

Mjerenje gubitaka u magnetskim limovima metodom Epsteina

Čupić, Gabriel

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:886794>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-10**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Stručni studij

**Mjerenje gubitaka u magnetskim limovima metodom
Epsteina**

Završni rad

Gabriel Čupić

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 30.06.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

| | |
|---|---|
| Ime i prezime Pristupnika: | Gabriel Čupić |
| Studij, smjer: | Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika |
| Mat. br. Pristupnika, godina upisa: | A 4572, 19.07.2019. |
| OIB Pristupnika: | 94887809705 |
| Mentor: | doc. dr. sc. Goran Rozing |
| Sumentor: | , |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | dr. sc. Željko Špoljarić |
| Član Povjerenstva 1: | doc. dr. sc. Goran Rozing |
| Član Povjerenstva 2: | dr. sc. Krešimir Miklošević |
| Naslov završnog rada: | Mjerenje gubitaka u magnetskim limovima metodom Epsteina |
| Znanstvena grana završnog rada: | Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak završnog rada | |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina |
| Datum prijedloga ocjene od strane mentora: | 30.06.2023. |
| Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada: | Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije. |
| | Datum: |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 21.07.2023.

Ime i prezime studenta:

Gabriel Čupić

Studij:

Preddiplomski stručni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

Mat. br. studenta, godina upisa:

A 4572, 19.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje gubitaka u magnetskim limovima metodom Epsteina**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Goran Rozing

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Zadatak završnog rada | 2 |
| 2. Magnetska svojstva materijala | 3 |
| 2.1. Ponašanje materijala u magnetskom polju..... | 5 |
| 2.1.1. Dijamagnetizam..... | 5 |
| 2.1.2. Feromagnetizam | 5 |
| 2.1.3. Antiferomagnetizam | 6 |
| 2.1.4. Paramagnetizam | 7 |
| 2.1.5. Ferimagnetizam | 8 |
| 2.2. Permeabilnost materijala | 8 |
| 2.3. Petlja histereze | 9 |
| 2.4. Gubitci prilikom magnetiziranja..... | 11 |
| 2.5. Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja | 12 |
| 3. Podjela magnetskih materijala | 13 |
| 3.1. Meki magnetski materijali | 13 |
| 3.1.1. Tehnički čisto željezo i meki čelici..... | 13 |
| 3.1.2. Grupa ferosilicijskih legura | 13 |
| 3.1.3. Grupa feronikalnih legura..... | 14 |
| 3.2. Tvrdi magnetski materijali | 15 |
| 4. Metode ispitivanja magnetskih svojstava materijala izmjeničnom strujom | 16 |
| 4.1. Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu | 16 |
| 4.2. Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom | 17 |
| 4.3. Snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom | 18 |
| 5. Ispitivanje magnetskih svojstava materijala u laboratoriju | 18 |
| 5.1. Ispitivanje gubitaka magnetskih limova na Epstein uređaju..... | 20 |
| 5.1.1. Tablični i dijagramski prikaz krivulja magnetiziranja za ispitivane limove | 22 |
| 5.2. Snimanje petlje histereze različitih materijala osciloskopom | 24 |
| 6. Zaključak | 27 |
| Literatura..... | 28 |

1. UVOD

Svrha mjerenja u elektrotehnici je što točnije odrediti vrijednost veličine koju mjerimo, ali ta izmjerena vrijednost nije nikada ona prava vrijednost, već od nje odstupa u određenoj mjeri. Mjerenjem se utvrđuju određena svojstva pojedinih materijala poput mehaničkih, električnih, magnetskih i tako dalje. Pojava magnetskih gubitaka je prisutna u svim uređajima zbog nedostataka u materijalima te je samim time neizbježna. Ukratko su opisane i pojave koje opisuju magnetska svojstva pojedinih grupa materijala poput petlje histereze, gubitaka tijekom magnetiziranja te toplinskoj ovisnosti materijala pri magnetiziranju. U ovom završnom radu prikazani su izračunati gubitci koji nastaju tijekom magnetiziranja materijala metodom Epsteina. Pojam magnetizma prvi puta se spominje davne 600-te godine prije Krista, u djelu filozofa Talesa iz Mileta gdje se spominju privlačna svojstva magnetskog materijala. Razvoj uređaja koji koriste magnetske materijale počeo je tek u 12. stoljeću u Kini, to jest izum prvog kompasa koji je ukazivao na jug zbog tadašnjih uvjerenja. Sastojao se od magnetskog materijala u obliku žlice koji se stavio na bakrenu ili brončanu ploču na kojoj su bili ugravirani simboli. Ubrzani razvoj je započeo u razdoblju od 17. do 19. stoljeća gdje su znanstvenici poput Carla F. Gaussa, Charlesa Coulomba, Michaela Faradaya, Jamesa C. Maxwella istraživali i dokazali ono što znamo danas o magnetskim materijalima. Poput toga da je zemlja slabi magnet te da zbog toga kompas pokazuje na sjever, teorem o jakosti privlačnih sila dvaju magnetiziranih materijala te nestanak magnetskih svojstava nakon određene temperature su samo neki od znanstvenih radova i otkrića toga doba [1]. Razvoj magnetskih materijala koji se koriste i danas je započeo početkom 20. stoljeća gdje su znanstvenici uspjeli proizvesti prvi AlNiCo magnet, to jest magnet koji se sastoji od legure aluminijskog, nikla i kobalta, te nešto kasnije proizveden je i magnet koji se sastoji od legure neodimija, željeza i bora, koji je glavni dio današnjih magneta. Magnetski materijali koji se uglavnom koriste danas su keramički, Alnico, samarij-kobalt i neodimij ovisno o primjeni. Keramički magnetski materijali se koriste primarno kao permanentni magneti, a glavne prednosti keramičkog materijala su niska cijena, otpornost na koroziju te visoka nominalna temperatura rada i Curieova temperatura. Alnico se primarno koriste u visoko temperaturnim uvjetima do 5500 °C. Magneti izrađeni od plemenitih materijala imaju svojstvo visoke jakosti polja, no lako oksidiraju i korodiraju te su krhki. Samarij-kobalt magneti koriste se na višim temperaturama gdje je čvrstoća materijala potrebna. Neodimijski magneti posjeduju vrlo visoku jakost magnetskog polja, imaju nižu Curievu temperaturu te ukoliko korodiraju dolazi do pretvaranja materijala u prah koji gubi magnetska svojstva [2].

1.1. Zadatak završnog rada

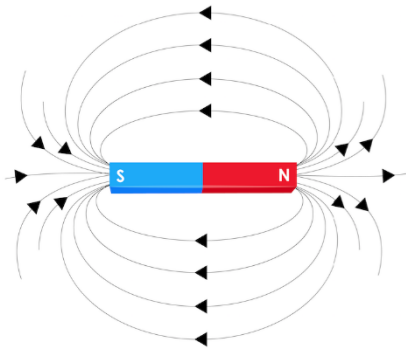
Zadatak ovog završnog rada je izmjeriti vrijednosti pomoću kojih se mogu izračunati gubitci koji se javljaju u magnetskim limovima pomoću Epstein aparata kao i prikazati petlju histereze pomoću osciloskopa. Svrha završnog rada je prikazati gubitke koji se javljaju tijekom magnetiziranja tablično i grafički.

2. Magnetska svojstva materijala

Pod osnovna magnetska svojstva materijala smatramo intenzitet magnetizacije, magnetsko polje, magnetsku susceptibilnost, retenciju materijala, koercitivnost te permeabilnost.

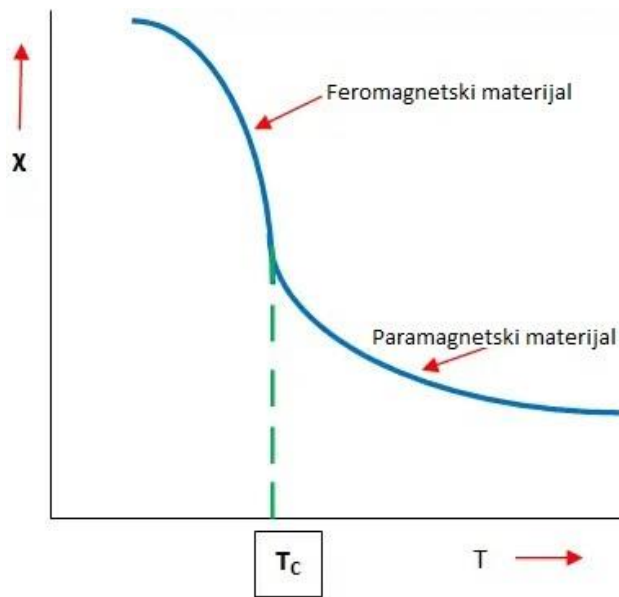
Intenzitet magnetizacije materijala predstavlja pojavu nakon što materijal stavimo u vanjsko magnetsko polje koje utječe na kretanju elektrona oko jezgre atoma. Taj proces utječe na smjer domena unutar magneta te ih poravnava u određenom smjeru ovisno o vrsti materijala.

Magnetsko polje predstavlja polje oko materijala u kojemu se osjeća magnetski učinak. Jakost magnetskog polja mjerimo u amperima po metru te je definirano kao „magnetsko polje od 1 amper po metru je proizvedeno u centru namota vodiča polumjera 1 metra kada kroz njega teče struja jakosti 1 amper“. Na slici 2.1. je prikazano magnetsko polje koje nastaje oko magneta.



Slika 2.1. Prikaz magnetskog polja oko magneta [3]

Magnetska susceptibilnost je bezdimenzionalna veličina te predstavlja u kojoj će se mjeri materijal magnetizirati ako se taj materijal stavi u magnetsko polje. Također prikazuje hoće li materijal imati privlačna ili odbojna svojstva prema magnetskom polju. Na slici 2.2. je prikazana magnetska susceptibilnost paramagnetskih, feromagnetskih i dijamagnetskih materijala.



