[\mu_0(1+\chi)S_M\frac{dH}{dt} + \mu_0(S'-S_M)\frac{dH}{dt}\right] \tag{5.1}$$

gdje prvi član u zagradi dolazi od magnetizacije uzorka površine presjeka S_M (vidi relaciju (3.9)), a drugi član od prve sekundarne zavojnice čija je površina presjeka sada (S'-S_M). U drugoj sekundarnoj zavojnici (Ks) koja ne sadrži uzorak inducira se napon

$$U_1 = -N'\mu_0 S'\frac{dH}{dt} \tag{5.2}$$

Ukupni napon serijski suprotno vezanih sekundarnih zavojnica koji dobivamo na izlazu C tada je jednak

$$U = U_2 - U_1 = -N'\mu_0 S_M \chi\frac{dH}{dt} = -N'\mu_0 S_M\frac{dM}{dt} \tag{5.3}$$

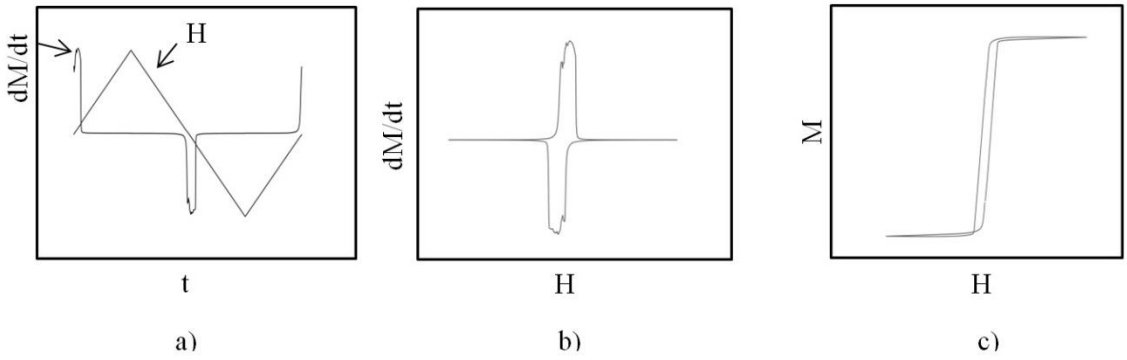
Iz gornje relacije slijedi da mjereći inducirani napon U mjerimo brzinu promjene magnetizacije uzorka

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{U}{N'\mu_0 S_M} \tag{5.4}$$

Jakost magnetskog polja H dobivamo iz jakosti električne struje I kroz sekundarne zavojnice, a nju mjerimo iz pada napona na otporu R. Konačan izraz je

$$H = k\cdot U = 26.66\,\mathrm{A/Vm}\cdot U \tag{5.5}$$

Na izlazu B mjerimo napon na otporniku R=200 Ω koji je dodatna serijski spojena zavojnica motana tako da joj je induktivitet jednak nuli i smještena daleko od primarnih zavojnica i pod pravim kutom u odnosu na njih. Naponi na izlazima B i C odvode se na analogno-digitalni pretvarač, digitalizirani signali se prenose na računalo gdje se podaci pohranjuju i obrađuju. Karakterističan izgled ovisnosti jakosti magnetskog polja i brzine promjene magnetizacije dM/dt o vremenu dobivenih nakon obrade podataka prikazan je na Slici 22a. Pomoću računala dobiva se ovisnost brzine promjene magnetizacije dM/dt o jakosti magnetskog polja H (Slika 22b). Integracijom dM/dH dobiva se ovisnost magnetizacije uzorka M o jakosti magnetskog polja H, odnosno krivulja histereze (Slika 22c).



Slika 22: Karakteristične krivulje dobivene pomoću računala.

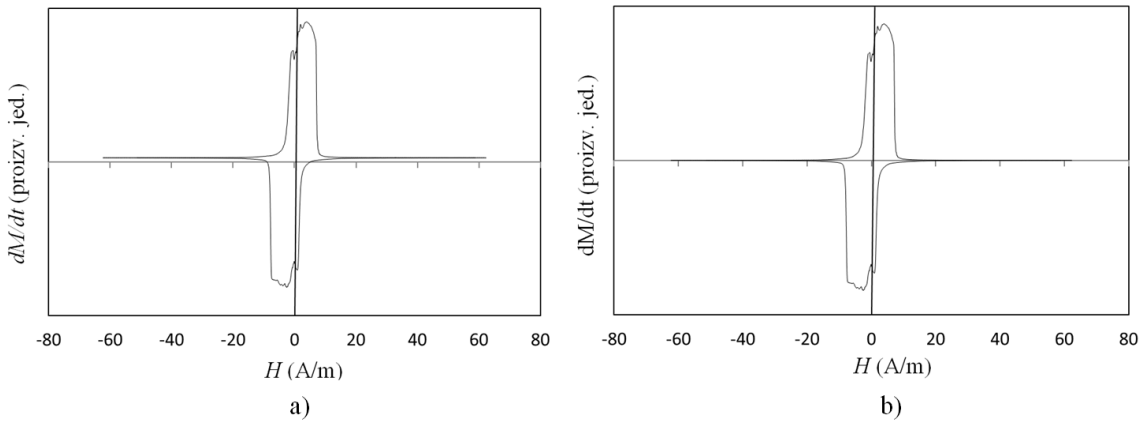
Generator signala omogućava podešavanje vrste signala, frekvencije, amplitude te offseta dok se postavke triggera podešavaju unutar programa LabVIEW. Na generatoru signala se odabire trokutasti signal frekvencije f (odnosno napon perioda T), koji unutar zavojnice stvara promjenjivo magnetsko polje amplitude H_0 i perioda T oblika

$$H = \begin{cases} H_0 + 4\dfrac{H_0}{T}t; & -\dfrac{T}{2} \le t \le 0 \\ H_0 - 4\dfrac{H_0}{T}t; & 0 \le t \le \dfrac{T}{2} \end{cases} \tag{5.6}$$

i dalje periodički s periodom T. Ovakav oblik magnetskog polja je pogodan za prijelaz s derivacije magnetizacije po vremenu dM/dt na derivaciju magnetizacije po jakosti magnetskog polja dM/dH

$$\frac{dM}{dH} = \frac{dM}{dt} \cdot \frac{1}{\frac{dH}{dt}} \tag{5.7}$$

jer je prema relaciji (5.6) izraz $1/(dH/dt)$ konstanta.



Slika 23: Ovisnost derivacije magnetizacija *dM/dt* o jakosti magnetskog polja *H* (*f*=27 Hz, H_0=61.85 A/m) *a)* prije i *b)* nakon uklanjanja offset-a (način uklanjanja offset-a opisan je u Dodatku B).

Integracijom dM/dH dobiva se ranije spomenuta petlja histereze. Drugačiji pristup računanju magnetizacije opisan je u Dodatku B. Iz dobivene petlje histereze iščitavaju se njene karakteristične veličine: magnetizacija zasićenja, remanentna magnetizacija, koercitivno polje i gubici histereze. Puštanjem napona različitih amplituda i perioda (odnosno frekvencija) mogu se ispitati međuovisnosti navedenih karakterističnih veličina.

