

Ispitivanje svojstava magnetskog materijala istosmjernom strujom

Toman, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:200:903454>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-09**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Stručni studij Elektroenergetike

**Ispitivanje svojstava magnetskih
materijala istosmjernom strujom**

Završni rad

Marko Toman

Osijek, 2015.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Magnetski materijali	2
2.1 Ponašanje pri magnetiziranju i razmagnetiziranju	2
2.2 Krivulja prvog magnetiziranja	2
2.3 Permeabilitet.....	2
2.4 Petlja histereze.....	3
2.5 Gubici kod magnetiziranja	4
2.6 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja	5
2.7 Faktor izbočenosti	5
2.8 Podjela.....	6
2.9 Izvedbe jezgri	6
2.10 Grupa ferosicilijskih lagura.....	6
2.11 Grupa feronikalnih lagura	7
2.12 Praškaste mekomagnetske jezgre	7
2.13 Materijali za tvrde magnete.....	7
2.15 Ugljici i legirani čelici.....	8
3. Ispitivanje svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom	8
3.1 Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu	8
3.2 Snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom	9
3.3 Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom.....	10
4. Ispitivanje svojstava magnetskih materijala istosmjernom strujom	11
4.1 Balistička metoda s prstenastim uzorkom.....	12
4.2 Fahy-Simplexov permeametar	17
4.3 Iliovicijev jaram	17
4.4 Ewingova metoda istma	18
4.5 Stäblein-Steinitzov uređaj	19
5. Mjerenje magnetskih svojstava u laboratoriju	21
5.1 Snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom	21
5.2 Postupak snimanja petlje histereze.....	22
5.3 Ispitivanje svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom.....	25

6. Pogreške mjerenja	28
6.1 Grube pogreške	28
6.2 Sistematske pogreške	29
6.3 Slučajne pogreške.....	29
Zaključak.....	32
I. Literatura.....	33
II. Popis slika i tablica.....	34
III. Sažetak	36
IV. Summary	36
V. Životopis.....	37

1. Uvod

Svaki tehnički teorem mora se dokazati pomoću mjerenja. Pomoću mjerenja provjerava se točnost teoretskih izvoda, teorema, definicija, razmatranja. U elektrotehničkoj praksi, mjerenjem se potvrđuje svojstva materijala (elektrotehničkog materijala), provjera kvalitete proizvoda, dobiva se informacije o ispravnosti, sigurnosti, ekonomičnosti uređaja, provjera ispravnosti električne instalacije

Metrologija je znanost o mjerenju (metron – mjerenje, logos – znanost). Znanost o mjerenju u principu obuhvaća :

- principe i metode mjerenja,
- sredstva za izvođenje mjerenja i kontrole[1]

Osnovni zadaci metrologije mogu se podijeliti na :

- razvoj generalne teorije mjerenja,
- utvrđivanje jedinica fizikalnih veličina i njihovih sustava,
- razvoj pouzdanih etalona mjernih jedinica metoda i postupaka njihovog čuvanja i reproduciranja,
- razreda metoda, postupaka, tehnika i sredstava izvođenja mjerenja i kontrole fizikalnih veličina,
- razreda metoda ocjene pogreške mjerenja, stanja i točnosti sredstava mjerenja i kontrole,
- razvoj ekspertnih sustava osiguranja potrebne točnosti mjerenja i kontrole i upravljanja proizvodnim procesima,
- razvoj metoda postizanja jedinstva mjera i mjerenja i realizacija aktivnosti usmjerenih ka povećanju točnosti, pouzdanosti i proizvodnosti mjerenja i kontrole[9]

Svako mjerenje treba se iskazati u nekim mjernim jedinicama, pa je potrebno poznavati *Međunarodni sistem jedinica*, međunarodnom kraticom SI. *Međunarodni sistem jedinica* je skup mjernih jedinica koje su zakonski propisane u većini država. SI sustav se dijeli na osnovne i izvedene mjerne jedinice. Osnovne veličine SI sustava su: duljina (l) - metar(m), masa(m) - kilogram(kg), vrijeme(t) - sekunda(s) , jakost električne struje (I) - amper(A), termodinamička temperatura(T) - kelvin(K), jakost svjetlosti(I) - kandela(cd), količina tvari(n) - mol(mol).

Upotreba Međunarodnog sistema jedinica kod nas je propisana standardima JUS A.A 1.020 i JUS A.A 1.040, koji su objavljeni 1957. godine te Zakonom o mjernim jedinicama i mjerilima, objavljenim u Službenom listu FNRJ broj 45 od 15. Studnog 1961. godine u koji su uvršteni i definicije jedinica prema zaključcima Jedanaeste generalne konferencije za mjerenje i utege, održane 1960. godine.[6]

2. Magnetski materijali

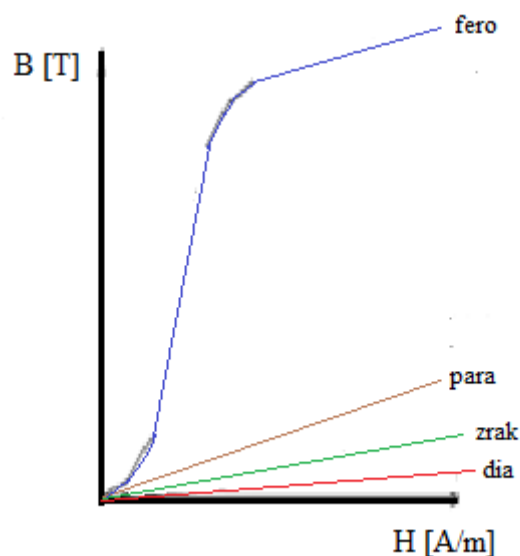
Magnetski materijali su materijali koji usmjerenom vode magnetski tok i time omogućuju elektromagnetske pretvorbe. Koriste se materijali koji izrazito dobro vode magnetski tok. Praktički svi materijali su magnetski, ali su samo feromagnetski i ferimagnetski se lako mogu magnetizirati slabim poljem (H), pa se pretežito oni koriste u tehnologiji. [5]

2.1 Ponašanje pri magnetiziranju i razmagnetiziranju

Za izradu magnetske jezgre vrijednost materijala mjerimo po cijelom nizu svojstava (električkih, tehnoloških). Jedan od važnijih kriterija je veličina magnetskog toka to jest koji bi materijal pri određenom magnetskom polju (H) propusti. Važan pojam je magnetske indukcije (B), to jest gustoće magnetskog toka (Vs/m^2) ili (T - Tesla). Odnos između magnetskog polja i magnetske indukcije kod zraka, paramagnetskih i diamagnetskih materijala je linearan, kod feromagnetskih materijala odnos nije linearan. Krivulja ovisnosti magnetske indukcije o veličini magnetskog polja naziva se krivulja magnetiziranja ili B/H karakteristika. [5]

2.2 Krivulja prvog magnetiziranja

Krivulja prvog magnetiziranja je krivulja prvog magnetiziranja materijala, znači materijala koji do sada bio nenamagnetiziran i sada se prvi puta stavlja u magnetsko polje. Neki dijelovi na krivulji prvog magnetiziranja, (slika 2.1.1), su: početni, strmi, koljeno i zasićenje.



Slika 2.1.1 Krivulje prvog magnetiziranja [5]

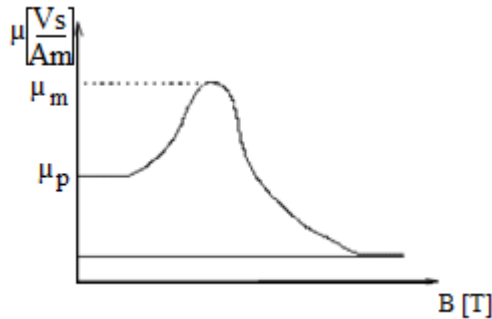
2.3 Permeabilitet

Permeabilitet (μ) je magnetska vodljivost, a definira se kao odnos magnetske indukcije i magnetskog polja

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \mu = \mu_r \mu_0 \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left(\frac{Vs}{Am} \right) \quad (2-1)$$

Gdje je:

B – magnetska indukcija (T) , H – magnetsko polje (A/m), μ_r - relativni permeabilitet $\left(\frac{Vs}{Am}\right)$

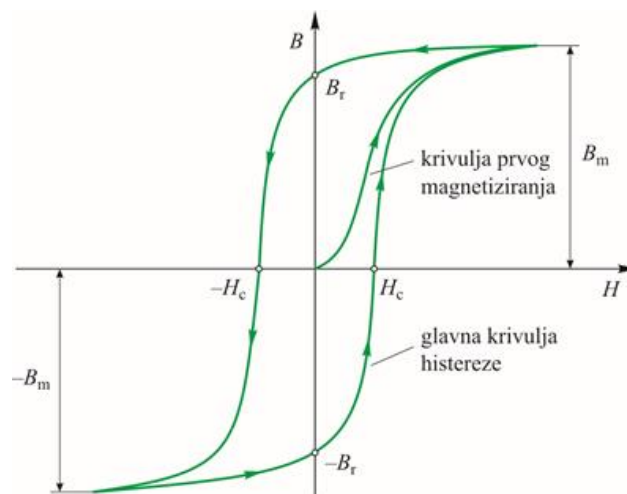


Slika 2.3.1. Ovisnost permeabiliteta o magnetskoj indukciji ,[5]

Veličina relativni permeabilitet (μ_r) ukazuje koliko neki materijal bolje vodi magnetski tok od vakuuma (zraka). Permeabilitet je promjeniva veličina jer je krivulja magnetiziranja nelinearna, slika 2.3.1, a važne su dvije veličine i to: početni permeabilitet (μ_p) koji se određuje početnim nagibom krivulje magnetiziranja (mjeri se kod vrlo malog polja reda veličine 10^{-5} A/m) i maksimalni permeabilitet (μ_m) koji se određuje maksimalnim nagibom krivulje magnetiziranja. [5]

2.4 Petlja histereze

Petlju histereze bi dobili kada bi izvršili cijeli krug magnetiziranja, a to je: materijal namagnetizirati do zasićenja, razmagnetizirati ga, namagnetizirati ga u suprotnom smjeru do zasićenja te ga ponovo razmagnetizirati, slika 2.4.1.