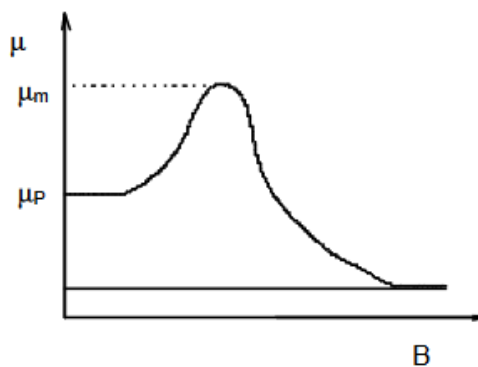
Slika 2.2. Prikaz magnetske susceptibilnosti materijala [4]

Retencija magnetskog materijala predstavlja svojstvo materijala da zadrži magnetska svojstva nakon što se taj materijal ukloni iz magnetskog polja.

Koercitivnost predstavlja sposobnost materijala da se opire vanjskom magnetskom polju bez da gubi svoja magnetska svojstva to jest da se materijal demagnetizira [5].

Permeabilnost je vrijednost koja predstavlja kako se magnetski materijal ponaša ako ga se postavi u magnetsko polje, to jest ako se domene unutar materijala lako usmjeravaju tada je takav materijal visoko permeabilan.

Početna permeabilnost μ_p određena je početnim nagibom krivulje magnetiziranja, dok je maksimalna permeabilnost μ_m određena maksimalnim nagibom krivulje magnetiziranja kao što vidimo na slici 2.3. koja prikazuje krivulju magnetiziranja.



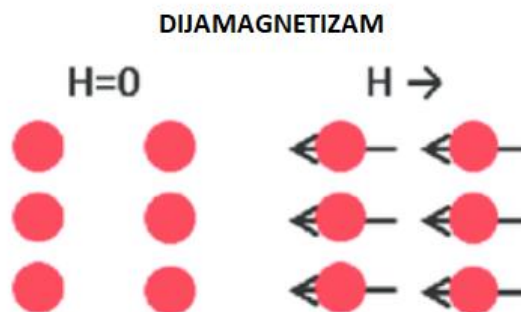
Slika 2.3. Prikaz krivulje magnetiziranja materijala [6]

2.1. Ponašanje materijala u magnetskom polju

Kako bismo mogli objasniti ponašanje materijala u magnetskom polju treba spomenuti kako postoje vrste magnetizma. Te vrste su dijamagnetizam, feromagnetizam, antiferomagnetizam, paramagnetizam i ferimagnetizam.

2.1.1. Dijamagnetizam

Dijamagnetizam je osnovno svojstvo svih tvari te predstavlja vrlo slabi oblik magnetizma koje je inducirano promjenom orbitalne kretnje elektrona zbog prisustva vanjskog magnetskog polja. Spomenuto vanjsko magnetsko polje utječe na elektrone koji kruže oko jezgre atoma materijala te dolazi do stvaranja struje koja stvara magnetsko polje suprotnog smjera od smjera vanjskog magnetskog polja prema Lenzovom zakonu. Dakle pojava dijamagnetizma u materijalu znači da dolazi do odbojne sile između vanjskog magnetskog polja te polja koje se stvori u materijalu, ta odbojna sila je vrlo mala te ju u većini slučajeva nadvlada pojava feromagnetizma ili paramagnetizma. Pojavu dijamagnetizma može se promatrati samo u materijalima u kojima ne postoji drugi oblik magnetizma kao na primjer u bakru, zlatu i sumporu [7]. Slika 2.4. prikazuje smjer djelovanja sile unutar dijamagnetskog materijala ako na njega djeluje vanjsko magnetsko polje.

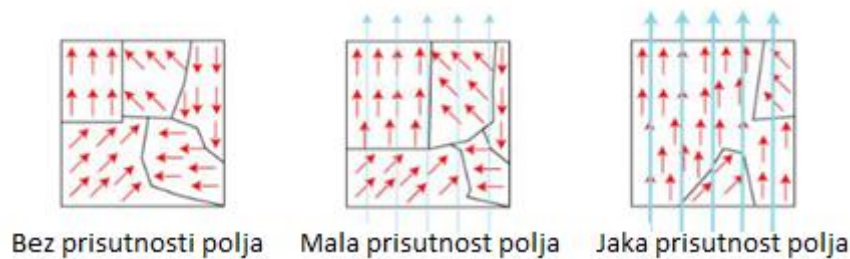


Slika 2.4. Prikaz smjera sile unutar dijamagneta pri djelovanju vanjskog polja [8]

2.1.2. Feromagnetizam

Feromagnetizam je pojava unutar materijala koja rezultira visokom razinom magnetske permeabilnosti i koercitivnosti koja dopušta materijalu da postane permanentni magnet. Materijali koji posjeduju feromagnetska svojstva također imaju svojstvo spontane magnetizacije zbog orijentacijske uređenosti domena unutar strukture samog materijala. Atomi u pojedinačnoj domeni su istog smjera što znači da imaju isti smjer magnetskog momenta. Domene su ograđene takozvanim granicama gdje je svaka susjedna domena različitog oblika i smjera. Samim time

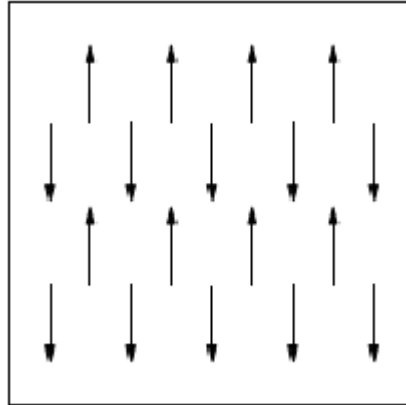
kombinirani magnetski moment je nula. Ako se materijal s feromagnetskim svojstvima unese u polje dolazi do potpunog poravnanja magnetskih momenata to jest domena u smjeru vanjskog magnetskog polja [9]. Nova orijentacija domena i njezinih granica se teško mijenja nakon što na materijal prestane djelovati vanjsko polje, te je to razlog zašto kada se magnetizira feromagnetski materijal on postaje permanentni magnet. Feromagnetski materijali prate Curievu temperaturu što znači ako se taj materijal zagrije iznad određene granice on gubi svojstva feromagneta to jest dolazi do uništenja domena te materijal postaje paramagnet [7]. Na slici 2.5. prikazane su orijentacije domena pri različitim utjecajima vanjskog magnetskog polja.



Slika 2.5. Prikaz domena feromagnetskog materijala pri različitim stupnjevima djelovanja magnetskog polja [7]

2.1.3. Antiferomagnetizam

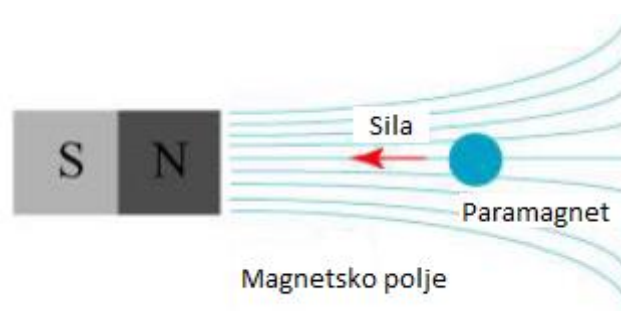
Antiferomagnetizam je svojstvo materijala da se ponašaju kao fero i paramagneti. Magnetski momenti ovih materijala su slični onima kod feromagneta u smislu na koji su način organizirani to jest također su magnetski određeni. Unatoč tome kod antiferomagnetskih materijala magnetski momenti u domenama su u antiparalelnom razmještaju te samim time rezultiraju poništavanjem magnetskog momenta. Ova vrsta materijala je također pod utjecajem Curieve temperature ali samo iznad određene kritične temperature koja se zove Néelova temperatura. Iznad spomenute temperature antiferomagnet postaje paramagnet [7]. Na slici 2.6. prikazan je poredak momenata unutar domene antiferomagnetskog materijala.



Slika 2.6. Prikaz poretka momenata unutar domene antiferomagnetskog materijala [7]

2.1.4. Paramagnetizam

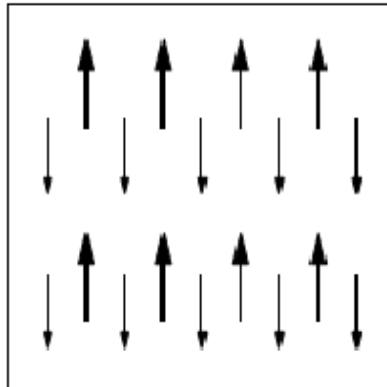
Paramagnetizam je pojava materijala da se magnetski momenti djelomično poravnaju sa smjerom vanjskog magnetskog polja prilikom djelovanja tog polja. Materijali koji imaju paramagnetska svojstva nemaju sve uparene elektrone. Parovi koji postoje su suprotno orijentiranog spina te je kod njih magnetski dipolni moment jednak nuli, dok kod ne uparenih elektrona nastaje magnetski dipolni moment koji je različit od nule. Sve dok taj materijal ne stavimo u vanjsko magnetsko polje, momenti unutar materijala će biti nasumično orijentirani te ne postoji magnetizacija. Ako materijal unesemo u magnetsko polje dolazi do djelomičnog poravnanja momenata te magnetsko polje privlači uneseni materijal. Nakon uklanjanja materijala iz polja svi momenti se vraćaju u prvobitno nasumično poredano stanje [10]. Na slici 2.7. je prikazano djelovanje magnetskog polja na paramagnetski materijal.



Slika 2.7. Prikaz djelovanja vanjskog magnetskog polja na paramagnetski materijal [11]

2.1.5. Ferimagnetizam

Ferimagnetizam je svojstvo materijala koji posjeduju određena svojstva fero i antiferomagnetskih materijala. Poput feromagnetskih materijala posjeduju svojstvo spontane magnetizacije ispod određene temperature čak i bez prisustva vanjskog magnetskog polja. Poredak magnetskih momenata unutar domene je kao kod antiferomagnetskih materijala to jest u antiparalelnom obliku. Iznos tih magnetskih momenata je različitog iznosa te zbog toga ne dolazi do poništavanja magnetskog momenta unutar domene već dolazi do spontane magnetizacije no puno manjeg iznosa. Posjeduju veliku pozitivnu susceptibilnost te ovise o temperaturi poput feromagneta u smislu da gube svojstva ako se materijal zagrije preko kritične Curieove temperature [7]. Na slici 2.8. su prikazani magnetski momenti unutar domene ferimagnetskog materijala.