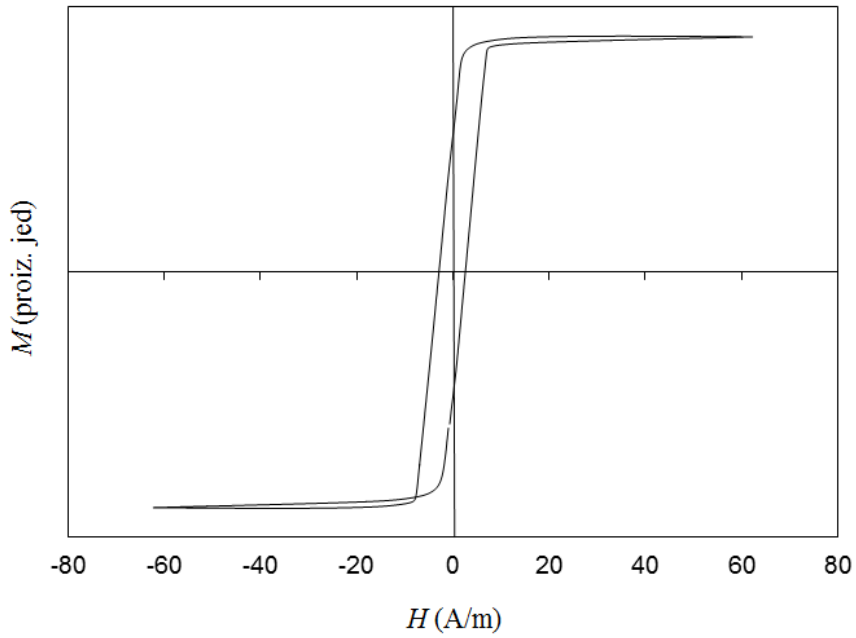
U eksperimentu je korištena sljedeća oprema (vidi Sliku 24):

1. Daska sa zavojnicama i priključnicama
2. Generator signala Tektronix AFG 320
3. Konektor NI BNC-2090
4. PC računalo (operacijski sustav Windows XP)
5. Analogno-digitalni pretvarač NI PCI-6014 (nije vidljiv na Slici 24)
6. Programski paket LabVIEW 8.5 i Excel

U programskom paketu LabVIEW 8.5 napisan je program za prikupljanje i zapisivanje podataka. Podaci su zapisivani u dvije Excel datoteke nakon čega su kopirani u treću datoteku u kojoj se vršila obrada. Objašnjenje programa u LabVIEW-u i detalji obrade u Excel-u dani su u Dodatku B. Nakon obrade podataka dobivena je petlja histereze (vidi Sliku 25).



Slika 24: Eksperimentalni postav (objašnjenje oznaka je u tekstu iznad slike).



Slika 25: Petlja histereze za magnetsko polje frekvencije f=27 Hz i amplitude H_0 =61.85 A/m

Iz Slike 24 može se iščitati vrijednost koercitivnog polja H_C= 2.76 A/m. Vrijednosti magnetizacije zasićenja M_S i remanentne magnetizacije M_r nismo mogli odrediti zbog nepoznavanja broja namotaja sekundarne zavojnice Ks. Naime, eksperimentalne zavojnice su nešto starije proizvodnje te taj podatak nije bio dostupan. Iz iznosa koercitivnog polja može se reći da materijal VITROVAC 6025 Z pripada grupi mekih feromagneta. Ovime je ostvaren cilj diplomskog rada, tj. crtanje histereze i određivanje njenih osnovnih parametara.

6. Metodička jedinica

Škola:	Srednja škola- gimnazija	***Razred:***	2.
Mjesto*:*	-		
Mentor:	-		
Student:	Hrvoje Milološa	***Smjer:***	-
Datum:	-		

Nastavni predmet*:*	Fizika
Nastavna cjelina*:*	Magnetizam
Nastavna tema:	Elektromagnetska indukcija
Nastavna jedinica:	Elektromagnetska indukcija i Lenzovo pravilo

SADRŽAJNI PLAN

Red. broj.	***Podjela nastavne cjeline na teme***	***Broj sati***	
		predavanja	*vježbe*
1	Uvod u magnetizam i magnetsko polje	1	0
2	Magnetsko polje električne struje	1	1
3	Djelovanje magnetskog polja na naboj-Lorentzova sila	1	2
4.	Djelovanje magnetskog polja na vodič kojim teče struja- Amperova sila	1	1
5.	*Elektromagnetska indukcija*	2	2
6.	Primjena elektromagnetske indukcije	1	1
Red. broj.	***Podjela nastavne teme na jedinice***	***Broj sati***	
		predavanja	*vježbe*
1.	*Elektromagnetska indukcija i Lenzovo pravilo*	1	1
2.	Induktivitet i samoindukcija zavojnica	1	1

PLAN VOĐENJA NASTAVNOG PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

Eksperimentalno proučiti pojavu inducirane struje u zavojnici i primjeniti Lenzovo pravilo u pokusu s aluminijskim prstenom.

Zadaci koje treba ostvariti da bi se cilj postigao:

-Materijalni (kognitivni) zadaci:

- uočiti da relativno gibanje magneta i zavojnice proizvodi električnu struju u zavojnici
- uočiti ovisnost smjera električne struje o smjeru gibanja magneta
- uočiti ovisnost iznosa električne struje o brzini gibanja magneta
- primjenom Lenzovog pravila odrediti smjer inducirane električne struje u aluminijskom prstenu

-Funkcionalni (psihomotorički, afektivni zadaci):

- izvesti pokus s induciranjem električne struje u zavojnici
- skicirati pokus u bilježnicu i zapisati opažanja
- izvesti pokus s aluminijskim prstenom
- skicirati pokus u bilježnicu i zapisati opažanja
- riješiti numeričke i konceptualne zadatke

-Odgojni zadaci:

- pažljivo pratiti izvođenje pokusa
- iznošenje vlastitih opažanja
- bilježenje korisnih informacija

Organizacija nastavnog rada – artikulacija metodičke jedinice:

Koraci nastavnog procesa	**Sadržaj**	**Oblici nastave**	**Metode i postupci**	**Vrijeme**
Uvodni dio	Kratko ponavljanje činjenice da električna struja proizvodi magnetsko polje.	Frontalna nastava	Metoda razgovora.	5
Glavni dio	Demonstracija elektromagnetske indukcije pomoću štapićastog	Frontalna nastava	Metoda razgovora, metoda	35

	magneta i zavojnice. Opisivanje Lenzovog pravila. Izvođenje pokusa sa štapićastim magnetom i aluminijskim prstenom. Rješavanje numeričkih i konceptualnih zadataka.		demonstracije, metoda rješavanja zadataka.	
Zaključni dio	Ponavljanje koncepta elektromagnetske indukcije i rezultata prvog pokusa. Ponavljanje Lenzovog pravila i rezultata drugog pokusa. Motivacijski pokus za sljedeći sat: prsten koji odskoči s elektromagneta.	Frontalna nastava	Metoda razgovora.	**5**

Nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvjeti rada:

- 1 zavojnica, 2 vodiča, 1 galvanometar, 1 štapičasti magnet
- 1 čitavi aluminijski prsten, 1 prerezani aluminijski prsten, 1 postolje za aluminijski prsten, 1 štapićasti magnet
- 1 elektromagnet, 1 aluminijski prsten, 1 izvor izmjeničnog napona
- kreda, ploča, projektor

Korelacija:

- Geografija- rijeke, brane, hidroelektrane
- Politika i gospodarstvo- proizvodnja električne energije

Metodički oblici koji će se primjenjivati u toku rada:

- Metoda razgovora, metoda demonstracije, metoda rješavanja zadataka

Izvori za pripremanje nastavnika:

- Andreis, T., Plavčić, M., Simić, N. *Fizika 2, udžbenik fizike za drugi razred gimnazije.* Zagreb, Profil, 2008.
- Krsnik, R. *Fizika 2, udžbenik za 2. razred gimnazije, B inačica programa*. Zagreb. Školska knjiga, 1997.
- Freedman, R., Young, H. *University physics*. Dvanaesto izdanje. San Francisco. Pearson Education, Inc, 2008.