Slika 2.4.1. Petlja histereze [5]

Karakteristične točke krivulje su: indukcija zasićenja $B_m(B_z)$, maksimalna indukcija do koje se može materijal namagnetizirati. B_r remanencija, gustoća magnetskog toka koja ostane u materijalu koji se nakon magnetiziranja do zasićenja, izvadi iz polja. H_c koercitivna sila, jakost polja suprotnog smjera potrebna da se materijal magnetiziran do zasićenja, razmagnetizira. Površina obuhvaćena histerezom predstavlja gubitke magnetiziranja, a to je akumulirana energija magnetiziranja, koja je zadržana u materijalu. Imamo statičku i dinamičku petlju histereze. Razlika je u tome što dinamička petlja histereze zbog magnetske tromosti materijala obuhvaća i dodatne. Širu petlju histereze dobivamo višim frekvencijama. Indukcija zasićenja (B_m) može biti od nekoliko dijelova Tesla pa do preko 2 Tesla, isto tako i remanencija (B_r). Koercitivna sila (H_c) se kreće od nekoliko desetinki A/m pa do stotinjak kA/m. Pomoću koercitivne sile određujemo jesu li magnetski materijali u primjeni dijele na meke ili tvrde magnetske materijale. Meki imaju male koercitivne sile, a tvrdi imaju velike koercitivne sile. [5]

2.5 Gubici kod magnetiziranja

Gubici magnetiziranja dijele se u dva dijela, gubitke histereze i gubitke vrtložnih struja. Gubici histereze ovise o magnetskim svojstvima materijala (širina petlje histereze, permeabilitet, magnetsko kašnjenje), a gubici vrtložnih struja ovise o električkim svojstvima materijala (specifični električni otpor). [5]

Gubici histereze:

$$P_h = \eta \cdot V \cdot f \cdot B_m^2 \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (2-2)$$

Gubici vrtložnih struja:

$$P_v = \sigma \cdot V \cdot f^2 \cdot B_m^2 \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (2-3)$$

Gdje je:

η - konstanta materijala

σ -konstanta materijala

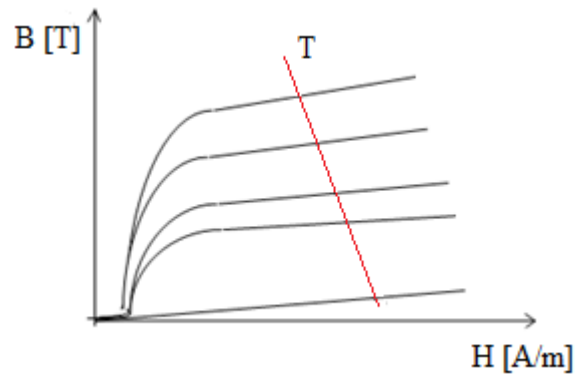
V - obujam materijala (m^3)

f - frekvencija (Hz)

B_m - maksimalna indukcija (T)

2.6 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja

Magnetska svojstva materijala slabe porastom temperature tj indukcija zasićenja pada, krivulja se linearizira, da bi pri određenoj temperaturi prerasla u pravac, te se materijal počeo ponašati kao paramagnetski materijali, slika 2.6.1.



Slika 2.6.1 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja[5]

Taj proces je reverzibilan, ako materijal nije prethodno termički obrađen, kako bi se dobila neka specijalna struktura u svrhu poboljšanja magnetskih svojstava, te nakon hlađenja materijal poprima svoja prethodna svojstva. Ako je materijal bio prethodno termički obrađen, trajno gubi svojstva postignuta tom obradom. Curieva točka ili Curieva temperatura je temperatura kod koje se feromagnetski materijal počeo ponašati kao paramagnetski, a za pojedine feromagnetske elemente iznosi kako je pokazano u tablici 2.1. [5]

Element	Gadolij (Gd)	Nikal (Ni)	Željezo (Fe)	Kobalt (Co)
Temperatura (°C)	16	356	769	1125

Tablica 2.1

2.7 Faktor izbočenosti

Kod trajnih magneta (tvrđi magnetski materijali) koristi se drugi kvadrant petlje histereze. On ustvari predstavlja akumuliranu energiju u magnetskom materijalu. S tim u vezi važan je faktor izbočenosti, slika 2.7.1, a definiran kao:

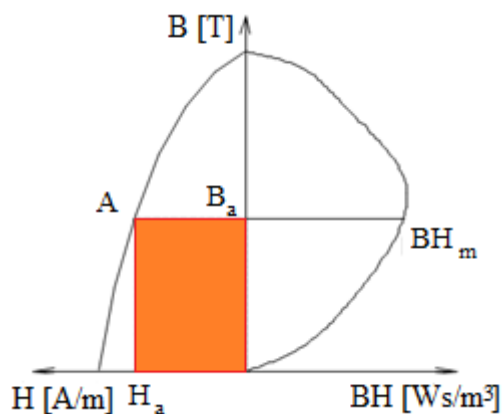
$$f_i = \frac{(B \cdot H)_m}{B_r \cdot H_c} \quad (2-4)$$

gdje je:

$(BH)_m$ - maksimalni energetska produkt

B_r - remanentna magnetska indukcija (T)

H_c - koercitivna sila (A/m)



Slika 2.7.1 Faktor izbočenosti[5]

2.8 Podjela

Magnetske materijale dijelimo na meke i tvrde magnetske materijale. Nema precizne granice između mekih i tvrdih magnetskih materijala, ali u meke magnetske materijale ubrajamo materijale kod kojih već malo vanjsko magnetiziranje stvara veliki magnetski tok, a kad vanjsko polje nestane tok se gubi. Kod mekih magnetskih materijala idealno bi bilo da nema petlje histereze. U tvrde magnetske materijale ubrajamo one kod kojih nakon magnetiziranja i uklanjanja vanjskog polja ostane značajan magnetski tok tj tok postoji kad nema vanjskog polja i u tvrdim magnetskim materijalima ostaje akumulirana energija. Idealno bi bilo da je petlja histereze što šira. Razlika je između tvrdih i mekih magnetskih materijala je u: strmini krivulje magnetiziranja, širini petlje histereze. [5]

2.9 Izvedbe jezgri

Magnetske jezgre s obzirom na primjenu i s obzirom na frekventno područje izvode se kao: masivne, limelirane i praškaste.

Masivne se izrađuju od metala ili metalnih smjesa. Izrađuju se lijevanjem, kovanjem, sinteriranjem. Primjena je kod mekomagnetskih jezgri za istosmjerno magnetiziranje te kod trdomagnetske jezgre. Lamelirane su limovi i trake debljine 0,02 do 1 mm, mogu biti paketirane ili motane. Primjena je kod mekomagnetskih jezgri za izmjenične frekvencije. Praškaste su masivne jezgre izrađene iz smjese metalnog praha i veziva koje je nemagnetski materijal. Primjena je kod mekomagnetske jezgre za visokofrekventnu tehniku i kod permanentnih magnetskih materijala. [5]

2.10 Grupa ferosilicijjskih lagura

Grupa ferosilicijjskih lagura je grupa mekomagnetskih materijala. Povećanjem specifičnog otpora i smanjenjem dimenzija rješava se gubitak vrtložnih struja. Utjecaj silicija (Si) na željezo je povećanje specifičnog otpora ρ , povećanje permeabiliteta μ , smanjuje koercitivnu silu H_c , smanjuje gubitke magnetiziranja, smanjuje indukciju zasićenja B_m , povećava krhkost, smanjuje obradivost. Postoje toplovaljani (do 4.5% Si) i hladnovaljani (do 3.5% Si) limovi. Hladnovaljani limovi mogu biti neorijentirani (izotropni) i orijentirani (antizotropni). Toplovaljani su valjani na povišenoj temperaturi pa je dozvoljen veći postotak silicija

(izotropni). Izotropni lim ima ista magnetska svojstva bez obzira na smjer valjanja, a anizotropni lim ima različita svojstva u odnosu na smjer valjanja.