Slika 2.8. Prikaz magnetskih momenata unutar domene ferimagnetskog materijala [12]

2.2. Permeabilnost materijala

Permeabilnost materijala u magnetizmu predstavlja magnetsku vodljivost nekog materijala, označena je s Grčkim slovom μ te se mjeri u henrijima po metru. Definirana je kao količnik magnetske indukcije B i jakosti magnetskog polja H . Vrste magnetskih materijala također imaju specifične raspone magnetske permeabilnosti po kojima ih svrstavamo. Prikaz materijala s različitim iznosima permeabilnosti vidimo iz tablice 2.1.

Relativna permeabilnost predstavlja prikaz koliko određeni materijal bolje vodi magnetski tok od vakuuma.

Tablica 2.1. Tablični prikaz permeabilnosti različitih materijala

| Materijal | Relativna permeabilnost, μ_r | Permeabilnost, μ (H/m) |
|------------------------------|--|------------------------------|
| Drvo | $1,25663 \times 10^{-6}$ | 1,00000043 |
| Željezo (99,95% čisto) | $2,5 \times 10^{-1}$ | 200 000 |
| Kobalt-željezo | $2,3 \times 10^{-2}$ | 18 000 |
| Permalloy | $1,0 \times 10^{-2}$ | 8 000 |
| Ferit (manganski cink) | $8,0 \times 10^{-4}$ | 640 ili više |
| Nikal | 1,26 do $7,54 \times 10^{-4}$ | 100 do 600 |
| Neodimijev magnet | $1,32 \times 10^{-6}$ | 1,05 |
| Martenzitni nehrđajući čelik | $9,42 \times 10^{-4}$ do $1,19 \times 10^{-3}$ | 750 do 950 |
| Vaukuum | $4\pi \times 10^{-7}$ | 1 |

2.3. Petlja histereze

Petlja histereze je pojava u sustavima koji se nalaze u magnetskom polju. Feromagnetski materijali su najčešće povezani s pojavom petlje histereze. Opisuje kašnjenje magnetizacije materijala za magnetskim poljem te se može prikazati funkcijom $B=f(H)$ u pravokutnom Kartezijevu koordinatnom sustavu, u kojoj B predstavlja gustoću magnetskog toka dok H predstavlja jakost magnetskog polja. Postoje dvije vrste histereze, ovisna o stopi te neovisna o stopi. Ovisna o stopi histereza predstavlja vrstu kod koje postoji kašnjenje između ulaza i izlaza, na primjer uzmemo li sinusoidalni ulaz:

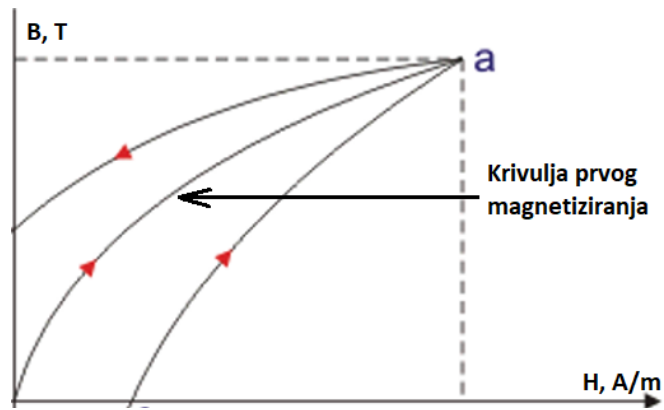
$$X(t) = X_0 \sin \omega t \quad (2-1)$$

gdje je X(t) ukupna trenutna vrijednost, X_0 početna vrijednost, ω predstavlja kut dok t predstavlja vrijeme. Taj sinusoidalni ulaz rezultira sinusoidalnim izlazom:

$$Y(t) = Y_0 \sin (\omega t - \varphi) \quad (2-2)$$

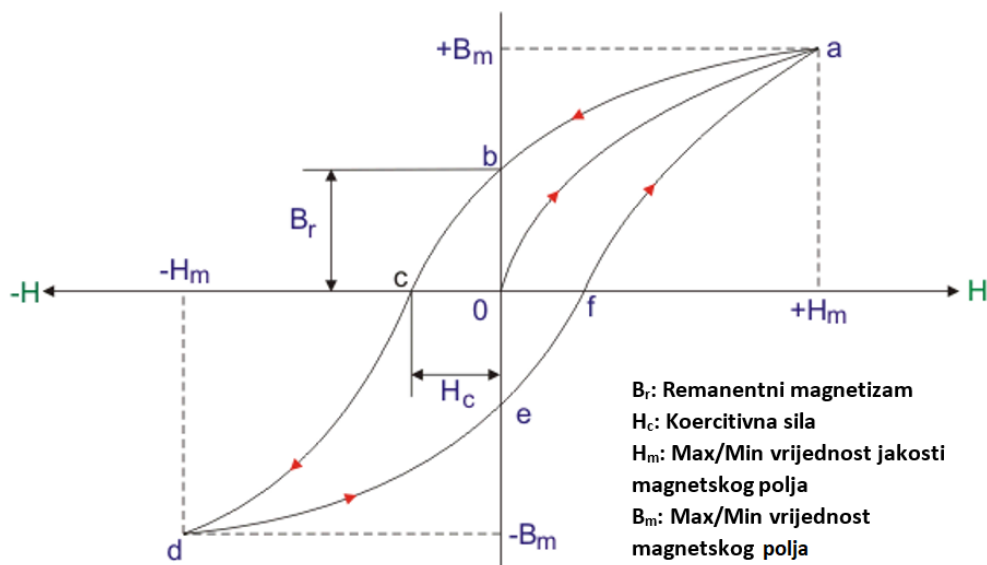
gdje postoji kašnjenje u obliku faznog pomaka. Y(t) predstavlja izlaznu trenutnu vrijednost, Y_0 početnu vrijednost dok kao i u prijašnjem izrazu ω predstavlja kut, t predstavlja vrijeme, a φ predstavlja fazni pomak. Neovisna o stopi histereza postoji u sustavima koji imaju trajno pamćenje prijašnjeg stanja koje ostaje i nakon nestanka tranzijenata.

Poveća li se jakost magnetskog polja od 0 do neke vrijednosti „a“ dobije se krivulja prvog magnetiziranja koja se javlja ako promatrani materijal do sada nije imao magnetska svojstva te ta točka ujedno predstavlja i točku zasićenja, slika 2.9.



Slika 2.9. Prikaz krivulje prvog magnetiziranja [13]

Petlja histereze pokazuje odnos između jakosti magnetske indukcije (B) i jakosti magnetskog polja (H). Petlja je generirana mjerenjem magnetske indukcije koja izlazi iz promatranog materijala uslijed promjene jakosti magnetskog polja. Nakon pojave krivulje prvog magnetiziranja ako se sa smanjenjem struje postepeno smanjuje jakost magnetskog polja prema slici 2.7. vidi se kako magnetska indukcija B kasni s promjenom te poprima vrijednost B_r u točki „b“ koja predstavlja zaostalu magnetsku indukciju dok je jakost magnetskog polja na nuli. Smanjenjem struje dolazi do povećanja jakosti magnetskog polja, ali suprotnog smjera. Dolazi do smanjenja jakosti magnetske indukcije, ali i dalje ostaje istog smjera sve do točke „c“ gdje se javlja koercitivna sila H_c , te je u toj točki jakost magnetske indukcije jednaka nuli. Nastavkom procesa dolazi do promjene smjera magnetske indukcije te ono raste do točke „d“ gdje poprima minimalnu vrijednost B_m . Smanjenjem struje negativnog smjera vidi se kako magnetska indukcija kasni s promjenom, te u točki „e“ jakost magnetskog polja iznosi 0, dok jakost magnetske indukcije poprima iznos $-B_r$. Povećanjem polja do točke „f“ gdje se javlja pozitivna koercitivna sila H_c te u toj točki vrijednost magnetske indukcije je jednaka 0. Na kraju krivulja se zatvara u točki „a“ gdje jakost polja i jakost magnetske indukcije poprima svoju maksimalnu vrijednost [14]. Opisani proces se može vidjeti i na slici 2.10. gdje je prikazana petlja histereze sa pojedinim točkama procesa.

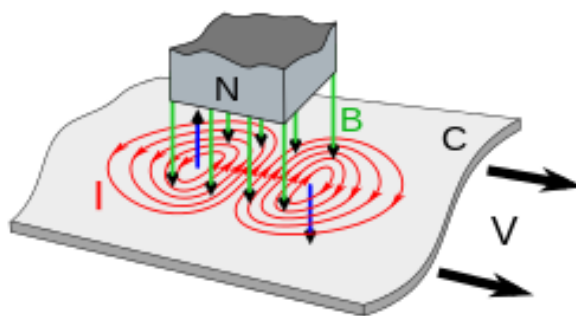


Slika 2.10. Prikaz petlje histereze [13]

2.4. Gubitci prilikom magnetiziranja

Za proces magnetizacije i demagnetizacije određenog materijala je potrebna određena energija. Tijekom ciklusa magnetizacije i demagnetizacije materijala ta energija koja je utrošena pojavi se u obliku topline, takvu vrstu gubitaka nazivamo gubitci zbog petlje histereze. Iz veličine površine petlje histereze vidimo gubitke, to jest što je šira površina to su gubitci veći. Uzme li se za primjer transformator koji ima konstantan proces magnetizacije i demagnetizacije također se javljaju i konstantni gubitci zbog petlje histereze to jest gubitci zbog topline. Samim time smanjuje se korisnost samog transformatora. Kako bi se smanjili gubitci, u transformatorima koristimo jezgru od mekog željeza koje ima užu petlju histereze [14].