Izvori za pripremanje učenika:

- Andreis, T., Plavčić, M., Simić, N. *Fizika 2, udžbenik fizike za drugi razred gimnazije.* Zagreb, Profil, 2008.

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE – NASTAVNI RAD:

1. Uvodni dio

Na početku upišem sat i učenike koji nedostaju te upalim prezentaciju. Pomoću prezentacije i mojih pitanja ćemo se prisjetiti da električna struja proizvodi magnetsko polje.

Opišite izgled magnetskog polja kojeg stvara ravni vodič kojim teče stalna struja? Očekivani odgovor je da ravni vodič oko sebe stvara magnetsko polje čije su silnice koncentrične kružnice koje leže u ravnini okomitoj na vodič. Zatim prikažem sliku ravnog vodiča i magnetskog polja kojeg on stvara te formulu za iznos magnetske indukcije na nekoj udaljenosti od vodiča.

Opišite izgled magnetskog polja kojeg stvara kružna petlja kojom teče stalna struja? Očekivani odgovor je da kružna petlja stvara magnetsko polje čije silnice okružuju petlju u ravnini okomitoj na nju te da više nisu koncentrične kružnice. Silnice su gušće raspoređene unutar petlje te se petlja ponaša poput magneta. Polovi takvog magneta se određuju pravilom desne ruke (prste desne ruke postavimo u smjeru struje, a ispruženi palac pokazuje smjer silnica, tj. položaj sjevernog pola). Prikažem sliku strujne petlje i formulu za iznos magnetske indukcije u središtu petlje.

Opišite izgled magnetskog polja kojeg stvara zavojnica kojom teče stalna struja? Očekivani odgovor je da zavojnica stvara magnetsko polje slično polju strujne petlje, s tom razlikom da sad imamo N serijski vezanih petlji. Zavojnica kojom teče struja se također ponaša poput magneta s istim načinom određivanja položaja polova kao kod strujne petlje. Polje unutar zavojnice je homogeno. Prikažem sliku zavojnice kojom teče struja i formulu za iznos magnetske indukcije unutar zavojnice.

2. Glavni dio

Sada najavim da ćemo izvesti pokus u kojem ćemo proučiti djelovanje štapićastog magneta na zavojnicu koja je spojena s galvanometrom. Na nastavnički stol postavim aparaturu (štapićasti magnet, dva vodiča, galvanometar i zavojnicu) te na ploči skiciram pokus (učenici skiciraju

pokus u bilježnice). Zatim prozovem jednog učenika da spoji pokus. Objasnim da ćemo izvesti 4 varijante pokusa u kojima ćemo magnet unositi unutar zavojnice prvo sa sjevernim polom bliže zavojnici pa s južnim, a zatim ćemo magnet iznositi iz zavojnice prvo sa sjevernim polom bliže zavojnici pa s južnim. Učenici trebaju pažljivo promatrati što se pritom događa s kazaljkom galvanometra. Prvo magnet postavimo na neku udaljenost od zavojnice i promotrimo što se događa s kazaljkom galvanometra. Kazaljka miruje što znači da nema struje unutar zavojnice. Učenici zapisuju to zapažanje. Zatim magnet sa sjevernim polom bliže zavojnici unosimo unutar zavojnice i zaustavimo ga unutar zavojnice. Učenici bi trebali uočiti da se kazaljka galvanometra na kratko pomaknula, a zatim vratila na nulu što je znak da je u zavojnici neko vrijeme tekla struja. Učenici zapisuju opažanje. Zatim ponovimo postupak, ali s južnim krajem bliže zavojnici. Trebali bi uočiti da se kazaljka galvanometra ponovno na kratko pomaknula, ali ovaj put u drugu stranu, a zatim vratila na nulu. To je znak da je zavojnicom potekla struja u suprotnom smjeru. Učenici zapisuju opažanje. Ponovimo postupak s odmicanjem magneta od zavojnice i zapisujemo zapažanja. Zatim pokušamo magnet puno brže približiti ili udaljiti od zavojnice. Trebali bismo uočiti da je sada otklon kazaljke galvanometra veći, tj. da je zavojnicom potekla struja većeg iznosa. Učenici zapisuju to opažanje. Sada kažem da se iz pokusa vidi da zavojnica reagira (teče struja) na promjenu neke veličine koja je povezana s magnetom. Faraday je preciznim pokusima utvrdio da je inducirana elektromotorna sila povezana s vremenskom promjenom magnetskog toka unutar zavojnice. Zapišemo izraz

$$\varepsilon = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

gdje je ε-inducirani napon, N-broj zavoja, a $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$-brzina promjene magnetskog toka kroz zavojnicu.

Kada smo magnet približavali zavojnici povećavao se broj silnica unutra zavojnice, a kada smo magnet udaljavali smanjivao se broj silnica unutra zavojnice. Dok je magnet mirovao nije bilo promjene broja silnica unutar zavojnice. Također je za iznos induciranog napona važna brzina promjene broja silnica unutar zavojnice. Učenici zapisuju da se pojava izazivanja elektromotornog napona i toka električne struje pomoću magnetskog polja naziva elektromagnetska indukcija. Tada napišem naslov „Elektromagnetska indukcija“ na ploču. Napomenem da je elektromagnetska indukcija temelj proizvodnje električne energije.

Sada pripremim opremu za drugi pokus (štapičasti magnet, cijeli i prerezani aluminijski prsten, postolje za aluminijski prsten) kojim ćemo odrediti smjer inducirane struje u aluminijskom prstenu. Skiciram pokus na ploču (učenici skiciraju pokus u bilježnice). Prozovem jednog učenika da izvede pokus. Prvo treba štapičasti magnet sa sjevernim polom bliže cijelom prstenu pokušati staviti unutar prstena. Pri tome se prsten odmiče od magneta. Učenici zapišu zapažanje. Zatim stavimo magnet unutar prstena i pokušamo ga izvući. Sada prsten slijedi magnet. Učenici zapišu zapažanje. Zaključujemo da se aluminijski prsten opire promjeni magnetskog toka kroz njegovu površinu. Pri tome se u njemu inducira električna struja i on postaje magnetičan. Kada smo sjeverni pol štapićastog magneta približavali prstenu u njemu se inducirala struja takvog smjera da je stvorila magnetsko polje suprotne orijentacije od magnetskog polja štapićastog magneta. Tada su se prsten i magnet odbijali. Kada smo magnet izvlačili iz prstena, u prstenu se inducirala električna struja takvog smjera da je njeno magnetsko polje usmjereno u smjeru magnetskog polja magneta pa su se međusobno privlačili. Iz toga zaključujemo da će vanjsko i inducirano magnetsko polje imati isti smjer ukoliko se magnetski tok kroz prsten smanjuje, a suprotni smjer ukoliko magnetski tok raste. Prikažem sliku na prezentaciji koja to demonstrira. Ovo opažanje može se izreći u obliku Lenzovog pravila: *Električna struja koja nastaje zbog induciranog napona ima takvu orijentaciju da nastoji spriječiti promjenu magnetskog toka zbog koje je i nastala*. Sada gornji izraz za inducirani napon možemo zapisati u preciznijem obliku kojeg nazivamo zakon elektromagnetske indukcije

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Ponovimo pokus s prerezanim prstenom. Trebali bismo uočiti da sada ne dolazi do odbijanja i privlačenja prstena budući da njime ne može teći električna struja pa ne dolazi do stvaranja magnetskog polja. Učenici zapišu to zapažanje.