2.11 Grupa feronikalnih lagura

Feronikalne legure spadaju među najpoznatije mekomagnetske legure. Kako se željezo i nikal mogu miješati u svim omjerima, tako na raspolaganju imamo veliki izbor tih legura vrlo različitih svojstava. Ipak sve one spadaju među magnetski najmekše materijale. Naime nikal se i dodaje željezu prvenstveno zbog magnetskog omekšanja. Te legure osim toga imaju odlična tehnološka svojstva, te se iz njih daju valjati vrlo tanki limovi debljine do 0.02 mm. Kako se mogu dobiti tako male debljine, te legure imaju šire frekventno područje upotrebe, pa se mogu upotrijebiti sve do 100 kHz. Pri višim frekvencijama i u njima su preveliki gubici pa se za više frekvencije upotrebljavaju druga rješenja (praškaste jezgre). [5]

2.12 Praškaste mekomagnetske jezgre

Praškaste mekomagnetske jezgre se upotrebljavaju na najvišim frekvencijama, iznad 100 kHz. Razlikujemo metalne i feritne (magnetsko keramičke) praškaste jezgre. Feritne (magnetsko keramičke) jezgre sastavljene su od raznih oksida (feritnih materijala). Radi se o nemetalima s velikim specifičnim otpore reda 10^{12} veće od metala. Višestruki ili složeni sastoje se od raznih oksida koji se samelju, smiješaju i sinteriziraju, pa se ponovo samelju da se mogu oblikovati i termički obrađivati. Svojstva ovise o materijalima i o tehnološkom procesu proizvodnje (pritisci, temperature). Prednost pred metalnim praškastim jezgrama im je u: većem permeabilitetu, većem otporu i boljoj kompaktnosti. Pri višim frekvencijama veći je problem vrtložnih struja i pa izbor materijala ovisi o njegovom otporu, i tom svojstvu podređujemo sva ostala svojstva. Metalne praškaste jezgre se sastoje od mješavine metalnog feromagnetskog praha i veziva kao nemagnetskog materijala. Feromagnetski materijal se samelje u sitan prah u kuglice dimenzije nekoliko mikrona. Termostabilna smola koja je izolacijski materijal koristi se kao vezivo. Vezivo se miješa s metalnim prahom u potrebne oblike i peče se da smola polimerizira. Na taj način se vrtložne struje zatvaraju kroz vrlo male površine, ali se istovremeno smanji permeabilitet i indukcija zasićenja. Efektivni permeabilitet se istovremeno linearizira, koji ovisi jednom o izabranom materijalu te drugi puta o sastavu smjese, to jest odnosu količine veziva i metala. Pojednostavljena formula za efektivni permeabilitet dana je kao [5]:

$$\mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{\alpha}{3}} \left[\frac{V_s}{Am} \right] \quad (2-5)$$

α = postotak veziva

μ = permeabilitet feromagnetskog materijala

2.13 Materijali za tvrde magnete

Akomulirana energija koja je preostala nakon magnetiziranja koristi se za rad, zato je bolje da je kod tvrdih magnetskih materijala petlja histereze što šira. Čim je petlja histereze šira znači da im je koercitivna sila veća. [5]

2.15 Ugljici i legirani čelici

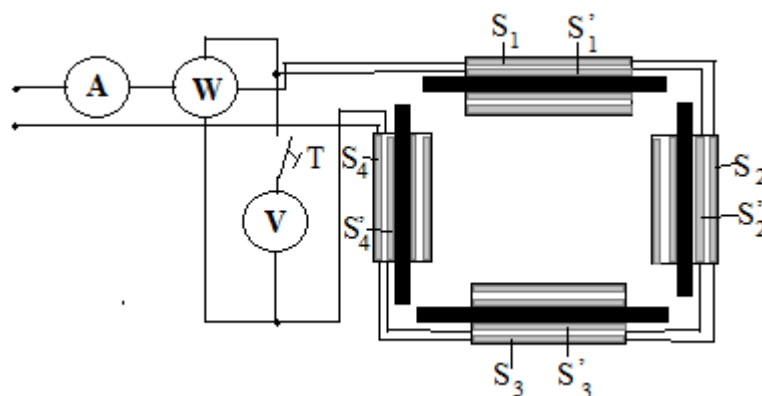
Jeftiniji i najstariji permanentni magneti, ali su nestabilni i osjetljivi na vanjske utjecaje jer imaju male koercitivne sile. Upotrebljavaju se kao zakaljeni materijali, jer se prije kaljenja se dobro obrađuju. Zbog male koercitivne sile H_c moraju biti dugački, a zbog malog energetskog produkta su za određenu akumuliranu energiju veliki. Trajno gube svojstva na povišenim temperaturama. [5]

3. Ispitivanje svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom

Ispitivanje svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom radi se pomoću metoda:

- Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu
- Snimanje dinamičke petlje histereze vektormetrom
- Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom

3.1 Vatmetrička metoda mjerenja gubitaka u željezu



Slika 3.1.1 Epsteinov aparat [7]

Gubici u željeznim limovima određuju se pomoću vatmetričke metode (Epsteinov aparat). Ispitivani limovi se izrežu u trake i slože u četiri jednaka svežnja, polovica trake izreže paralelno sa smjerom valjanja lima, a polovica okomito na taj smjer. Trake orijentiranih limova režu se sve u istom smjeru. Da ne nastanu gubici limovi se međusobno izoliraju. U četiri duguljasta svitka (S_1 do S_4 na sl. 3.1.1) ulažu se svežnjevi. Sekundarni namotaj služi za priključak naponske grane vatmetra i voltmetra i sastoji se od četiri svitka S'_1 do S'_4 , izrađenih od tanje žice i imaju ukupno isti broj zavoja kao i svici S_1 do S_4 i tijesno su omotani oko ispitivanih svežnjava. Primarna stuja momentane vrijednosti i_1 teče kroz strujnu granu vatmetra, dok je na naponsku granu vatmetra primjenjen sekundarni napon momentane vrijednosti u_2 , pa će vatmetar pokazati:

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 i_1 dt [W] \quad (3-1)$$

Induciranu napon u sekundarnom namotu je veći od napona u_2 za pad napona u otporu R_2 sekundarnog namota, pa slijedi :

$$u_2 = e_2 - R_2 i_2 [V] \quad (3-2)$$

Struju i_2 možemo odrediti iz poznatog sekundarnog napona u_2 i otpora R_w naponske grane vatmetra :

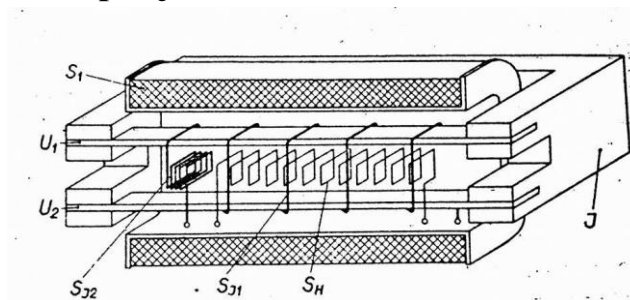
$$u_2 = e_2 - R_2 \frac{u_2}{R_w} = \frac{R_w}{R_w + R_2} e_2 \quad (3-3)$$

Gubici u željezu su:

$$P_z = P_w - \frac{U_2^2}{R_w} [W] \quad (3-4)$$

[2]

3.2 Snimanje dinamičke petlje histereze vektrometrom

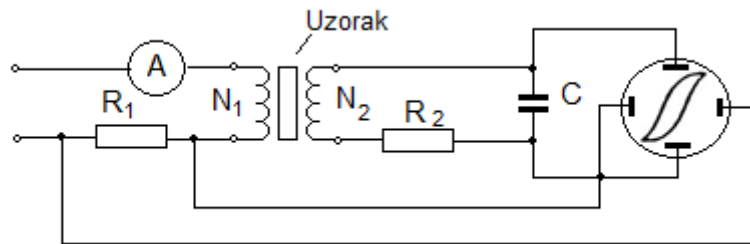


Slika 3.2.1 Jaram i namoti uređaja za snimanje dinamičke petlje histereze [2]

U procjepe na jarmu J od magnetskog materijala ulažu se ispitivani limovi podjeljena na dva jednaka snopa, U_1 i U_2 , slika 3.2.1, te pritegnu vijcima. Za izmjenično magnetiziranje uzorka služi svitak S_1 priključen na izvor izmjeničnog napona. U sredini između dva snopa ispitivanog lima smješten je svitak S_H , gdje je jakost magnetskog polja praktički jednaka kao i u limovima. Momentane vrijednosti jakosti magnetskog polja u uzorku mjeri vektrometar koji je priključen na svitak S_H . Pomoću dva svitka, mjeri se magnetska indukcija B, odnosno magnetska polarizacija J uzorka, oko oba snopa omotan je prvi svitak S_{J1} , njemu je u seriji dodan suprotno motani svitak S_{J2} , koji se nalazi između oba snopa uzorka, slično kao i svitak S_H . Broj zavoja jednog i drugog svitka odabran je tako da se naponi koji se u njima induciraju tok kroz zrak međusobno poništavaju. Kada uzorak nije uloženi naponi njihove serijske kombinacije biti jednak nuli. Kada se uzorak uloži, mjerit će priključeni vektometar momentane vrijednosti

magnetske polarizacije $J = B - \mu_0 H$ u uzorku. Momentane vrijednosti jakosti magnetskog polja tj magnetske polarizacije u ispitivanom uzorku mjeri vektormetar priključen na svitke S_H i S_J . Mjenjajući fazni pomak zatvaranja kontakata mehaničkog ispravljača vektormetrom, a držeći pri tom stalan izmjenični napon na uzbudnom svitku S_1 , dobivat ćemo razne točke na dinamičkoj petlji histereze, koju nakon dovoljno snimanja točaka možemo grafički prikazati.