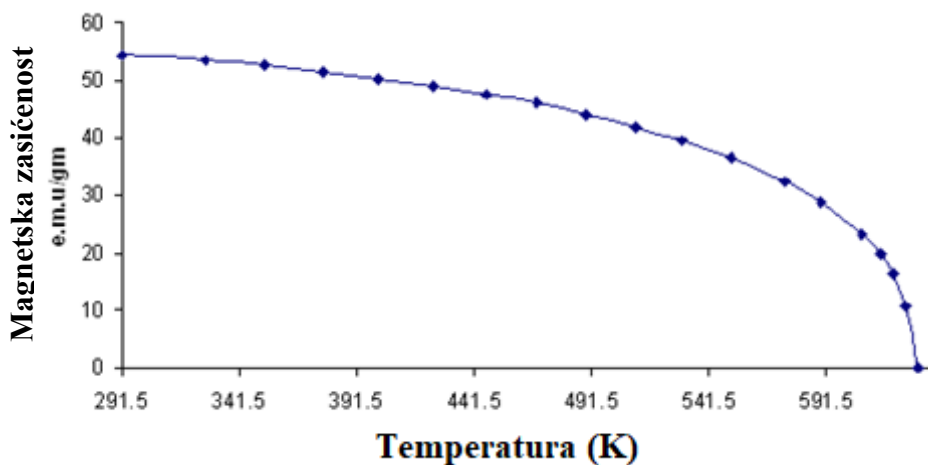
Također pod gubitke prilikom magnetiziranja ubrajaju se gubitci zbog vrtložnih struja. Vrtložne struje (Foucaultove struje) predstavljaju struje velike jakosti koje teku u zatvorenim petljama te se induciraju unutar vodiča zbog promjenjivog magnetskog polja po Faradayevom zakonu. Iznos veličine vrtložnih struja proporcionalan je jakosti magnetskog polja, površini petlje te brzini promjene magnetskog toka te obrnuto proporcionalan otporu materijala. Gubitci nastaju zbog toga što vrtložne struje stvaraju svoje magnetsko polje koje se suprotstavlja smjeru magnetskog polja koje je zaslužno za induciranje vrtložne struje po Lenzovom pravilu. Ovi gubitci mogu biti i poželjni u uređajima poput indukcijskih peći, elektrodinamičkim kočnicama na vozilima ili na elektrodinamičkim prigušivačima [15]. Na slici 2.11. vidi se prikaz formiranja vrtložnih struja.



Slika 2.11. Prikaz vrtložnih struja [15]

2.5. Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja

Magnetska svojstva materijala uvelike ovise o temperaturi kojoj su izloženi. Porastom temperature kojoj je materijal izložen dolazi do opadanja zasićenosti magnetiziranja sve do kritične temperature to jest Curieve temperature koja je specifična za svaki materijal kao što je vidljivo na slici 2.12. Curieva temperatura predstavlja maksimalnu temperaturu kojoj se magnetizirani materijal smije izložiti bez da izgubi svoja magnetska svojstva to jest da postane paramagnetski materijal [16].



Slika 2.12. Prikaz opadanja magnetske zasićenosti u niklu pri različitim temperaturama [16]

3. Podjela magnetskih materijala

Magnetski materijali, gledajući na ponašanje pri njihovom magnetiziranju, dijele se na tvrde i meke materijale. Granica između te dvije vrste materijala nije strogo definirana, ali prati se generalno pravilo koje navodi da se meki magnetski materijali uz prisustvo slabog vanjskog magnetskog polja magnetiziraju s velikim iznosom magnetskog toka, te da nakon uklanjanja vanjskog magnetskog polja nestaje i magnetsko polje koje je inducirano u materijalu. Tvrđi magnetski materijali prate pravilo koje navodi da u tom materijalu i nakon prestanka magnetiziranja to jest ako se taj materijal ukloni iz vanjskog magnetskog polja ostaje određen magnetski tok što je korisno za izradu permanentnih magneta.

3.1. Meki magnetski materijali

Ova vrsta materijala koristi se za pretvorbu napona i struje kao induktivni element te se koristi unutar izmjeničnih i istosmjernih magnetskih krugova pri različitim frekvencijama. Posjeduje i određene zahtjeve po kojima bi materijal onda pripadao mekim magnetskim materijalima, a neki od tih zahtjeva su strma krivulja magnetiziranja, mala temperaturna ovisnost, uska petlja histereze zbog gubitaka te dobre tehnološke sposobnosti. Tehnološke sposobnosti predstavljaju mogućnost obrade materijala različitim tehnološkim postupcima u npr. limove, sinteriranje te različiti postupci rezanja i lijevanja.

3.1.1. Tehnički čisto željezo i meki čelici

Tehnički čisto željezo predstavlja razinu čistoće približno 99,8% s malom količinom ugljika i mangana te mali udio drugih elemenata. Posjeduje iznimna magnetska svojstva te izvršnu mogućnost toplo/hladne obrade. U praksi primjena tehnički čistog željeza je izrada uređaja za magnetsku rezonancu, vodiča u osiguračima, elektroda za zavarivanje te naravno magneta.

Meki čelici predstavljaju vrstu materijala koji u sebi sadrži manje od 0,29% ugljika te uglavnom imaju feritnu strukturu. Po svojstvima nisu ni previše žilavi niti kruti, posjeduju dobru zavarljivost te su jeftini i laki za obradu.

3.1.2. Grupa ferosilicijskih legura

Ferosilicijske legure predstavljaju materijale koji se najčešće primjenjuju u frekvencijskom području industrijskog tipa to jest 50 do 60 Hz. Ova vrsta materijala koristi se zbog svojstava koje nudi silicij jer on u malom postotku povećava specifični otpor i permeabilnost tog materijala dok

manjuje koercitivnu silu, gubitke pri magnetiziranju i indukciju zasićenja. Nuspojava dodatka silicija željezu je i povećanje krhkosti koja smanjuje ukupnu obradivost materijala. U praksi se koriste dvije vrste ferosilicijskih legura, hladno valjane i toplo valjane koje sadrže 3,5% i 4,5% silicija. Hladno valjani limovi se dalje dijele na neorijentirane i orijentirane. Razlika je u magnetskim svojstvima ako se uzme u obzir smjer valjanja lima. Pomoću valjanja kod orijentiranih limova može se postići usmjerenost magnetskih momenata unutar materijala te se ova vrsta lima koristi tamo gdje je poznat smjer magnetskog toka primjerice u transformatorima. Kod neorijentiranih hladno valjanih limova magnetska svojstva ostaju ista bez obzira na smjer valjanja lima. Toplo valjani limovi imaju veći postotak silicija zbog toga što se koristi viša temperatura pri samom valjanju. U tablici 3.1. je prikazana usporedba dobivenih magnetskih svojstava pri dodavanju silicija u željezo pri različitim vrstama obrade to jest valjanja lima [6].

Tablica 3.1. Usporedba svojstava dvaju metoda obrade FeSi limova [6]

| Lim | Gubitci 1T (w/kg) | Gubitci 1,5T (W/kg) | H _c (A/m) | B _m (T) | μ _p | μ _m |
|----------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|----------------|
| Toplo valjani | ≅ 0,8-0,9 | ≅ 2 | ≅ 80 | ≅ 1,9 | ≅ 400-600 | ≅ 15000-20000 |
| Hladno valjani | ≅ 0,5 | ≅ 1 | ≅ 50 | ≅ 1,9 | ≅ 1500 | ≅ 40000-60000 |

3.1.3. Grupa feronikalnih legura

Feronikalni materijali su dio najčešćih to jest najpoznatijih legura. Ova legura postoji u raznim izvedbama jer se željezo i nikal mogu miješati u raznim omjerima. Razlog dodavanja nikla željezu je magnetsko omekšanje. Posjeduju vrlo dobra tehnološka svojstva te se iz njih generalno dobiju limovi debljine približno 0,02 milimetra. Ova legura naspram ferosilicijske legure se koristi pri frekvencijama nižim od 100kHz. Kao i spomenuta ferosilicijska legura i feronikalnu leguru je potrebno toplinski obraditi kako bi dobili željena svojstva, ali nakon konačnog oblikovanja i to u magnetskom polju. Feronikalna legura osjetljivija je na povišene temperature naspram ferosilicijskih te se ta pojava naziva permalof efekt. Također dolazi i do određene osjetljivosti na mehanička naprezanja. Generalno koristi se do 40% nikla u leguri. Primjena ove legure je u području gdje je potreban rad pri višim frekvencijama koje znače i veće iznose gubitaka zbog vrtložnih struja.

3.2. Tvrđi magnetski materijali

Tvrde magnetske materijale odlikuje svojstvo zadržavanja magnetiziranja i nakon uklanjanja vanjskog magnetskog polja to jest oslanjaju se na akumuliranu energiju koja je u njima ostala (zaostali magnetizam). Poželjno je ta ovakva vrsta materijala ima što širu površinu petlje histereze. Najstariju vrstu tvrdih magnetskih materijala čini ugljični i legirani čelik. Posjeduju malu koercitivnu silu zbog čega su osjetljivi na vanjske utjecaje. Disperzno kaljene legure posjeduju stabilnu strukturu što znači da su otporniji i na veće temperature. Imaju dodatak aluminijske što ih čini lakšim te otpornijim na koroziju. Duktilni materijali predstavljaju mehanički najmekše tvrde magnetske materijale. Posjeduju dobre tehničke sposobnosti. Kobalt je feromagnetski materijal sa širokom primjenom u današnjem svijetu. Pretežno se koristi u litij ionskim baterijama, ali njegov dodatak u legurama je glavna primjena. Prva primjena je bila u Alnico leguri koja je razvijena sredinom 20. stoljeća. Daljnjim razvojem i istraživanjem te miješanjem samarija i kobalta dobiva se legura samarij kobalt koja je i danas u širokoj primjeni u obliku permanentnih magneta. Kobaltne legure su u primjeni zbog njihove toplinske stabilnosti te se zbog toga koriste u lopaticama plinskih turbina, te zbog toga što su kobaltne legure otporne na koroziju i trošenje koriste se u protezama i ortopedskim implantatima. Oksidni magneti su mješavine raznih oksida sa željeznim oksidom, te im je glavna prednost veliki otpor i mala težina, dok im je veliki nedostatak toplinska osjetljivost [6].