Sada riješimo nekoliko numeričkih i konceptualnih zadataka na ploču.

3. Završni dio

Na kraju sata kroz pitanja ponovimo opažanja iz prvog i drugog pokusa.

Opišite tijek prvog pokusa sa štapićastim magnetom i zavojnicom.

Kako znamo da je zavojnicom potekla električna struja?

O čemu je ovisio smjer i iznos električne struje? Navedite zakon elektromagnetske indukcije?

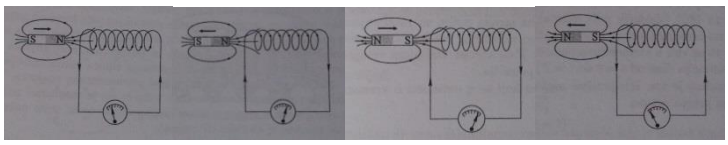
Opišite tijek i rezultate drugog pokusa. Navedite Lenzovo pravilo.

Nakon toga izvedem pokus s prstenom koji odskoči s elektromagneta i učenicima kažem da kod kuće objasne zašto je prsten odskočio pa ćemo njihova razmišljanja prokomentirati na sljedećem satu.

Plan ploče:

Elektromagnetska indukcija

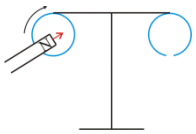
1. pokus



Elektromagnetska indukcija je pojava izazivanja elektromotornog napona i toka električne struje pomoću magnetskog polja.

$\varepsilon = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ inducirani elektromotorni napon

2. pokus

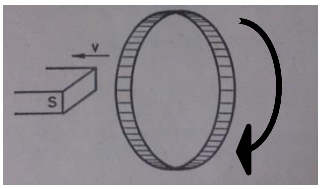


Električna struja koja nastaje zbog induciranog napona ima takvu orijentaciju da nastoji spriječiti promjenu magnetskog toka zbog koje je i nastala.

$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ zakon elektromagnetne indukcije

Elektromagnetska indukcija

1.



2.

$N = 10$

$S = 5\cdot 10^{-2}\,m^2$

$\Delta t = 0.005s$

$H = 8\cdot 10^4\,A/m$

$U = ?$

$$U = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta T} = N\frac{\Delta BS}{\Delta T}$$

$$U = N\mu_0 S\frac{\Delta H}{\Delta t}$$

$$U = 10\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 5\cdot 10^{-2}\cdot\frac{8\cdot 10^4}{0.005}$$

$U = 0.1\text{V}$

3.

$N = 50$

$S = 0.1\cdot 10^{-2}\,m^2$

$H = 3000\text{A/m}$

$\Delta t = 0.1s \rightarrow \Delta\varphi = 90^\circ$

$U = ?$

$$U = N\frac{\Delta\Phi}{\Delta T} = N\frac{\Delta BS}{\Delta T}$$

$$U = N\mu_0 H\frac{\Delta S}{\Delta t}$$

$$U = 50\cdot 4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 3000\cdot\frac{0.1\cdot 10^{-2}}{0.1}$$

$U = 1.9\cdot 10^{-3}\,\text{V}$

Dodaci

1. zadatak

Južni pol magneta udaljava se nekom brzinom *v* od metalnog obruča. Odredi smjer inducirane struje u obruču (*lijevi dio obruča je bliži promatraču*).

2. zadatak

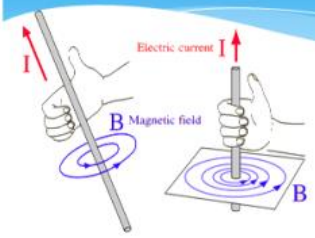
Koliko se napon inducira u zavojnici s 10 zavoja površine 5 cm^2 ako tu zavojnicu za 0,005 s unesemo u magnetsko polje jakosti $8 \cdot 10^4$ A/m ? Površina zavojnice je okomita na silnice.

3. zadatak

Okvir s 50 zavoja površine 0,1 dm^2 postavljen je okomito na silnice magnetskog polja jakosti 3000 A/m. Okvir se za 0,1 s okrene za 90°. Izračunaj inducirani napon.

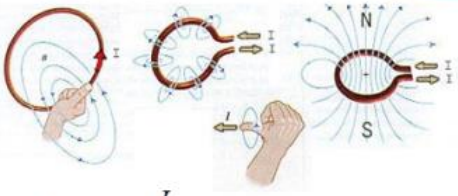
Magnetsko polje električne struje -ponavljanje

Magnetsko polje ravnog vodiča



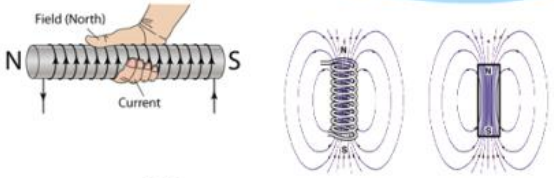
$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r}$$ Magnetska indukcija na udaljenosti r

Magnetsko polje kružne petlje



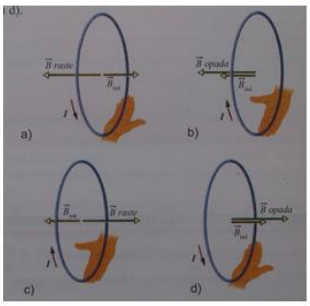
$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2R}$$ Magnetska indukcija u središtu petlje

Magnetsko polje zavojnice



$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}$$ Magnetska indukcija unutar zavojnice

Lenzovo pravilo

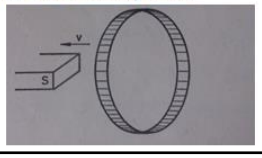


Električna struja koja nastaje zbog induciranog napona ima takvu orijentaciju da nastoji ***spriječiti promjenu*** *magnetskog toka zbog koje je i nastala*

Zadaci

1. zadatak

Južni pol magneta udaljava se nekom brzinom v od metalnog obruča. Odredi smjer inducirane struje u obruču (*lijevi dio obruča je bliži promatraču*).



Zadaci

2. zadatak

Koliko se napon inducira u zavojnici s 10 zavoja površine 5 cm² ako tu zavojnicu za 0,005 s unesemo u magnetsko polje jakosti ? Površina zavojnice je okomita na silnice.

3. zadatak

Okvir s 50 zavoja površine 0,1 dm² postavljen je okomito na silnice magnetskog polja jakosti 3000 A/m. Okvir se za 0,1 s okrene za . Izračunaj inducirani napon.

7. Zaključak

Eksperimentalni postav ostvaren u ovom radu omogućava mjerenje osnovnih magnetskih veličina amorfnih feromagnetskih vrpci na sobnoj temperaturi. Za uzorak VITROVAC 6025 Z izmjereno je koercitivno polje H_C=2.76 A/m za jakost magnetskog polja H_0=61.85 A/m i frekvenciju f=27 Hz. Izmjerena vrijednost ukazuje da materijal pripada grupi mekih feromagneta.