3.3 Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom



Slika 3.3.1 Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom [2]

Dinamička petlja histereze snima se osciloskopom, (slika 3.3.1), tako da oko uzorka preko otpora R_1 omota se primarni namot, koji ima N_1 zavoja. Primarni namot priključen je na izvor izmjeničnog napona. Otpor R_1 i kapacitet C serijski su spojeni na sekundarni namot od N_2 zavoja. Na pločice za horizontalni otklon dovodi se pad napona U_{R1} na otpor R_1 . Otklon elektronskog snopa osciloscopa u smjeru osi x bit će proporcionalan struji magnetiziranja i_1 , jer je $U_{R1} = i_1 R_1$. U prstenastom ili štapnom uzorku, zatvorenom jarmom neznatog magnetskog otpora, jakost magnetskog polja je razmjerna struji magnetiziranja i_1 , jer je tada $H = N_1 i_1 / l$, gdje je l duljina uzorka. Stoga je horizontalni otklon snopa razmjernan jakosti H magnetskog polja u uzorku:

$$U_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H [V] \quad (3-5)$$

Na pločice za vertikalni otklon dovodi se pad napona na kapacitetu C . Pri tom se odabire $R_2 \gg \frac{1}{C\omega}$, pa u sekundarnom krugu teče struja: $i_2 \approx e_2 / R_2$. Kod uzorka čiji je efektivni presjek S , inducira se u sekundarnom namotu napon:

$$e_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} [V] \quad (3-6)$$

Pa u sekundarnom krugu teče struja:

$$i_2 = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} [A] \quad (3-7)$$

Na kapacitetu C valda napon $u_C = \frac{1}{C} \int i_2 dt$, pa uvrštavajući u izraz (3-7) dobivamo da je pad napona na kapacitetu, a time i otklon snopa u smjeru y , razmjernan indukciji B u uzorku [2]:

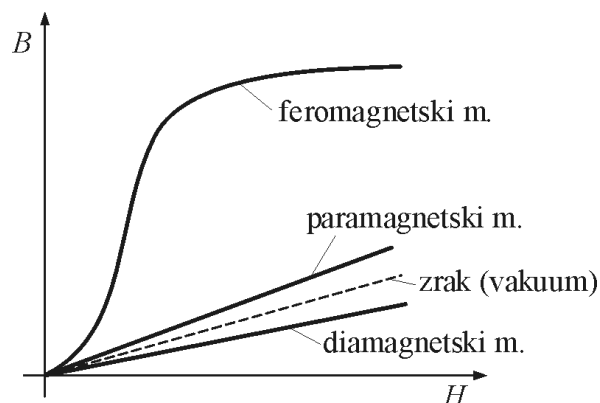
$$u_C = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B = k_B B [V] \quad (3-8)$$

4. Ispitivanje svojstava magnetskih materijala istosmjernom strujom

Magnetski materijali prema ponašanju u vanjskom magnetskom polju mogu se podijeliti u tri skupine:

- 1.) Feromagnetski materijali ili feromagnetici – materijali koji pobuđeni vanjskim poljem povećavaju gustoću toka i do nekoliko tisuću puta u odnosu na gustoću toka u zraku. U tu skupinu pripadaju materijali poput željeza, nikla i njihove lagure
- 2.) Paramagnetski materijali – materijali koji ne pokazuju značajke zgušnjavanje magnetskog toka kad su izloženi vanjskom magnetskom polju. U ovu skupinu ubrajamo alkalijske metale a to su aluminij, platinu i neke plinove.
- 3.) Diamagnetski materijali – materijali u kojima se djelovanjem vanjskog magnetskog polja smanjuje gustoća toka u odnosu na zrak. U ovu skupinu pripadaju bakar, cink, srebro, zlato, živa, mnogi organski materijali, voda, plemeniti plinovi itd.

Zbog velike razlike u svojstvima magnetskih materijala, zbog različitih oblika i veličina materijala, te zbog brzine i preciznosti mjerenja, postoje različite metode za snimanje krivulje magnetiziranja, histereze, krivulje permeabiliteta i demagnetiziranja. [2]



Slika 4.0.1 Krivulja magnetiziranja materijala [2]

Postupak snimanje krivulje (prvog) magnetiziranja je krivulja po kojoj raste magnetska indukcija potpuno razmagnetiziranog željeza pri postepenom rastu jakosti magnetskog polja od nule prema gore. Postoje izmjenične i istosmjerne metode za mjerenje svojstava magnetskih

materijala. Od metoda s istosmjernom strujom poznatije su: balistička metoda s prstenastim uzorkom, Fahy-Simplexov permeametar, Ilivicijev jaram, metoda istma, Stäblein-Steinitzov uređaj. [2]

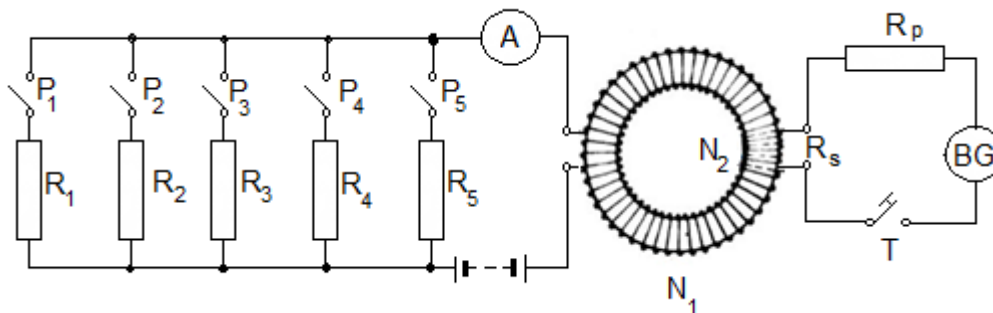
4.1 Balistička metoda s prstenastim uzorkom

Mjerenje balističkom metodom provodi se prema shemi slika 4.1.1. Oko prstenastog uzorka namotano je N_1 zavoja i priključen je istosmjerni izvor napona preko kombinacije otpora R_1, R_2, R_3, \dots i preklopki P_1, P_2, P_3, \dots . Uz otvorene preklopke, ne teče struja kroz uzbudni namot. Uklapanjem preklopke P_1, P_2, P_3, \dots smanjujemo otpor kruga, zbog paralelnog spojenih otpora R_1, R_2, R_3, \dots i tada će teći sve veća stuja I_1, I_2, I_3, \dots . Jakost magnetskog polja H_1, H_2, H_3, \dots određuje se pomoću formule :

$$H = \frac{N_1 I}{l_{sr}} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (4-1)$$

l_{sr} = srednja duljina jezgre (m)

N_1 = broj zavoja primara

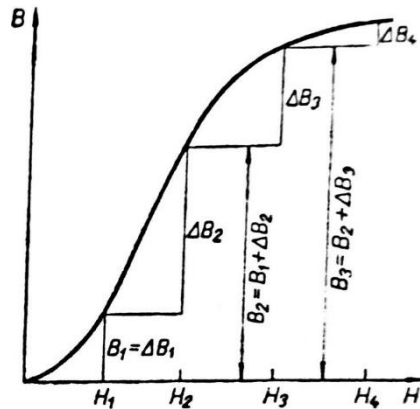


Slika 4.1.1 Shema spoja za snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom [2]

Povećanje indukcije u uzorku za iznose $\Delta B_1, \Delta B_2, \Delta B_3, \dots$ koje se pojavljuje zbog povećanje jakosti magnetskog polja. Povećanje indukcije izazvat će balističke otklone galvanometra priljučen na poseban namot od N_2 zavoja, omotanih također oko uzorka. Ako su S presjek uzorka, K_B balistička konstanta galvanometra za mjerenje naponskih udara, a α_1 balistički otklon galvanometra, bit će :

$$\Delta B_1 = \frac{K_B}{N_2 S} \alpha_1 \quad (4-2)$$

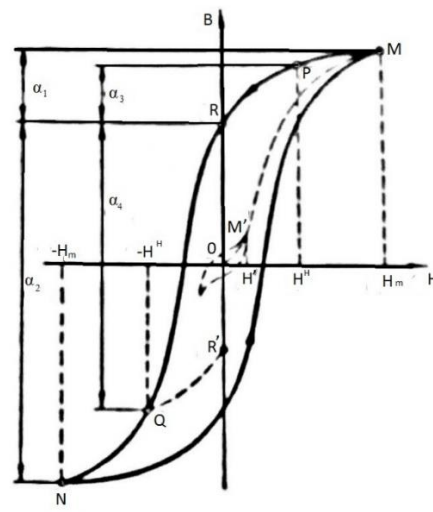
Poznavajući $\Delta B_1, \Delta B_2, \Delta B_3, \dots$ i pripadne H_1, H_2, H_3, \dots možemo odrediti krivulju magnetiziranja kako je prikazano na slici 4.1.2.