Tablica 3.2. Tablični prikaz svojstava tvrdih magnetskih materijala [6]

| Vrsta materijala | H_c (kA/m) | B_r (T) | $(BH)_m$ (kWs/m ³) | f_i | Magnetiziranje H (kA/m) |
|-------------------------|--------------|-----------|--------------------------------|-------|------------------------------|
| Ugljični čelici | 4-20 | 1 | 1-8 | 0,4 | 64 |
| Disperzno kaljeni | 10-50 | 0,5-1,2 | 10-50 | 0,9 | 240 |
| Duktilni | 40-60 | 0,3-0,5 | 3-7 | 0,4 | 300 |
| Rijetki zemni metali | 700 | 0,9 | 160 | 0,4 | 5000 |
| Oksidni | 150 | 0,2-0,4 | 7-8 | 0,2 | 400 |

4. Metode ispitivanja magnetskih svojstava materijala izmjeničnom strujom

Provedbom ispitivanja svojstava materijala istosmjernom strujom ne može se u cijelosti odrediti kako će se dani materijal ponašati u izmjeničnom magnetskom polju koja se koriste većinskim dijelom u tehničkoj upotrebi. Gubitci zbog vrtložnih struja nastaju zbog djelovanja izmjeničnog magnetskog polja te su važni zbog njihovog utjecaja pri višim frekvencijama. Podatke o ponašanju magnetskih materijala koji se nalaze u izmjeničnim magnetskim poljima dobivaju se snimanjem vremenske ovisnosti trenutnih vrijednosti magnetske indukcije o jakosti magnetskog polja. Pomoću dobivenih podataka određuju se odnosi između efektivnih, tjemnih i srednjih vrijednosti magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja, ujedno pomoću dobivenih podataka određuje se i dinamička petlja histereze koja predstavlja gubitke zbog vrtložnih struja i histereze [17].

4.1. Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu

Vatmetrička metoda se najčešće koristi za dobivanje podataka o gubicima u željeznim limovima pomoću Epsteinova aparata te je ta metoda standardizirana po IEC 60404-2 normi [18]. Epsteinov aparat u mjerenju služi kao transformator u praznom hodu. Uređaj je napravljen u obliku kvadrata kojemu su stranice duge 25 centimetara. Svaka od tih stranica sadrži primarne serijski spojene namote i sekundarne namote koji su također serijski spojeni. Potporni materijal oko kojeg je namotan primar i sekundar mora biti izrađen od izolirajućeg i ne magnetizirajućeg materijala. Namot treba biti ravnomjerno raspoređen tako da formira kvadrat, duljine do 190 milimetara te se generalno koristi 700 ili 1 000 namota, za sekundar se koriste iste dimenzije, ali je izrađen od tanje žice. Trake magnetskog materijala koje se umeću moraju biti između 280 i 320 milimetara. Nužno je da budu približno jednake duljine s tolerancijom $\pm 0,5$ milimetara. Efektivna duljina magnetskog toka (l_m) se pretpostavlja da je 0,94 metara. Aktivna masa to jest masa uzorka koja je magnetski aktivna se računa po izrazu:

$$m_a = \frac{m \times l_m}{4l} \quad (4-1)$$

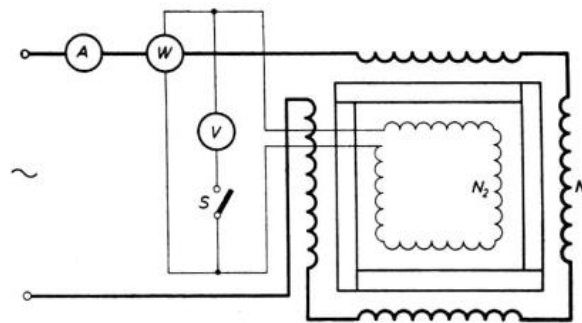
gdje je m ukupna masa uzorka.

Spoj koji se koristi pri mjerenju vidljiv je na slici 4.1. Primarni namot se koristi za magnetiziranje te je spojen na sinusni napon koji se namješta na željenu vrijednost. Također na primarni namot je serijski spojen ampermetar te strujna grana vatmetra. Na sekundarni namot koji služi za mjerenje spojena je naponska grana vatmetra i voltmetar. Uređaj se pusti u pogon, kroz strujnu granu vatmetra teče struja primara trenutne vrijednosti i_1 , a na sekundarnoj grani to jest naponskoj grani vatmetra je trenutna vrijednost napona u_2 , te nakon što se podese željeni napon isključi se voltmetar

zbog utjecaja na gubitke. Inducirani napon na sekundaru je veći od napona u_2 te pad napona dobije se prema formuli 4-2, gdje je struja i_2 jednaka omjeru sekundarnog napona i otpora naponske grane vatmetra. Gubitci u željezu mjereći ih ovom metodom dobiju se ako očitane vrijednosti s vatmetra se umanje za gubitke u naponskoj grani vatmetra, kao što je vidljivo po formuli 4-3. Specifični gubitci dobivaju se ako se gubitci u željezu podijele s masom uzorka [17].

$$u_2 = e_2 - R_2 \times i_2 \quad (4-2)$$

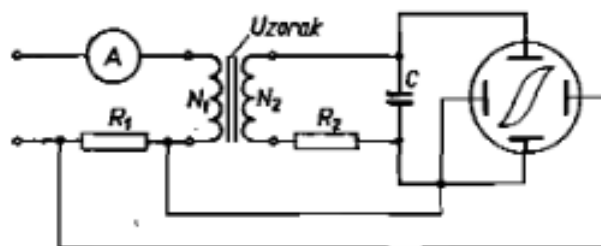
$$P_{Fe} = P_W - \frac{U_2^2}{R_W} \quad (4-3)$$



Slika 4.1. Prikaz spoja vatmetričke metode mjerenja gubitaka [19]

4.2. Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom

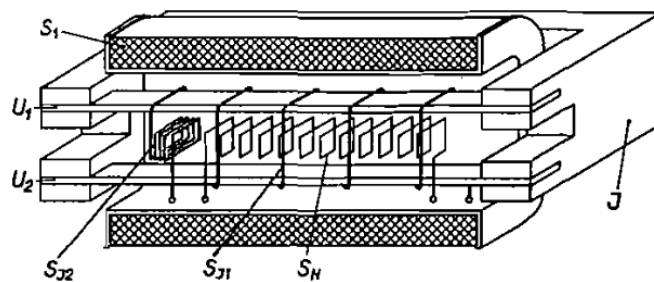
Pomoću osciloskopa može se snimiti dinamička petlja histereze pomoću spoja koji je prikazan na slici 4.2. Namot primara koji ima N_1 zavoja omotan je oko uzorka te priključen preko otpora R_1 na izmjenični izvor napona. Sekundarni namot N_2 priključen je na otpor R_2 i kapacitet C . Pad napona na otporu R_1 dovodi se na pločice za horizontalni otklon. Otklon u smjeru osi x je time proporcionalan struji magnetiziranja. Pad napona koji se javlja na kapacitetu C dovodi se na pločice za vertikalni otklon, te pri tome mora se paziti na uvjet $R_2 \gg \frac{1}{\omega C}$. Na zaslonu osciloskopa tada dobiva se petlja histereze ispitivanog uzorka. Ovakva metoda mjerenja je korisna ako je potrebna brza kontrola mjerenja u nekakvom pogonu [19].



Slika 4.2. Prikaz spoja za snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom [17]

4.3. Snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom

Instrumenti s pomičnim svitkom i mehaničkim ispravljačem to jest vektrometri svoje ispravljačko djelovanje postižu pomoću mehaničkog kontakta koji se otvara i zatvara u toku jedne periode. Samim time posjeduju svojstvo velikog otpora kada je kontakt otvoren te zanemarivog otpora kada je kontakt zatvoren. Vektrometar radi na principu induciranja izmjeničnog napona u svitku po zakonu elektromagnetske indukcije. Na slici 4.3. je prikazan jaram i namoti uređaja za snimanje dinamičke petlje histereze. Limove koje želimo ispitati podijelimo na dva jednaka snopa te se umetnu u procjepe na jarmu. Izmjenično magnetiziranje materijala se postiže pomoću svitka S_1 koji je priključen na izvor izmjeničnog napona. Između dva snopa limova koja ispituje nalazi se i svitak S_H te je ta jakost magnetskog polja gotovo jednaka kao i u limovima. Priključi li se vektrometar na taj svitak tada se mjeri trenutna vrijednost jakosti magnetskog polja u samom uzorku. Mjerenje magnetske indukcije B to jest polarizacije J vrši se pomoću dva svitka. Svitak S_{J1} omotan je oko limova. Svitku S_{J1} u seriju je dodan i suprotno namotani svitak S_{J2} , zbog toga što bi bez tog svitka vektrometar mjerio trenutnu magnetsku indukciju u limu bez obuhvaćanja toka kroz zrak. Mjerne točke dobivaju se promjenom faznog pomaka samog zatvaranja kontakata u mehaničkom ispravljaču vektrometra, pri tome mora se držati stalan izmjeničan napon. Tim procesom dobivaju se mjerne točke koje se ucrtavaju na grafu te samim time dobiva se dinamička petlja histereze [17].