Daljnji koraci uključuju pisanje dodatnog koda u programu LabVIEW koji će osigurati potpunu automatizaciju mjerenja. Cilj je napisati program koji će biti u mogućnosti izračunati osnovne magnetske veličine za čitav niz frekvencija magnetskog polja te dati grafičke prikaze istih. U takvom scenariju korisnik bi trebao samo unijeti osnovne parametre magnetskog polja (oblik signala, amplitudu, frekvenciju, offset i željene frekvencije) te pokrenuti program. Također, poželjno bi bilo uspostaviti izravnu kontrolu nad generatorom signala preko programa LabVIEW te u sučelju programa kopirati izgled prednjeg dijela generatora signala. Na taj bi se način svi parametri unosili preko programa LabVIEW. Nadalje, uočene nedostatke opreme (vidi Dodatak B) potrebno je ukloniti ili pronaći prikladno rješenje. Također, potrebno je saznati parametre sekundarne zavojnice s uzorkom kako bi se mogla izračunati magnetizacija uzorka.

Prije svakog mjerenja potrebno je poništiti utjecaj zemljinog magnetskog polja koje se mijenja na dnevnoj bazi. Dasku s uzorkom treba podesiti tako da je os uzorka okomita na projekciju zemljinog magnetskog polja na ravninu u kojoj se nalazi uzorak. Elektronički uređaji (računala, mobiteli) koji se nalaze u blizini eksperimentalnog postava stvaraju vlastita magnetska polja koja utječu na preciznost mjerenja te o tome treba voditi računa.

Propuštanjem električne struje kroz uzorak te torzijom uzorka mogu se vršiti daljnja ispitivanja, a sintezom feromagnetskih vrpci različitih sastava može se vršiti usporedna analiza istih.

8. Literatura

[1] Lopac, V. *Leksikon fizike*. Zagreb. Školska knjiga, 2009.

[2] Freedman, R., Young, H. *Univerity physics*. Dvanaesto izdanje. San Francisco. Pearson Education, Inc, 2008.

[3] Kolanović, M., Pajić, D. *Procesi magnetizacije amorfne slitine* $Fe_{77.5}B_{22.5}$.Zagreb. Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 1996.

[4] Barić, M. *Mjerenje magnetske histereze mekih feromagnetika*. Zagreb. PMF-Matematički odjel, Sveučilište u Zagrebu, 2005.

[5] Faj, Z. *Pregled povijesti fizike*. Drugo, dopunjeno izdanje. Osijek. Pedagoški fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 1999.

[6] Supek, I. *Povijest fizike*. Zagreb. Školska knjiga, 1980.

[7] *Tehnička enciklopedija Jugoslavenskog leksikografskog zavoda*. Zagreb. JLZ, 1963-1997., Sv. 5. 1976.

[8] Anić, V., Goldstein, I. *Rječnik stranih riječi*. Zagreb. Novi liber, 2004.

[9] Šips, V. *Uvod u fiziku čvrstog stanja*. Zagreb. Školska knjiga, 1991.

[10] Callister, W. *Fundamentals of materials sciences and engineering*. Peto izdanje. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001.

[11] URL: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=19292 (11.8.2015.)

[12] Šušak, H. *Utjecaj obrade površine na petlje histereze amorfnih vrpci*. Diplomski rad. Zagreb. Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2007.

[13] URL: http://www.kshitij-iitjee.com/Classification-of-magnetic-substances (17.8.2015.)

[14] Elliot, S.R. *Physics of amorphous materials*. Harlow. Longman Group Limited, 1984.

[15] Jovanović, O. *Utjecaj napuštanja na magnetiziranje* $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{15.5}B_7$ *slitine*. Diplomski rad. Zagreb. Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 1996.

[16] Larsen, R. *LabVIEW for Engineers*. New Jersey. Pearson Education, Inc, 2011.

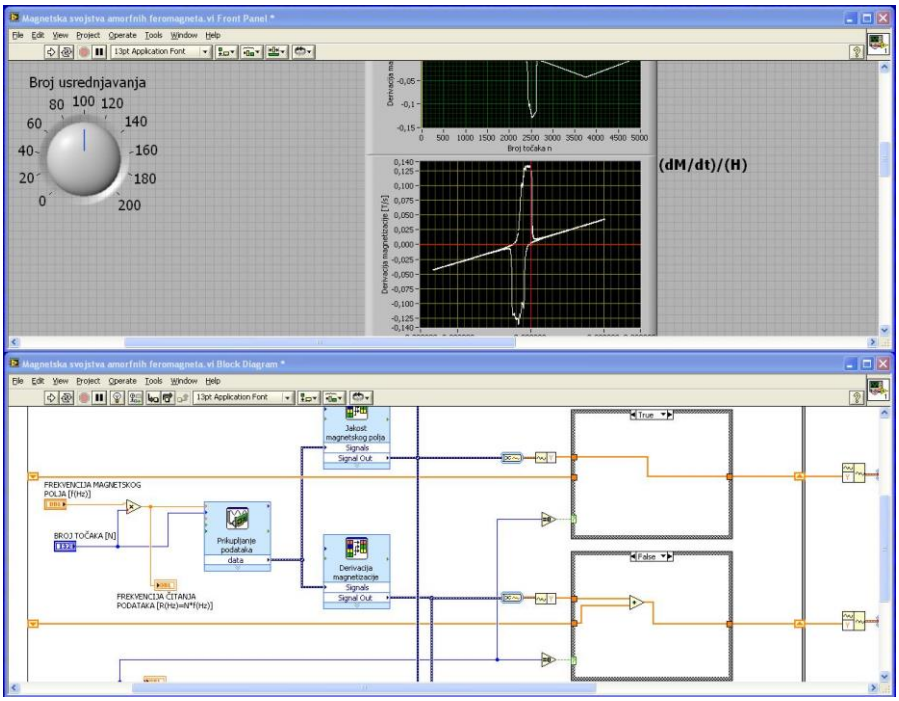
Životopis

Hrvoje Milološa rođen je 13. prosinca 1990. godine u Osijeku. U Čepinu je pohađao Osnovnu školu Vladimira Nazora, a u Osijeku I. gimnaziju. 2009. godine upisuje Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, a završava ga 2013. godine. Diplomski studij fizike upisuje 2013. godine također na Odjelu za fiziku u Osijeku.

Dodatak A: O programu LabVIEW

LabVIEW je grafički programski jezik namijenjen prikupljanju podataka s raznih instrumenata, obradi i analizi podataka te upravljanju uređajima. Pisanje koda se u osnovi svodi na spajanje raznih funkcija žicama kojima protječu podaci, no moguće je kopirati kod iz različitih programskih jezika (C++, MATLAB itd.). LabVIEW postaje sve zastupljeniji program u industriji te je poželjno upoznati njegove osnove.

Sučelje programa sastoji se od dva prozora, prednje ploče (eng. Front Panel) i dijagrama toka (eng. Block Diagram)(vidi Sliku 25). Elementi na prednjoj ploči se oblikuju tako da nalikuju stvarnim instrumentima. Moguće je dodati različite vrste pokazivača, prekidača, gumbova, žaruljica, brojača itd. Na ovom dijelu se odvija interakcija korisnika sa sustavom kojega nadzire ili kojim upravlja. Na dijagramu toka nalazi se kod koji određuje ponašanje programa.