Slika 4.1.2 Krivulja prvog magnetiziranja na osnovi

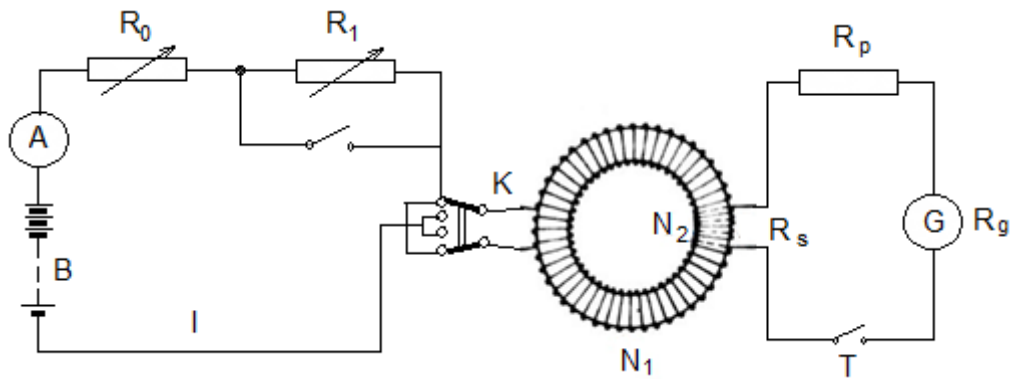
podataka dobiveni mjerenjem prema shemi na sl. 4.1.1 [2]

Pogreške su sve veće pri određivanju točaka krivulje bliže zasićenju, jer se te točke dobivaju zbrajajući sve više očitavanja. Često se snima komutaciona krivulja, koja se praktički poklapa s krivuljom (prvog) magnetiziranja.



Slika 4.1.3 Komutaciona krivulja i petlja histereze [2]

Postupak pri snimanju statičke komutacione krivulje. Statička komutaciona krivulja je krivulja koja uz različite iznose maksimalnih jakosti magnetskog polja spaja vrhove pojedinih petlji histereze, slika 4.1.3 (crtkano izvučena krivulja). Ona se poklapa s krivuljom prvog magnetiziranja. Snimanje komutacione krivulje može se provesti pomoću spoja prikazanog na slici 4.1.4.



Slika 4.1.4 Shema spoja za snimanje komutacione krivulje i

petlje histereze balističkom metodom [3]

Na izvor istosmjernog napona preko komutatora K , otpora R_0 i R_1 te ampermetra A , priključen je uzбудni namot s N_1 zavoja. Balistički galvanometar je preko tipke T i otpora R_p priključen na poseban namot s N_2 zavoja, otpora R_s , koji je tijesno omotan oko uzorka. Uzorak se najprije razmagnetizira, a zatim otporima R_0 i R_1 naravno uzbudna stuja I na neku malu početnu vrijednost I' , zatvori tipka T , komutira uzbudna stuja i očita balistički otpor galvanometra. Tako se dobivaju podaci potrebni za izračunavanje najniže točke M' na komutacionoj krivulji:

$$B' = \frac{K_B}{2N_2S} \alpha_M [T] \qquad H' = \frac{IN_1}{l_{sr}} \left[\frac{A}{m} \right] \qquad (4-3)$$

Gdje je :

K_B - konstanta galvanometra

S – presjek jezgre (m^2)

α_M - otklon galvanometra (V)

l_{sr} - srednja duljina jezgre (m)

Treba paziti da se u toku ugađanja uzbudne struje ne vrati od neke veće vrijednosti na manju. Da bi smo izbjegli otklon galvanometra na suprotnu stranu treba se uz otvorenu tipku T komutirati uzbudna stuja, a zatim naravno uzbudnu stuju na slijedeću veću vrijednost. Uz zatvorenu tipku T ponovo se komutira struja i dobiva se balistički otklon iz kojeg se određuje slijedeća točka na komutacionoj krivulji. Postupak nastavljamo dok ne snimimo dovoljno točaka. Ako struja pri ugađanju vrati na neku veću vrijednost od predviđene, treba mjerenje izvršiti pri toj većoj struji ili ponoviti cijeli postupak razmagnetiziranja.

Postupak snimanja petlje histereze provodi se pomoću spoja prikazanog na slici 4.1.4. Uzбудni namot je namotan oko razmagnetiziranog uzorka, naravno uzbudnu struju kroz uzbudni namot na vrijednost koja odgovara krajnoj točki M petlje histereze. Uklopimo tipku T , zatim prekinemo uzbudnu struju komutatorom K i očitamo balistički otklon α_1 . Taj otklon će biti razmjernan razlici indukcije točaka M i R (slika 4.1.3). Nakon toga ukopčamo ponovo, ali u

suprotnom smjeru uzбудnu struju komutatorom K i očitamo otklon α_2 koji je ramjeran razlici indukcije točaka R i N. Maksimalnu indukciju B_m u točki M i remanentnu indukciju B_r u točki R odredimo iz otklona α_1 i α_2 :

$$B_m = \frac{K_B}{2SN_S}(\alpha_1 + \alpha_2) = K'_B(\alpha_1 + \alpha_2)[T] \quad (4-4)$$

$$B_r = K'_B(\alpha_1 + \alpha_2) - 2K'_B\alpha_1 = K'_B(\alpha_2 - \alpha_1)[T] \quad (4-5)$$

Točke P i Q odredimo tako da najprije uz otvorenu tipku T smanjimo uzbudnu struju na vrijednost koja odgovara jakosti polja H . Nakon toga uklopimo tipku T, prekidamo uzbudnu struju komutatorom K , očitavamo otklon balističkog galvanometra α_3 , komutatorom ponovo uklopimo, ali u suprotnom smjeru uzbudnu struju i očitavamo otklon α_4 . Tada je indukcija u točki P, odnosno Q :

$$B_P = B_r + 2K'_B\alpha_3[T] \quad (4-6)$$

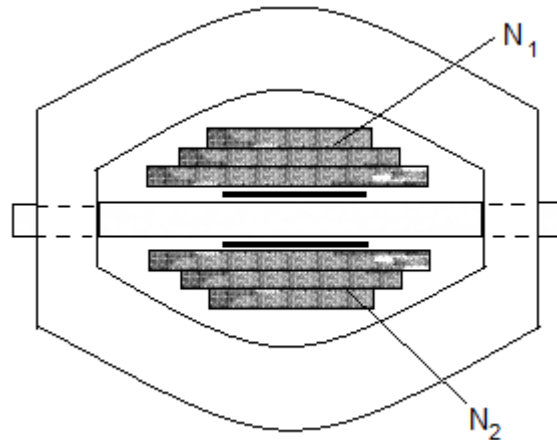
$$B_Q = B_r - 2K'_B\alpha_4[T] \quad (4-7)$$

Nakon određivanja točke Q ne smijemo odmah prekinuti uzbudnu struju koja odgovara toj točki, jer bismo tada postigli indukciju OR' koja više ne leži na krivulji snimanja histereze. Stoga moramo najprije povećati uzbudnu struju na vrijednost koja odgovara točki N i onda je komutirati. Time je ponovo postignuta indukcija i polje koje odgovara točki M, pa možemo nastaviti snimanje ostalih točaka. Važno je da snimanje provodimo obilazeći petlju histereze uvijek u istom smjeru

Zbog opisanog postupka za ugađanje uzbudne struje zgodno je predvidjeti dva otpornika R_0 i R_1 , spojena u seriji, od kojih jednoga možemo kratko spojiti preklopkom (otpor R_1 na slici 4.1.4). Tada maksimalnu struju, koja odgovara točki M na petlji histereze, naravnamo otporom R_0 , uz kratko spojeni otpor R_1 . Točku P postizemo otvaranjem preklopke i ugađanjem otpora R_1 na odgovarajuću vrijednost, a točku Q dobijemo komutiranjem te struje. Točku N dobijemo kratki spojem otpora R_1 , a nakon komitiranja točku M.