Slika 4.3. Prikaz jarma za snimanje dinamičke petlje histereze [17]

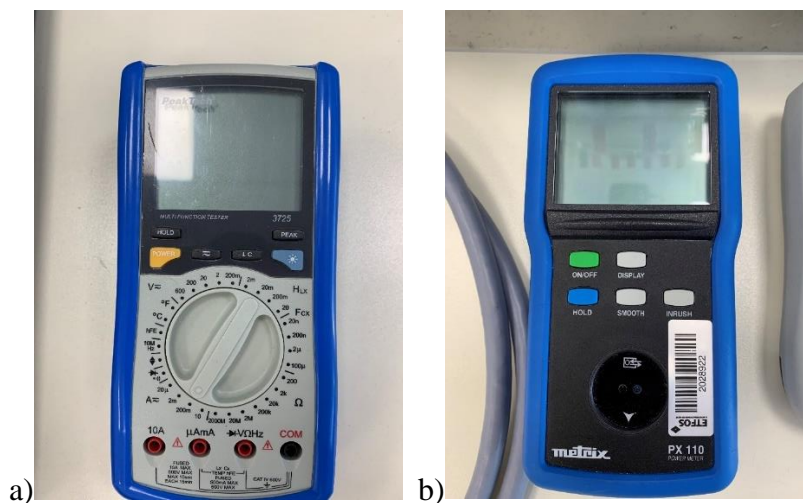
5. Ispitivanje magnetskih svojstava materijala u laboratoriju

Ispitivanje magnetskih svojstava uzoraka materijala provedeno je u Laboratoriju za električna mjerenja 1-23, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek sa odgovarajućom opremom koja je opisana u nastavku. Uzorci materijala koji su korišteni u ovom ispitivanju su CRNGO (hladno valjani čelik bez orijentacije zrna) i CRGO (hladno valjani čelik s orijentacijom zrna).

CRNGO takozvani elektrotehnički čelik je slitina željeza i silicija te se dobiva procesom hladnog valjanja pri čemu se ne uzima u obzir smjer valjanja lima. Generalno sadrži 2 do 3,5% silicija te posjeduje slična magnetska svojstva u svim smjerovima upravo zbog načina izrade samog materijala. Koristi se kada je važnija isplativost izrade materijala od učinkovitosti te u primjenama kada smjer magnetskog toka nije konstantan kao u električnim motorima i generatorima s pomičnim dijelovima.

CRGO je također elektrotehnički čelik koji je slitina željeza i silicija te se dobiva procesom hladnog valjanja, ali pri ovom procesu se pazi na orijentaciju valjanja lima kako bi se povećala gustoća magnetskog toka za ~30%, a s time dolazi do smanjenja magnetskog zasićenja za ~5%. Generalno sadrži 3% silicija te se ovakva vrsta materijala koristi na mjestima gdje je poznat magnetski tok to jest u jezgrama naponskih i distribucijskih transformatora te u manjoj primjeni za audio transformatore [20].

Mjerni uređaji koji su bili potrebni u ovim mjerenjima su dva multimetra proizvođača PeakTech, broj modela 3725, te vatmetar proizvođača Metrix, broj modela PX110.



Slika 5.1. Prikaz: a)PeakTech multimetra b)metrix vatmetra

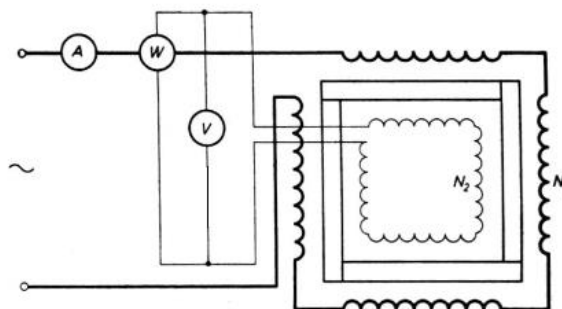
Za ispitivanje gubitaka magnetskih uzoraka materijala na Epstein uređaju korišten je Brockhaus Epstein frame (700 namota). Uređaj se sastoji od primarnog i sekundarnog namota koji ima 4x175 namotaja, dimenzija vodiča primarnog namota je 3mm x 1,8mm, dok je promjer vodiča sekundarnog namota 1 milimetar. Mjerna frekvencija koju uređaj podržava je u granici od 1Hz do 150Hz. Jačina polja je u granici od 1 A/m do 30 000 A/m, te jakost magnetske indukcije je od 0,001 T do 2 T [21].



Slika 5.2. Prikaz Brockhaus Epstein 700 uređaja

5.1. Ispitivanje gubitaka magnetskih limova na Epstein uređaju

Ispitivanje gubitaka u limovima provelo se pomoću opreme koja je spomenuta u prethodnom poglavlju. Mjerni uređaji i Epsteinov uređaj spojeni su prema shemi koja se nalazi na slici 5.3. te su podešeni mjerni opsezi na mjernim uređajima.



Slika 5.3. Prikaz sheme spoja za vatmetričku metodu mjerenja [19]

Za ovaj slučaj mjerenja je korišten mjerni opseg ampermetra 200mA te 20V na voltmetru. Prikaz mjernog spoja prema shemi 5.3. u laboratoriju se nalazi na slici 5.4.



Slika 5.4. Prikaz spoja u laboratoriju

Za uspješno provođenje mjerenja morala se prvo izračunati ukupna duljina uzoraka po formuli 5-1. Nakon izračunatih duljina izračunat je presjek jezgara (A, m^2) pojedinih uzoraka po formuli 5-3. Za specifičnu masu (gustoću) γ korištena je vrijednost od 7650 kg/m^3 što je prosječna vrijednost za lim koji u sastavu ima $\sim 3\%$ silicija. Masa uzorka CRNGO čelika je $0,7352$ grama te duljina pojedinačnog uzorka je $l_1=0,320$ metara. Masa CRGO čelika je $0,5629$ grama te je duljina pojedinačnog uzorka l_2 $0,305$ metra. Izračunate vrijednosti su prikazane u tablici 5.1.

$$l = 4 \times l_x \quad (5-1)$$

$$V = \frac{m}{\gamma} \quad (5-2)$$

$$A = \frac{V}{l} \quad (5-3)$$

Tablica 5.1. Prikaz izračunatih vrijednosti presjeka jezgara za pojedini materijal

| Vrsta lima | l, m | V, m ³ | A, m ² |
|------------|------|-----------------------|-----------------------|
| CRNGO | 1,28 | $9,61 \times 10^{-5}$ | $7,51 \times 10^{-5}$ |
| CRGO | 1,22 | $7,36 \times 10^{-5}$ | $6,03 \times 10^{-5}$ |

Nakon izračunatih vrijednosti presjeka jezgara bilo je potrebno izračunati vrijednosti sekundarnog napona, za svaku vrijednost indukcije koja se povećavala od 0 do 1 u koracima od $0,2T$, pomoću kojeg je preko regulacijskog transformatora namješten dobiveni napon za svaku vrijednost indukcije te je očitana vrijednosti s instrumenata. Napon sekundara izračunat je po formuli 5-4

$$E_2 = 4,44 \times f \times N_2 \times B \times A \quad (5-4)$$

5.1.1. Tablični i dijagramski prikaz krivulja magnetiziranja za ispitivane limove

Nakon provedene pripreme za provođenje mjerenja započeto je mjerenje te upisivanje vrijednosti u tablicu. Prvo je odrađeno mjerenje gubitaka za CRGO lim, zatim za CRNGO. Izmjerene i izračunate vrijednosti prikazane su u tablici 5.2. i 5.3.

$$H = \frac{N \times I}{l} \quad (5-5)$$

$$P_{fe} = P - \frac{U^2 \times (R_W + R_V)}{R_W \times R_V} \quad (5-6)$$

$$P_{spec} = \frac{P_{fe}}{m} \quad (5-7)$$

Tablica 5.2. Prikaz izračunatih i izmjerenih vrijednosti za CRGO uzorak

| B, T | E ₂ , V | U, V | I, A | P, W | H, A/m | P _{Fe} , W | P _{spec} , W/kg |
|------|--------------------|-------|--------|--------|---------|---------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 1,874 | 1,860 | 0,0065 | 0,0133 | 3,7295 | 0,0131 | 0,0233 |
| 0,4 | 3,748 | 3,720 | 0,0108 | 0,0407 | 6,1967 | 0,0404 | 0,0717 |
| 0,6 | 5,622 | 5,620 | 0,0147 | 0,0840 | 8,4340 | 0,0835 | 0,1483 |
| 0,8 | 7,496 | 7,500 | 0,0183 | 0,1350 | 10,5000 | 0,1343 | 0,2386 |
| 1 | 9,371 | 9,350 | 0,0220 | 0,2057 | 12,6230 | 0,2048 | 0,3639 |

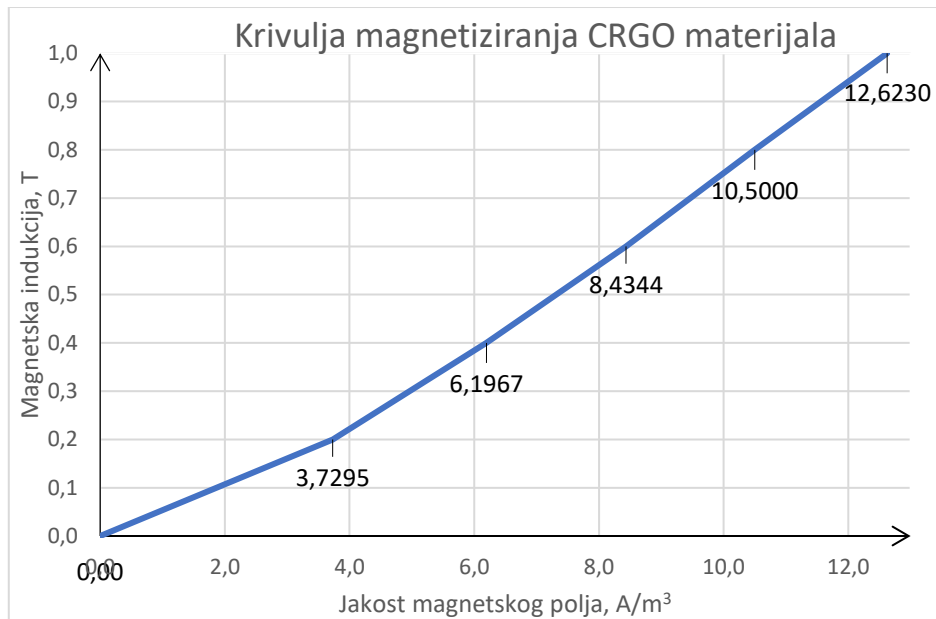
Tablica 5.3. Prikaz izračunatih i izmjerenih vrijednosti za CRNGO uzorak

| B, T | E ₂ , V | U, V | I, A | P, W | H, A/m | P _{Fe} , W | P _{spec} , W/kg |
|------|--------------------|--------|--------|---------|---------|---------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,2 | 2,334 | 2,350 | 0,0409 | 0,09165 | 22,3672 | 0,0914 | 0,1244 |
| 0,4 | 4,668 | 4,750 | 0,0581 | 0,2736 | 31,7734 | 0,2732 | 0,3716 |
| 0,6 | 7,002 | 7,080 | 0,0758 | 0,5183 | 41,4531 | 0,5177 | 0,7041 |
| 0,8 | 9,336 | 9,400 | 0,0950 | 0,9021 | 51,9531 | 0,9012 | 1,2258 |
| 1 | 11,671 | 11,650 | 0,1177 | 1,3689 | 64,3672 | 1,3678 | 1,8605 |