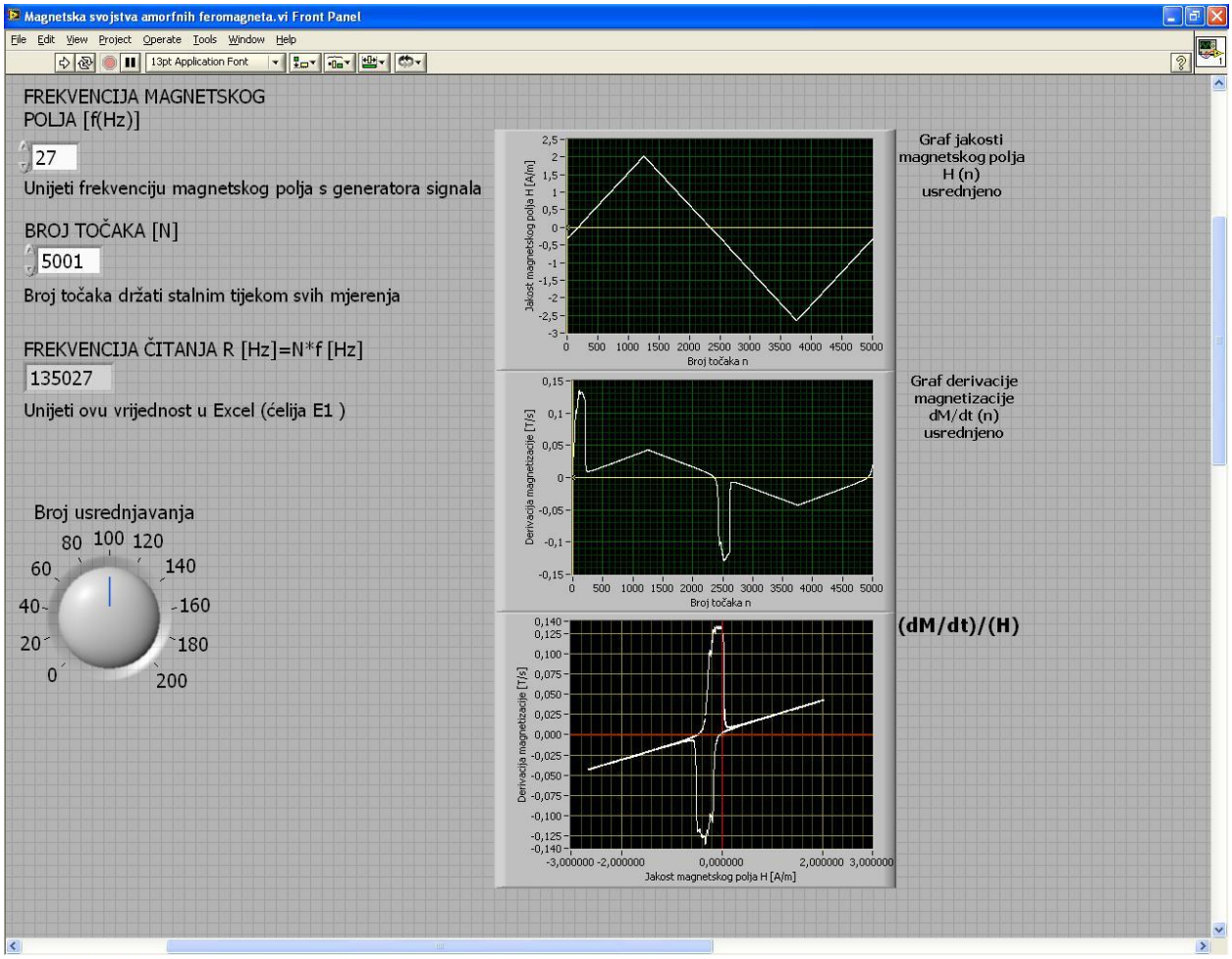


Slika 25: Sučelje programa LabVIEW 8.5.

Dobar uvod u LabVIEW može se pronaći u referenci [16], a na adresi *http://forums.ni.com/* moguće je kontaktirati iskusne inženjere koji koriste LabVIEW u praksi.

Dodatak B: Automatizacija mjerenja pomoću programa LabVIEW i Excel

Tijekom pripremanja eksperimenta planirano je istovremeno prikupljanje signala na izlazima B i C (vidi shemu eksperimenta na Slici 21) kao preduvjet automatiziranog mjerenja. Prilikom probnih mjerenja uočeno je miješanje signala (vidi Sliku 26).



Slika 26: Problem miješanja signala vidljiv u sučelju LabVIEW-a.

Problem se najvjerojatnije krije u analogno-digitalnom pretvaraču koji ne odvaja signale u potpunosti (isti problem primjećen je u sličnim eksperimentima čak i sa skupljim analogno-digitalnim pretvaračima). Rješenje smo pronašli u odvojenom snimanju signala s ulaza B i C. Time je onemogućena automatizacija mjerenja sve dok se problem miješanja signala ne riješi popravkom ili zamjenom analogno-digitalnog pretvarača.

Slijedi opis drugačijeg načina računanja magnetizacije i crtanja histereze od onoga opisanog u poglavlju 5.2.

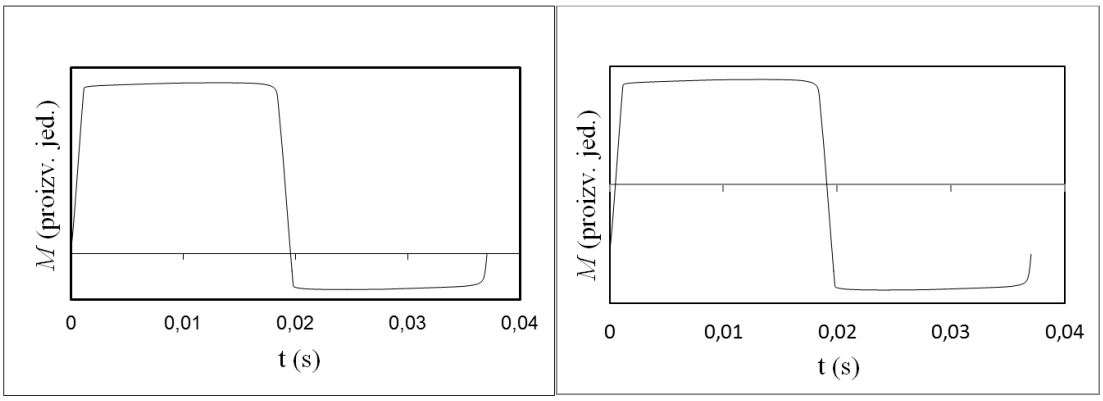
Na posljednje dvije stranice prikazan je kod u programu LabVIEW s detaljnim objašnjenjem pojedinih koraka. Kod usrednjava signale koji se prikupljaju na kanalima B i C (vidi shemu eksperimenta na Slici 21) te ih ispisuje u dvije Excel datoteke. Nakon što program završi s radom potrebno je snimljene podatke iskopirati u posebno pripremljenu Excel datoteku koja vrši obradu na sljedeći način. Pomoću programa u LabVIEW-u vrijednosti jakosti magnetskog polja i derivacije magnetizacije zapisuju se u Excel datoteku na sljedeći način:

1	*H* (1)	*dM/dt* (1)
2	*H* (2)	*dM/dt* (2)
3	*H* (3)	*dM/dt* (3)
...		
5001	*H* (5001)	*dM/dt* (5001)