Prednost prstenastih uzoraka je jer pripadne jakosti magnetskog polja određujemo iz izmjerene uzbudne struje ($H = IN_1/l_{sr}$), ali prstenasti uzorci zahtijevaju dugotrajne pripreme, pa gdje se traži manja točnost odabiru se svežnjave uske trake ispitivanih limova (štapasti oblici uzoraka). Tako se često odabiru trakasti uzorci istih dimenzija za snimanje komutacione krivulje i petlje histereze dinamo-limova kao i pri mjerenju gubitaka u Epsteinovu aparatu. Uzorak se ulaže u uzbudne svitke tog aparata. Pri korištenju Epsteinova aparata za ovu svrhu potrebno je limove slagati preklopno, jer se tako izbjegava zračni raspon i pomoću limova bi se stvorio dobro zatvoren magnetski krug. Balistički galvanometar se priključuje na posebno predviđen namot koji je tijesno omotan oko ispitivanih svežnjavih traka.

Kod uzorka štapnog oblika magnetski otpor se zanemaruje jer koristimo se jarmom velikog presjeka od magnetskog materijala (Hopkinsonov jaram, slika 4.1.5).



Slika 4.1.5. Hopkinsonov jaram [2]

Jakost magnetsko polja u uzorku duljine l_u može se odrediti: ($H = IN_1/l_u$). Uzbudnu struju I propuštamo kroz veći svitak od N_1 zavoja koju mjerimo ampermetrom, a balistički galvanometar priključimo na manji svitak od N_2 zavoja, koji je tijesno priljubljen uz uzorak. Pri mjerenju jakosti polja uzoraka visokog permeabiliteta bit će veća od stvarne vrijednosti H_u u uzorku, ipak nije moguće zanemariti magnetske otpore jarma:

$$H_u = \frac{IN_1}{l_u} - \frac{B}{l_u} \left(\frac{l_j}{\mu_j} \frac{S}{S_j} + \frac{l_z}{\mu_0} \frac{S}{S_z} \right) = H - H' \left[\frac{A}{m} \right] \quad (4-8)$$

H_u jakost magnetskog polja u uzorku (A/m)

S presjek uzorka (m^2)

S_j ukupan presjek jednog i drugog jarma (m^2)

l_u duljina uzorka (m)

l_j srednja duljina jarma(m)

H' korektura (A/m)

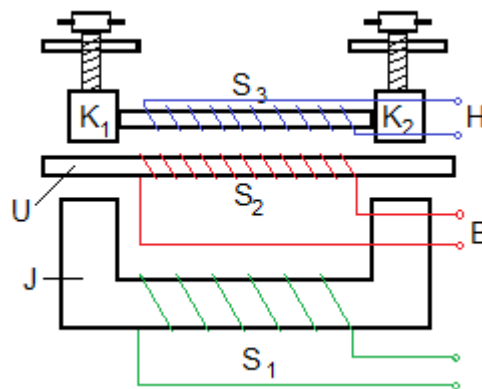
μ_j permeabilitet materijala jarma (Vs/Am)

S_z presjek zračne pukotine između uzoraka i jarma(m^2)

l_z duljina zračne pukotine (m)

B magnetska indukcija u uzorku (T)

4.2 Fahy-Simplexov permeametar

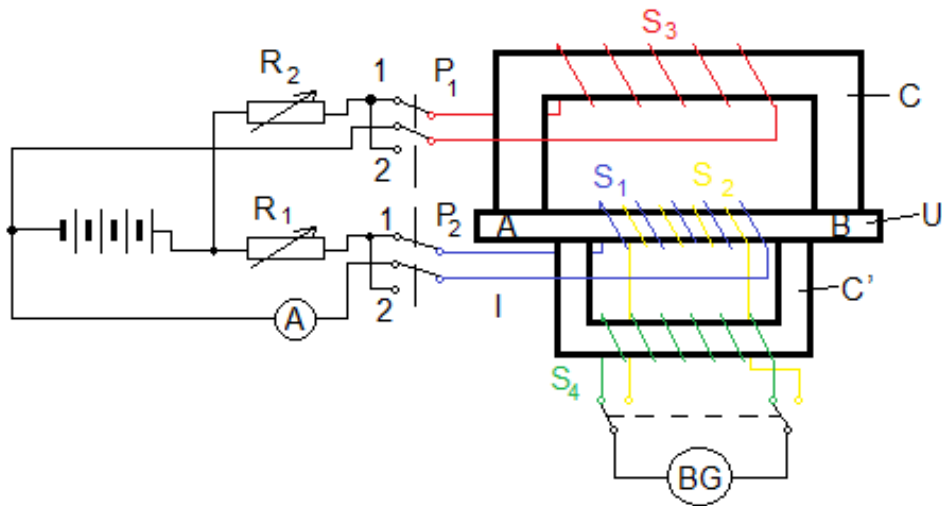


Slika 4.2.1 Fahy-Simplexov permeametar [2]

Fahy-Simplexov permeametarom mjerenjem magnetskog pada napona određuje se jakost magnetskog polja. U jaram J ulaže se štapni uzorak U koji se magnetizira svitkom S_1 . Svitak S_2 služi za mjerenje magnetske indukcije B u uzorku i tijesno je namotak oko uzorka. Pomoću dva željezna uloška K_1 i K_2 uzorak je pritisnut na jaram, između kojih se nalazi štap od nemagnetskog materijala, omotan svitkom S_3 . Svitak S_3 služi za mjerenje jakosti magnetskog polja H u uzorku. Struja uzbude u svitku S_1 se prekida ili komutira prilikom mjerenja istosmjernom strujom i pomoću balističkog galvanometra priljučuje na svitak S_2 . Jakost magnetsko polja H određuje se iz otklona balističkog galvanometra priključenog na svitak S_3 . [2]

4.3 Iliovicijev jaram

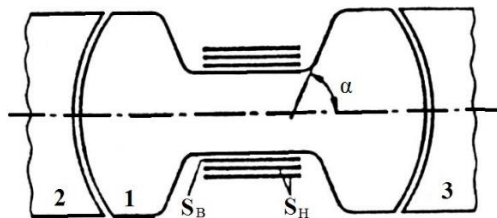
Mjerenjem magnetskog pada napona određuje se jakost magnetskog polja u uzorku. Uzduž čitavog uzorka omotan je svitak S_1 i služi za magnetiziranje kruga (slika 4.3.1). Svitak S_2 predviđen je za mjerenje magnetske indukcije B u uzorku i taj svitak je također omotan uzduž čitave duljine uzorka. Zbog točnijeg određivanja indukcije B , svitak S_2 je namotan oko uzorka U , a svitak S_1 iznad njega. Preko jarma C , na kojem je pomoćni svitak S_3 , zatvara se magnetski tok. Između točaka A i B , strujom kroz svitak S_3 kompenzira se magnetski pad napona, tako da se svi aperzavoji svitka S_1 troše samo za magnetiziranje uzorka. Pomoću jarma C' utvrđuje se da li je kompenzacija postignuta. Jaram C' je od magnetskog materijala i oko njega je omotan svitak S_4 . Prebacivanje preklopke P_1 iz položaja 1 u 2 istodobno se komutira struja u svicima S_1 i S_3 , pa pri punoj kompenzaciji neće dati otklon balistički galvanometar priključen na svitak S_4 .



Slika 4.3.1 Iliovicijev jaram [8]

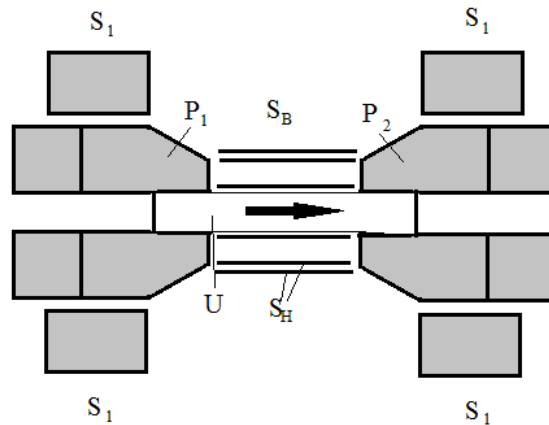
4.4 Ewingova metoda istma

Ewingovom metodom istma zbog posebnog oblika uzorka postiže se jaka polja, puno veća indukcija postiže se na dijelu koji je jako sužen od one u širem dijelu uzorka i jarmu (slika 4.4.1). Zato se na suženi dio troši većina amperzavoja uzbude, pa se pomoću uzbudnog namota velikog presjeka mogu na tom mjestu postići indukcije koje iznose i do 4,5 T i polja do $2 \cdot 10^6 \text{ A/m}$.