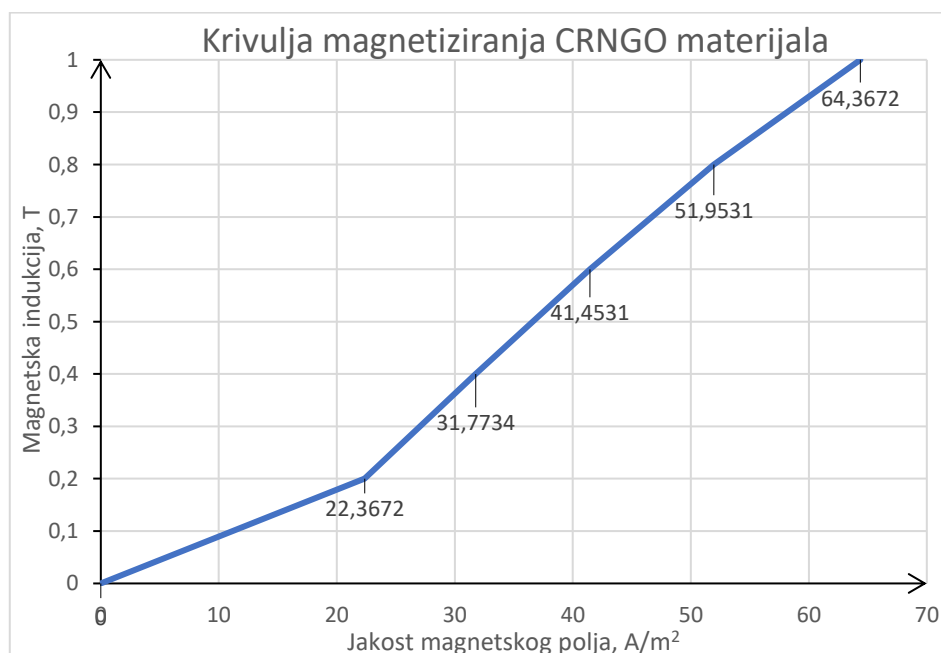
Nakon provedenog mjerenja izračunata je i jakost magnetskog polja (H) te ukupni (P_{Fe}) i specifični (P_{spec}) gubici u željezu po formulama 5-5, 5-6 i 5-7. Unutarnji otpori instrumenata su izmjereni te iznose 1,225 MΩ za vatmetar te 10 MΩ za voltmetar.

Na osnovu prikazanih vrijednosti u tablicama 5.2. i 5.3. može se vidjeti kako je za iste vrijednosti magnetske indukcije B, bilo potrebno narinuti veći napon u slučaju CRNGO uzorka samim time iznos struje je također veći. Po formuli 5-5 vidi se kako je jakost magnetskog polja ovisna o veličini

struje te je zbog toga jakost magnetskog polja kod CRNGO uzorka veća nego li kod CRGO uzorka. Iz toga može se zaključiti kako je za istu vrijednost magnetske indukcije potrebna puno veća jakost magnetskog polja, što na kraju rezultira većom strujom te na kraju i većim gubitcima kao što se vidi iz tablica 5.2. i 5.3. Na slikama 5.5. i 5.6. prikazane su krivulje magnetiziranja pojedinih uzoraka gdje se također vidi ovisnost magnetske indukcije o jakosti magnetskog polja te se također vide vrijednosti jakosti magnetskog polja koje su kod CRNGO uzorka puno veće nego li kod CRGO uzorka.



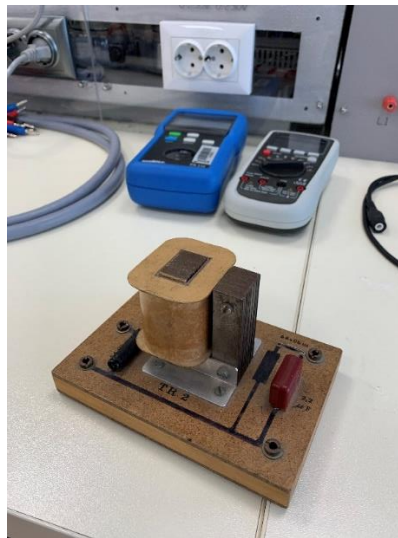
Slika 5.5. Krivulja magnetiziranja CRGO materijala dobivena rezultatima mjerenja



Slika 5.6. Krivulja magnetiziranja CRNGO materijala dobivena rezultatima mjerenja

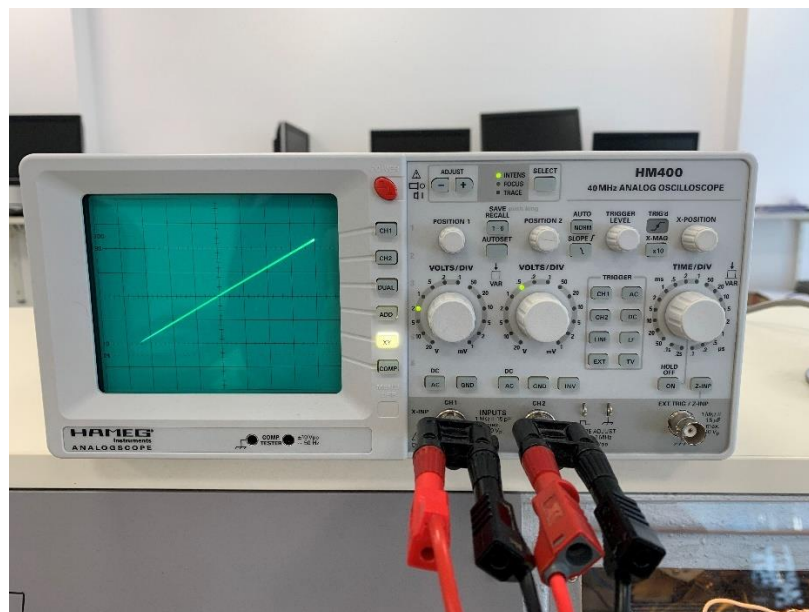
5.2. Snimanje petlje histereze različitih materijala osciloskopom

Snimanje petlje histereze CRGO i CRNGO uzoraka je također provedeno u istom laboratoriju fakulteta. Za ovaj pokus korišteni su voltmetar i ampermetar kao i iz prošlog pokusa, te uz njih bio je potreban i osciloskop te mjerni sklop koji je prikazan na slici 5.7. Shema spoja je prikazana na slici 4.2. u poglavlju 4.2.



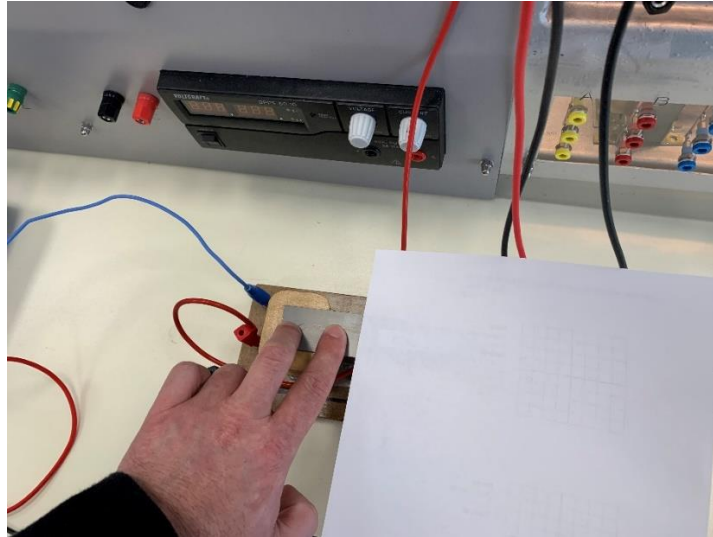
Slika 5.7. Prikaz transformatora korištenog u pokusu

Prije nego što se prisloni uzorak materijala na slici 5.8. vidi se očitavanje na osciloskopu kad materijal nije prislonjen na pločicu to jest vidi se petlja histereze zraka.



Slika 5.8. Prikaz petlje histereze zraka

Nakon snimanja dinamičke petlje histereze zraka, uzima se uzorak materijala te se prislanja na metalnu pločicu kao što je prikazano na slici 5.9. Također na mjernim instrumentima dobiva se vrijednost napona i struje za pojedini uzorak materijala, te vrijednosti su prikazane u tablici 5.4.