Dakle, dobije se ovisnost magnetskog polja i derivacije magnetizacije o rednom broju, tj. *H*(n) i *dM/dt*(n) redom. Sada od tih podataka treba dobiti ovisnosti o vremenu, odnosno *H*(t) u *dM/dt*(t), prema formuli

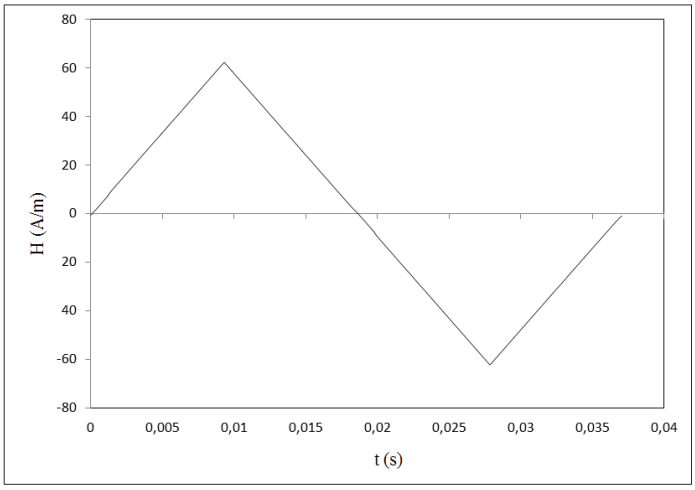
$$t = \frac{n}{\text{frekvencija čitanja}\,[\text{Hz}]},\ n = 1,2,3,...,5001$$

U našem primjeru korištena je frekvencija čitanja f=135027 Hz za polje frekvencije f=27 Hz (na taj se način uz čitanje 5001 vrijednosti obuhvatio točno jedan period signala). Prije nego se podaci *dM/dt*(t) integriraju treba se ukloniti mogući offset koji se pojavljuje na analogno-digitalnom pretvaraču. To se radi na način da se na jednom periodu izračuna srednja vrijednost svih točaka *dM/dt*(t) i ta vrijednost oduzme od njih. Zatim se dobijeni korigirani signal (tj. te umanjene vrijednosti) numerički integrira po vremenu ili po jakosti magnetskog polja kao na Slici 23 b) (trapezna formula).



Slika 27: Magnetizacija *M*(t) *a)* prije i *b)* nakon simetriziranja.

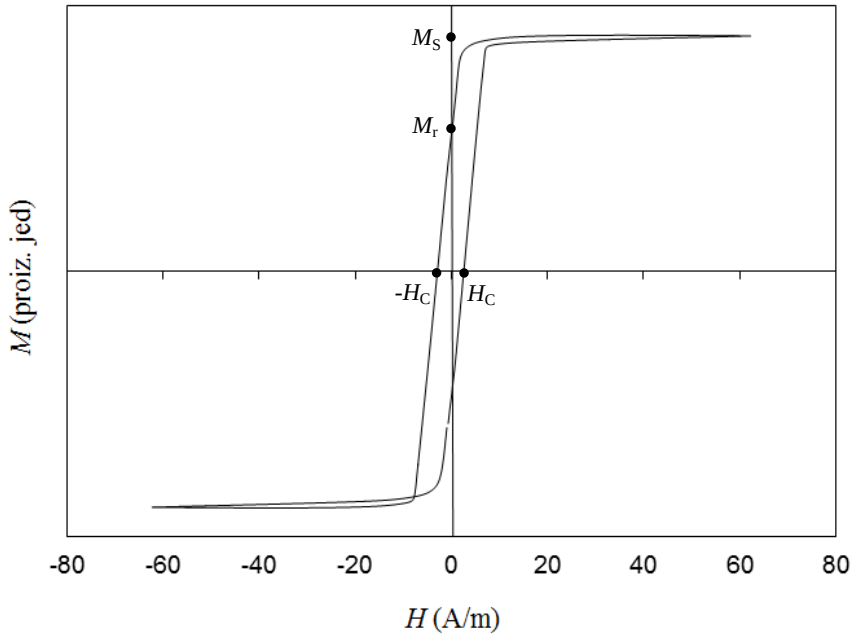
Na Slici 27 a) prikazana je magnetizacija kao funkcija vremena. Te se vrijednosti sada trebaju simetrizirati oko nule tako da se pronađu minimalna i maksimalna vrijednost od *M*(t) te se sve vrijednosti pomaknu tako da MIN(*M*(t)) bude jednak –MAX(*M*(t)). Tada su vrijednosti *M*(t) simetrično raspoređene oko nule (vidi Sliku 26 b)). Isti postupak simetrizacije treba ponoviti i za jakost magnetskog polja *H*(t) (Slika 28).



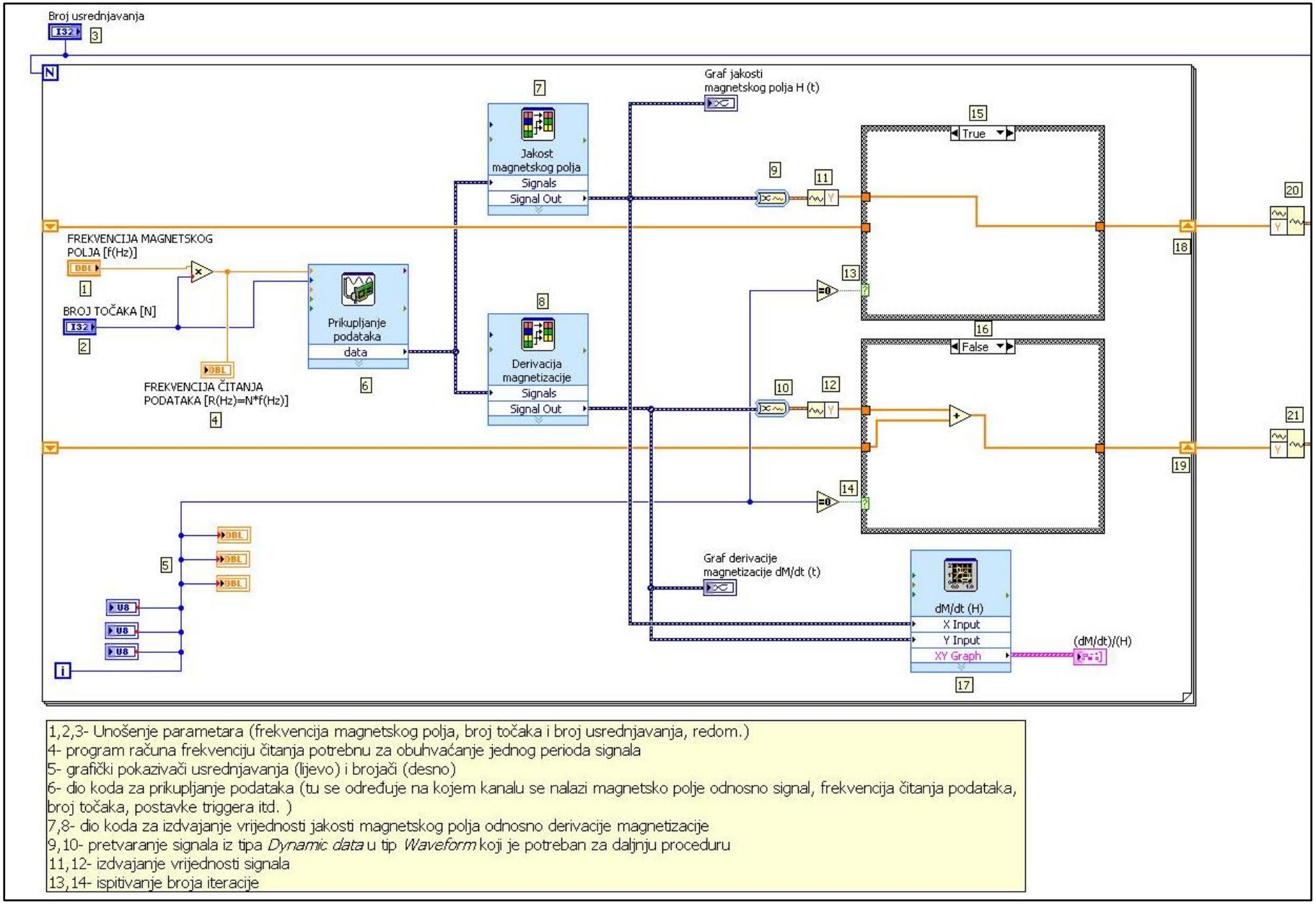
Slika 28: Ovisnost jakosti magnetskog polja o vremenu *H*(t) (simetrizirano).