Slika 4.4.1 Ewingova metoda istma [2]

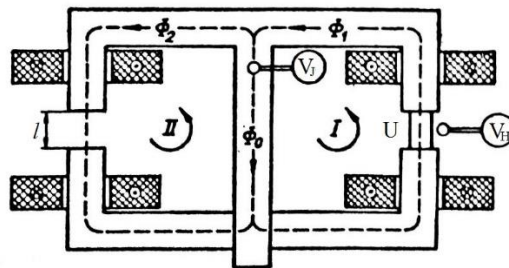
Ewingova metoda istma nije prikladna za određivanje petlje histereze, a i izrada uzorka je komplicirana, zato se u praksi koriste različita modificirana rješenja gdje se otklon galvanometra dobiva komutiranjem ili prekidanjem uzbudne struje i oblik uzoraka su jednostavniji. Kod metode istma s polnim nastavcima (slika 4.4.2) je između polova P_1 i P_2 umetnut kratki ispitivani uzorak valjkastog oblika. U uzorku zbog velikog presjeka dobiva se velika indukcija. Svitak S_1 služi za magnetiziranje uzorka, a svitak S_B i S_H služe za mjerenje indukcije B i polja H , svici su smješteni u srednjoj trećini prostora između polova, tako se izbjegla netočnost zbog nejednolikog magnetiziranja uzorka na krajevima.



Slika 4.4.2 Metoda istma s polnim nastavcima [2]

4.5 Stäblein-Steinitzov uređaj

Stäblein-Steinitzov uređaj je predviđen za snimanje krivulje demagnetiziranja permanentnih magneta koristeći rotirajuće ili titrajuće svitke. Jaram je dvodjelan i lameliran (slika 4.5.1).



Slika 4.5.1 Stäblein-Steinitzov uređaj [7]

U podesivi raspon desnog stupa jarma ulaže se uzorak U , a lijevi raspon ostaje prazan. Uzbudni svici omotani su oko desnog i lijevog stupa, kroz koje protječe ista struja magnetiziranja, ali u suprotnom smjeru, zato kroz srednji stup teče samo razlika magnetskih tokova desnog i lijevog stupa. Ta razlika je jednaka nuli kada uzorak nije uloženi, pa u srednjem stupu nema toka. Kada je uložak uloženi, u srednjem stupu pojaviti će se tok koji je razmjerni magnetskoj polarizaciji uzorka:

$$J = B - \mu_0 H \quad (4-9)$$

Izmjenični napon razmjerni toku u srednjem stupu tj magnetskoj polarizaciji J inducira se u rotirajućem svitku smještenog u rasponu srednjeg stupa. Pomoću rotirajućeg ili titrajućeg svitka koji se nalazi uz površinu uzorka mjeri se jakost polja H . Magnetski padovi napona za desnu i lijevu stranu jarma:

$$1.) \quad IN = Hl + (JS + \mu_0 HS_z)R_m + \Phi_0 R_{m0} \quad (4-10)$$

$$2.) \quad IN = \Phi_2 \left(R_m \frac{l}{\mu_0 S_z} \right) - \Phi_0 R_{m0} \quad (4-11)$$

I uzbudna struja (A); N broj zavoja oko jednog stupa; H jakost polja uzorka (A/m); J magnetska polarizacija uzorka; S presjek uzorka(m^2); l duljina uzorka i zračnog raspora krajnjih stupova (m); S_z efektivni presjek zračnog raspora krajnjih stupova(m^2); Φ_z tok u lijevom jarmu (Wb); Φ_0 tok u srednjem stupu(Wb); R_m magnetski otpor lijevog i desnog dijela jarma(Ω); R_{m0} magnetski otpor srednjeg stupa i njegovog zračnog raspora(Ω). [2]

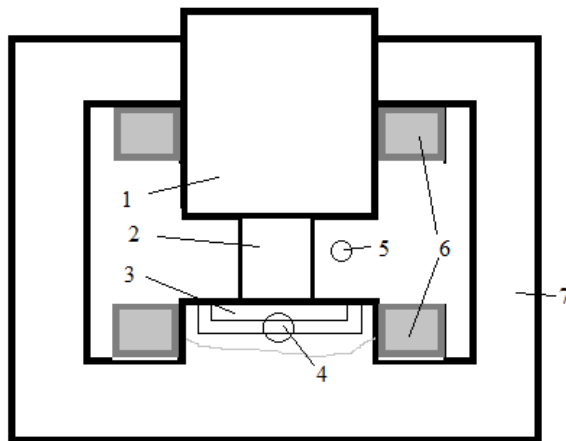
Tok u srednjem stupu je :

$$\Phi_0 = \frac{JS}{1 + \frac{\mu_0 S_z}{l} (R_m + 2R_{m0})} [\text{Wb}] \quad (4-12)$$

Kada je $R_m = R_{m0} = 0$, tok u srednjem stupu je razmjeran magnetskoj polarizaciji uzorka:

$$\Phi_0 = JS [\text{Wb}] \quad (4-13)$$

Prema slici 4.5.2 magnetski tok polarizacije J uzorka se mjeri pomoću sonde 4 smještene ispod okrugle ploče 3. Sonda 5 za mjerenje jakosti magnetskog polja proizvodit će napon U_H . Napon U_H razmjeran je jakosti magnetskog polja H u zračnom rasporu.



Slika 4.5.2 Uređaj za snimanje razmagnetizirajuće krivulje

magnetskih materijala s električnom kompenzacijom toka u zraku [2]

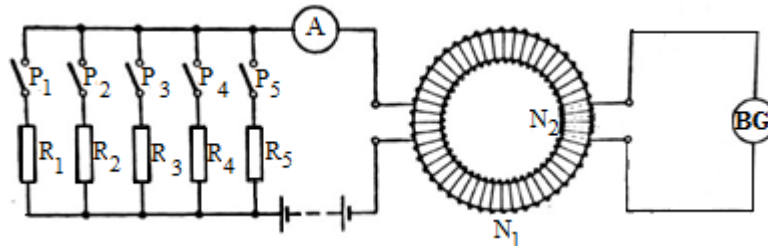
1 pomični dio srednjeg stupa; 2 uzorak; 3 okrugla ploča; 4 sonda za mjerenje magnetske polarizacije;

5 sonda za mjerenje jakosti magnetskog polja; 6 uzbudni svici; 7 jaram

5. Mjerenje magnetskih svojstava u laboratoriju

5.1 Snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom

Postupak snimanje krivulje prvog magnetiziranja vodi se prema shemi spoja 5.1.1. Za uzorak uzet je transformator 220/35. Istosmjerni napon priključen je preko otpora R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 i preklopki P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 na namot N_1 . Redom se zatvaraju (uključuju) pretklopke P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 i prolazi sve veća struja I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 , jer su paralelno spojeni otpori R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 i smanjuju otpor strujnog kruga.



Slika 5.1.1 Shema spoja za snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom

Rezultati mjerenja:

R	I [mA]	U [mV]
3kΩ	6,25	10,12
1,5kΩ	7,88	49,84
1kΩ	12,61	87,09
470Ω	18,45	111,26
270Ω	37,35	124,85

Jakost magnetskog polja određuje se pomoću formule :

$$H = \frac{N_1 I}{l_{sr}} \left[\frac{A}{m} \right] \quad (5-1)$$

N_1 -broj zavoja na primaru; I -sruja; l_{sr} -srednja duljina jezgre

$$N_1 = 168 \quad l_{sr} = 0,25m$$

R	I [mA]	U [mV]	H[A/m]
3kΩ	6,25	10,12	42
1,5kΩ	7,88	49,84	53,01
1kΩ	12,61	87,09	84,76
470Ω	18,45	111,26	123,98
270Ω	37,35	124,85	251

Povećanjem jakosti magnetskog polja prouzrokovat će povećanje indukcije:

$$\Delta B_1 = \frac{K_B}{N_2 S} \alpha_1 [T] \quad (5-2)$$

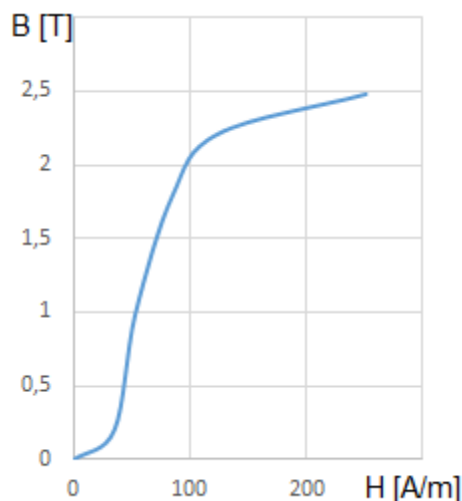
K_B -balistička konstanta galvanometra; N_2 -broj zavoja sekundara; S -presjek jezgre; α - balistički otklon galvanometra

$$K_B = 0,029 \left[\frac{Vs}{\frac{mm}{m}} \right]; \quad N_2 = 73; \quad S = 4 \times 10^{-4} m^2; \quad B_2 = B_1 + \Delta B_2; \quad B_3 = B_2 + \Delta B_3$$

Balistička konstanta dana je s podacima galvanometra. Za mjerenje naponskih udara kod vrlo osjetljivih galvanometra balistička konstanta iznosi manje od $3 \cdot 10^{-7} \text{Vs} / \frac{\text{mm}}{\text{m}}$. S malim svicima može se mjeriti neznatne promjene toka, a i može se mjeriti magnetske indukcije B u različitim točkama magnetskog polja.