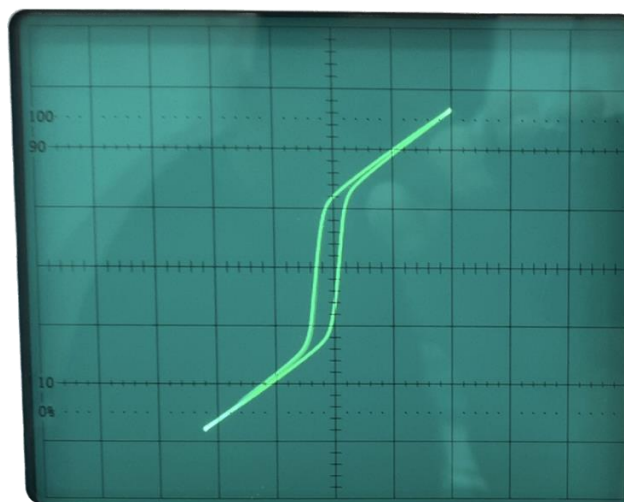
Slika 5.9. Prikaz načina prislanjanja uzorka materijala na trafo

Tablica 5.4. Prikaz izmjerenih vrijednosti struja i napona

| Vrsta materijala | Struja primara, A | Napon, V |
|------------------|-------------------|----------|
| Zrak | 0.1 | 24.6 |
| CRGO | 0.0496 | 24.6 |
| CRNGO | 0.0407 | 24.6 |

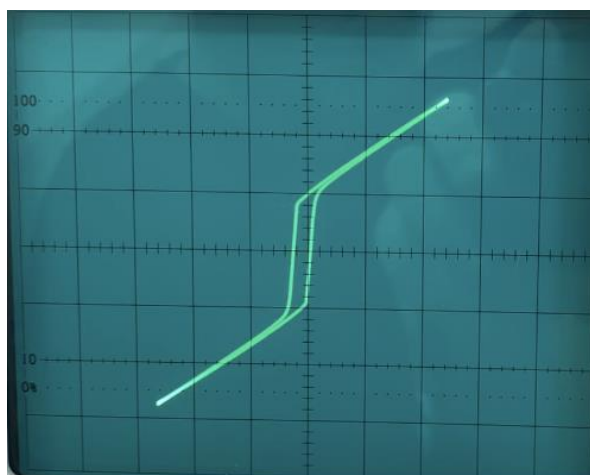
Izmjenom uzorka koji se prislanja dobivena je i druga petlja histereze. Na slikama 5.10. i 5.11. su prikazane dinamičke petlje korištenih uzoraka materijala.

CH1=2Volts/DIV, CH2=0,5Volts/DIV, Time/DIV=5ms



Slika 5.10. Petlja histereze CRNGO uzorka

CH1=2Volts/DIV, CH2=0,5Volts/DIV, Time/DIV=5ms



Slika 5.11. Petlja histereze CRGO uzorka

Usporedbom prikazanih petlji može se primijetiti kako je petlja histereze CRNGO uzorka nešto šira u odnosu na CRGO uzorak. Iz toga može se zaključiti da su gubitci kod CRNGO uzorka veći, što je također vidljivo i iz prethodnog mjerenja gdje su brojčano prikazani gubitci ovih uzoraka u tablicama 5.2. i 5.3 te i iz samih dijagrama koji su prikazani na slikama 5.5. i 5.6. Pomoću ove metode brzo se može snimiti petlja histereze i zaključiti kod kojeg su materijala gubitci veći, no za detaljniji pregled drugih povezanih veličina, ova metoda nije prigodna.

6. Zaključak

Provođenjem mjerenja pomoću Epsteinovog aparata utvrđuje se funkcionalna veza između magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja u ovom slučaju za CRNGO (hladno valjani čelik bez orijentacije zrna) te CRGO (hladno valjani čelik s orijentacijom zrna) uzorke. Pomoću izračunatih vrijednosti koje se nalaze u tablicama 5.2. i 5.3. može se zaključiti kako CRGO uzorak za istu razinu magnetske indukcije (B) zahtjeva manji sekundarni napon (E_2) nego li CRNGO uzorak što rezultira i većom strujom. Uzmu li se dobivene vrijednosti te se pomoću formula izračunaju vrijednosti gubitaka u željezu kao i specifični gubitci može se zaključiti kako se javljaju veći gubitci kod CRNGO uzorka zbog spomenutih većih iznosa struje i napona. Ovisnost magnetske indukcije o jakosti magnetskog polja vidi se iz grafova na slikama 5.5. i 5.6. te oni prikazuju kako kod CRNGO uzorka se javlja veća jakost magnetskog polja nego li kod CRGO materijala. U drugom dijelu pokusa snimljena je petlja histereze za pojedini uzorak te se iz slika 5.10. i 5.11. vidi kako je petlja histereze za CRNGO uzorak ipak nešto šira u odnosu na CRGO uzorak što u konačnici predstavlja veće gubitke. Iz dobivenih rezultata se može vidjeti zapravo utjecaj samog tehnološkog postupka izrade pojedinog materijala kao i utjecaj orijentacije zrna na same sposobnosti materijala odnosno na gubitke prilikom magnetiziranja. Razvojem proizvodnih procesa i zahtjeva za što većom energetsom učinkovitošću dolazi i do istraživanja daljnjih mogućnosti elektrotehničkih čelika u smislu poboljšanja njihovih električnih svojstava poput permeabilnosti, manjih gubitaka u željezu, veće toplinske stabilnosti i mnogih drugih. Meki magnetski kompoziti predstavljaju alternativu za elektrotehničke čelike zbog mogućnosti postavljanja magnetskih svojstava prema specifičnim potrebama kao i posjedovanje nešto manjih gubitaka zbog vrtložnih struja. Nadalje dolazi i do istraživanja amorfnih magnetskih materijala koji nemaju kristalnu strukturu te posjeduju vrlo male gubitke u jezgri i vrlo visoku permeabilnost no nedostatak je visoka cijena te krhkost usporedno s elektrotehničkim čelicima.

Literatura

- [1] <https://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/lidunka/GEOL2014/Geophysics9%20-Magnetism/Useful%20papers/Magnetism.htm> 18.02.2023.
- [2] <https://mpimagnet.com/education-center/magnetism-history-of-the-magnet/> 18.02.2023.
- [3] <https://www.magnusmagnetica.com/polarity> 20.06.2023.
- [4] <https://physics.stackexchange.com/questions/511415/magnetic-susceptibility> 20.06.2023.
- [5] <https://unacademy.com/content/cbse-class-12/study-material/physics/112285-2/> 18.02.2023.
- [6] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/EMIT_M1.pdf 19.02.2023.
- [7] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diamagnetism> 18.02.2023.
- [8] <https://gmw.com/magnetic-susceptibility/> 20.06.2023.
- [9] Šips Vladimir, Uvod u fiziku čvrstog stanja, Školska knjiga, Zagreb, 1991
- [10] <https://cse.umn.edu/irm/2-classes-magnetic-materials> 30.01.2023.
- [11] https://www.researchgate.net/publication/315516374_Magnetic_materials_for_nuclear_magnetic_resonance_NMR_and_magnetic_resonance_imaging_MRI 19.02.2023.
- [12] <https://www.bartleby.com/subject/engineering/mechanical-engineering/concepts/magnetic-properties-of-materials> 20.06.2023.
- [13] <https://www.electrical4u.com/hysteresis-loop/> 20.06.2023.
- [14] <https://byjus.com/jee/hysteresis/> 19.02.2023.
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current 19.02.2023.
- [16] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/curie-weiss.php?printable=1> 19.02.2023.
- [17] Vojislav Bego : Mjerenja u elektrotehnici, Četvrto dopunjeno izdanje, Tehnička knjiga Zagreb
- [18] https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60404-2%7Bed3.1%7Db.pdf 20.05.2023.
- [19] Predrag Krčum : Električna mjerenja, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, listopad 2012.
- [20] Yasuyuki Hayakawa, Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Volume 2, Electrical Steels, 2022.
- [21] <https://www.brockhaus.com/measurements/products/softmagnetic/est-series/mpg-200/?lang=en> (PDF sa tehničkim podacima) 23.05.2023.

SAŽETAK

U završnom radu opisane su metode ispitivanja magnetskih svojstava materijala te je provedeno mjerenje gubitaka u magnetskim limovima metodom Epsteina. Povijest o magnetskim materijalima ukratko je opisana, kao i nastanak i razvoj magnetskih materijala. Nadalje su opisana svojstva magnetskih materijala te su navedene vrste ponašanja magnetskih materijala koji se nalaze u magnetskom polju. Također uz njih opisane su i pojave koje se javljaju pri magnetiziranju poput petlje histereze te sami gubici prilikom magnetiziranja. Prije provedbe mjerenja potrebno je upoznati se s vrstama mekih i tvrdih magnetskih materijala kao i s vrstama mjerenja iz kojih se dobivaju mjerni rezultati pomoću kojih se mogu izračunati gubici. Pri provođenju mjerenja metodom Epsteina dobiveni su mjerni rezultati iz kojih su izračunati gubici koji su prikazani tablično i grafički te su objašnjene različite vrijednosti gubitaka korištenih uzoraka magnetskih materijala. Također je provedeno snimanje petlje histereze pomoću osciloskopa te su prikazane petlje histereze za spomenute uzorke.

Ključne riječi: Magnetski materijali, magnetska svojstva, petlja histereze, magnetski gubici, elektrotehnički čelik

ABSTRACT

Measurement of losses in magnetic laminations using the Epstein method

The final thesis describes methods for testing the magnetic properties of materials, and measurements of losses in magnetic laminations were conducted using the Epstein method. The history of magnetic materials is briefly described, including their origins and development. The properties of magnetic materials are described, and the types of behaviors exhibited by magnetic materials in a magnetic field are listed. The phenomena that occur during magnetization, such as the hysteresis loop, as well as the losses during magnetization, are also explained. Prior to conducting the measurements using the Epstein method, it is necessary to familiarize oneself with the types of soft and hard magnetic materials, as well as the types of measurements from which measurement results are obtained for calculating losses. By performing measurements using the Epstein method, measurement results were obtained, from which losses were calculated and presented in tabular and graphical form. The different loss values of the magnetic material samples used are explained. Hysteresis loop recording using an oscilloscope was also performed, and hysteresis loops for the mentioned samples are presented.

Key words: Magnetic materials, magnetic properties, hysteresis loop, magnetic losses, electrical steel

ŽIVOTOPIS

Gabriel Čupić rođen je u Slavonskom Brodu 24.06.2000. godine. Nakon završetka osnovne škole Ivan Filipović u Velikoj Kopanici, obrazovanje nastavlja u Tehničkoj školi Slavonski Brod, smjer elektrotehničar. Zatim 2019. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te upisuje stručni studij, smjer elektroenergetika.

Potpis autora