Sada se simetrizirani grafovi *M*(t) (Slika 27b)) i *H*(t) (Slika 28) prikažu na jednom grafu kao ovisnost magnetizacije o jakosti magnetskog polja *M*(H) te se iz tog grafa (Slika 28)

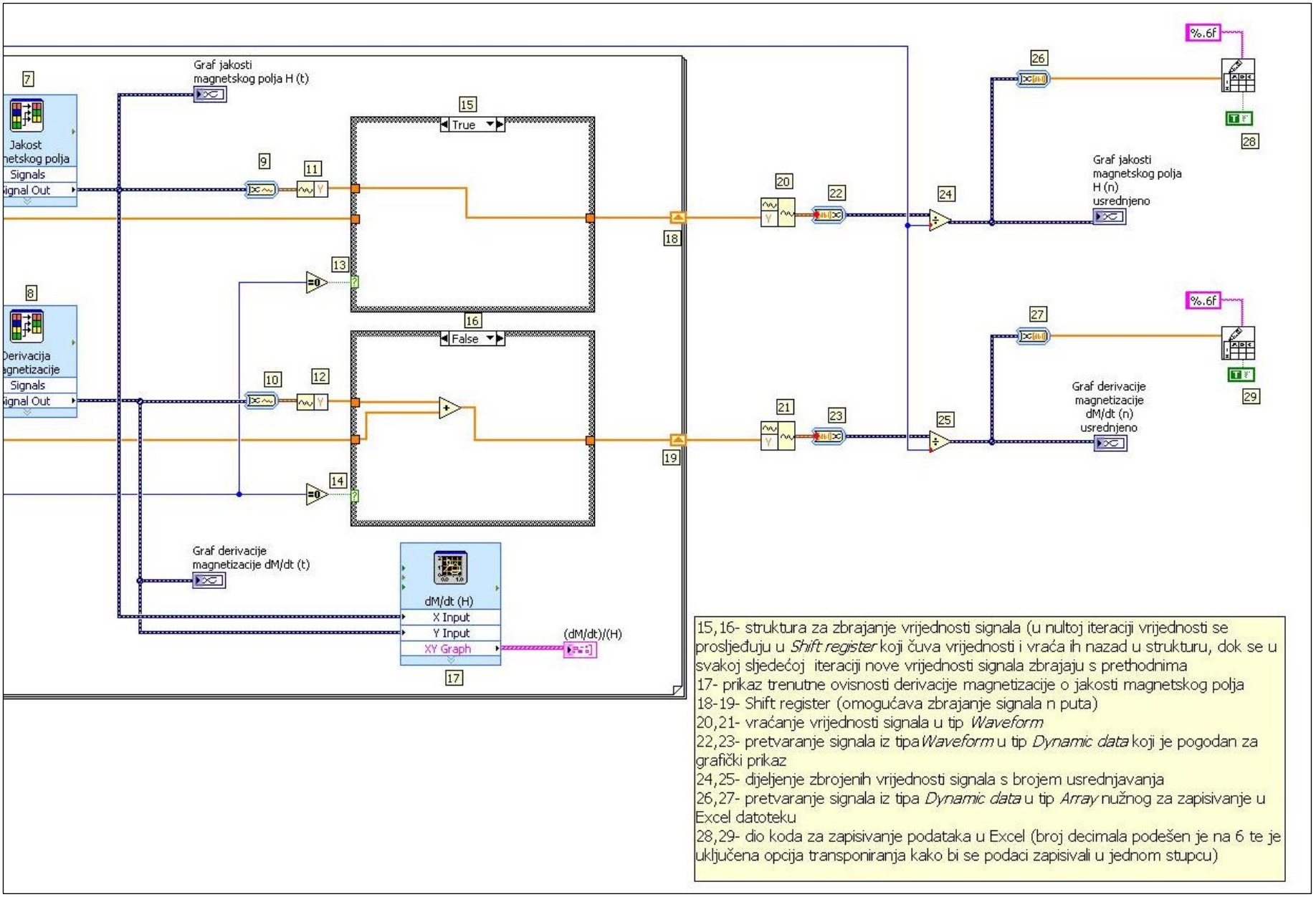
očitavaju karakteristične veličine: magnetizacija zasićenja M_S, remanentna magnetizacija M_r, koercitivno polje H_C i gubici histereze.



Slika 28: Prikaz ovisnosti magnetizacije o jakosti magnetskog polja M(H), tj. petlja histereze.



1,2,3- Unošenje parametara (frekvencija magnetskog polja, broj točaka i broj usrednjavanja, redom.)
4- program računa frekvenciju čitanja potrebnu za obuhvaćanje jednog perioda signala
5- grafički pokazivači usrednjavanja (lijevo) i brojači (desno)
6- dio koda za prikupljanje podataka (tu se određuje na kojem kanalu se nalazi magnetsko polje odnosno signal, frekvencija čitanja podataka, broj točaka, postavke triggera itd.)
7,8- dio koda za izdvajanje vrijednosti jakosti magnetskog polja odnosno derivacije magnetizacije
9,10- pretvaranje signala iz tipa *Dynamic data* u tip *Waveform* koji je potreban za daljnju proceduru
11,12- izdvajanje vrijednosti signala
13,14- ispitivanje broja iteracije



15,16- struktura za zbrajanje vrijednosti signala (u nultoj iteraciji vrijednosti se prosljeđuju u *Shift register* koji čuva vrijednosti i vraća ih nazad u strukturu, dok se u svakoj sljedećoj iteraciji nove vrijednosti signala zbrajaju s prethodnima
17- prikaz trenutne ovisnosti derivacije magnetizacije o jakosti magnetskog polja
18-19- Shift register (omogućava zbrajanje signala n puta)
20,21- vraćanje vrijednosti signala u tip *Waveform*
22,23- pretvaranje signala iz tipa *Waveform* u tip *Dynamic data* koji je pogodan za grafički prikaz
24,25- dijeljenje zbrojenih vrijednosti signala s brojem usrednjavanja
26,27- pretvaranje signala iz tipa *Dynamic data* u tip *Array* nužnog za zapisivanje u Excel datoteku
28,29- dio koda za zapisivanje podataka u Excel (broj decimala podešen je na 6 te je uključena opcija transponiranja kako bi se podaci zapisivali u jednom stupcu)