R	I [mA]	U [mV]	H[A/m]	B [T]
3kΩ	6,25	10,12	42	0,201
1,5kΩ	7,88	49,84	53,01	0,99
1kΩ	12,61	87,09	84,76	1,79
470Ω	18,45	111,26	123,98	2,21
270Ω	37,35	124,85	251	2,48

Pogreške pri određivanju točaka krivulje bliže zasićenju su sve veće, jer se točke dobivaju zbrajajući sve više točaka.



Slika 5.1.2 Krivulja prvog magnetiziranja na osnovi podataka dobiveni mjerenjem

5.2 Postupak snimanja petlje histereze

Postupak snimanja petlje histereze istog uzorka (transformatora 220/35) provodi se pomoću spoja prikazanog na slici 5.2.1. Snimanje petlje histereze radilo se i pomoću digitalnog i analognog galvanometra. Naravno se uzbudna struja kroz uzbudni namot na vrijednost koja odgovara krajnoj točki M petlje histereze. Uklopimo tipku T, zatim prekinemo uzbudnu struju i očitamo balistički otklon α_1 . Taj otklon će biti razmjernan razlici indukcije točaka M i R (slika 5.2.2 i slika 5.2.3). Nakon toga ukopčamo ponovo, ali u suprotnom smjeru uzbudnu struju i očitamo otklon α_2 koji je razmjernan razlici indukcije točaka R i N. Indukciju u točkama M i R računamo pomoću formula :

$$B_m = \frac{K_B}{2SN_S}(\alpha_1 + \alpha_2) = K'_B(\alpha_1 + \alpha_2)[T] \quad (5-3)$$

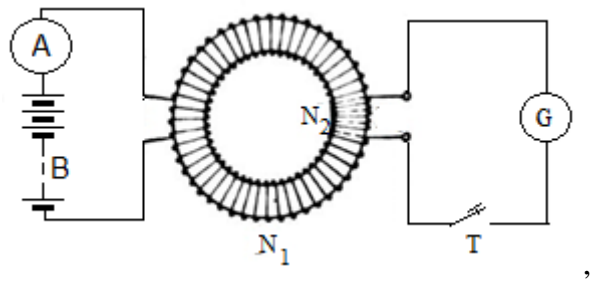
$$B_r = K'_B(\alpha_1 + \alpha_2) - 2K'_B\alpha_1 = K'_B(\alpha_2 - \alpha_1)[T] \quad (5-4)$$

Točke P i Q odredimo tako da najprije uz otvorenu tipku T smanjimo uzбудnu struju. Nakon toga uklopimo tipku T, prekidamo uzбудnu struju, očitavamo otklon balističkog galvanometra α_3 , ponovo uklopimo, ali u suprotnom smjeru uzбудnu struju i očitavamo otklon α_4 . Indukcije u točki P i Q dobijemo pomoću formula:

$$B_p = B_r + 2K'_B\alpha_3[T] \quad (5-5)$$

$$B_Q = B_r - 2K'_B\alpha_4[T] \quad (5-6)$$

Nakon određivanja točke Q ne smijemo odmah prekinuti uzбудnu struju koja odgovara toj točki, jer bismo tada postigli indukciju $0R'$ koja više ne leži na krivulji snimanja histereze. Stoga moramo najprije povećati uzбудnu struju na vrijednost koja odgovara točki N i onda je komutirati. Time je ponovo postignuta indukcija i polje koje odgovara točki M, pa možemo nastaviti snimanje ostalih točaka. Važno je da snimanje provodimo obilazeći petlju histereze uvijek u istom smjeru.



Slika 5.2.1 Shema spoja za snimanje petlje histereze

Analogni galvanometar:

$$\alpha_1 = 0,3 \text{ V} \quad \alpha_2 = 5 \text{ V}$$

$$\alpha_3 = 0,2 \text{ V} \quad \alpha_4 = 4 \text{ V}$$

Indukcije u točkama M,R,P,Q . Otkloni su dobiveni analognim galvanometrom:

$$B_m = \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} (0,3 + 5) = 2,63T$$

$$B_r = \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} (0,3 + 5) - 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 0,3 = 2,33T$$

$$B_p = 2,33 + 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 0,2 = 2,53T$$

$$B_Q = 2,33 - 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 4 = -1,64T$$

Digitalni galvanometar:

$$\alpha_1 = 0,22 \text{ V} \quad \alpha_2 = 4,63 \text{ V}$$

$$\alpha_3 = 0,14 \text{ V} \quad \alpha_4 = 3,76 \text{ V}$$

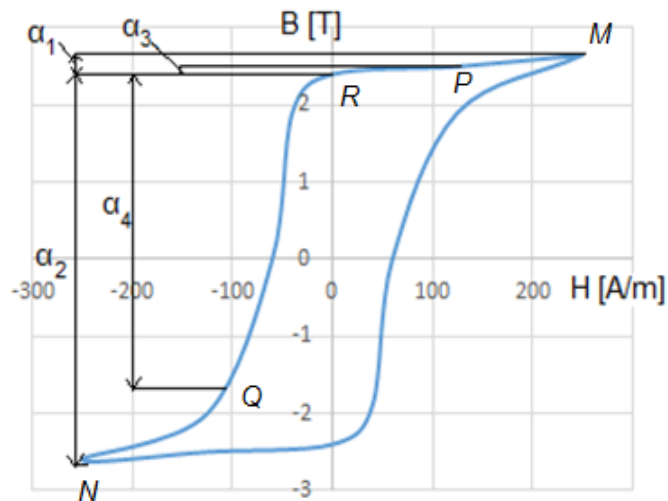
Indukcije u točkama M,R,P,Q . Otkloni su dobiveni digitalnim galvanometrom:

$$B_m = \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} (0,22 + 4,63) = 2,42T$$

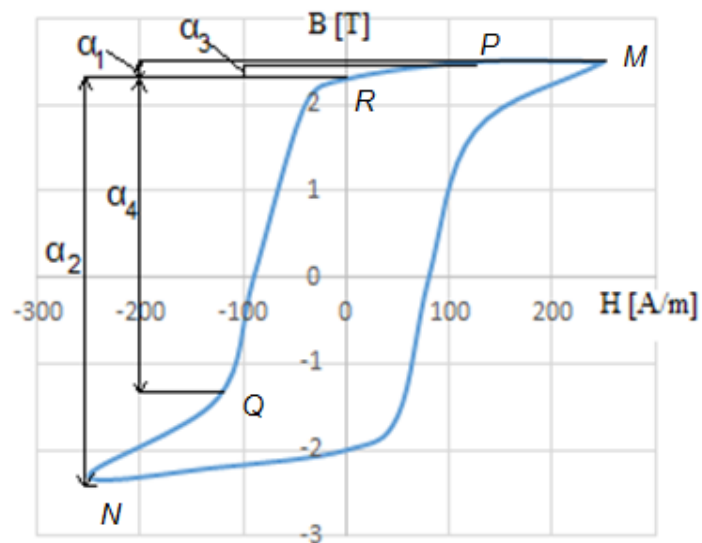
$$B_r = \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} (0,22 + 4,63) - 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 0,22 = 2,33T$$

$$B_p = 2,33 + 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 0,14 = 2,41T$$

$$B_Q = 2,33 - 2 \cdot \frac{0,029}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 73} \cdot 3,76 = -1,4T$$



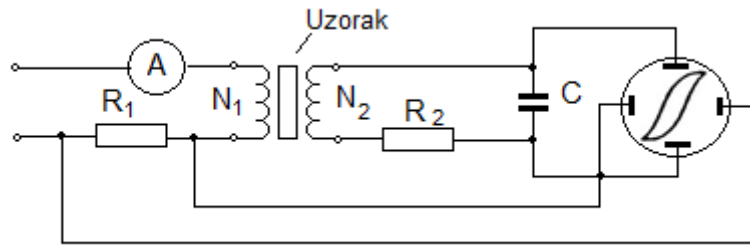
Slika 5.2.2 Petlja histereze mjerena s analognima galvanometrom



Slika 5.2.3 Petlja histereze mjerena s digitalnim galvanometrom

5.3 Ispitivanje svojstava magnetskih materijala izmjeničnom strujom

Ispitivanje izmjeničnom strujom vršilo se metodom „Snimanje dinamičke petlje histereze osciliskopom“ i modeliranjem simulacije pomoću programa „MATLAB“.



Slika 5.3.1 Snimanje dinamičke petlje histereze osciliskopom

Primjenom sklopa sa slike 5.3.1, osciliskopom se može snimiti dinamička petlja histereze. Na primarni namot $N_1 = 168$, preko otpora $R_1 = 10\Omega$ doveden je izmjenično napon. Na serijski namot $N_2 = 73$ u seriji su priključeni otpor $R_2 = 100k\Omega$ i kapacitet $C = 1\mu F$. Na pločice za horizontalni otklon dovodi se pad napona U_{R1} na otporu R_1 . Otklon elektronskog snopa osciloskopa u smjeru osi x bit će proporcionalan struji magnetiziranja i_1 , jer je $U_{R1} = i_1 R_1$. U prstenastom ili štapnom uzorku, zatvorenom jarmom neznatog magnetskog otpora, jakost magnetskog polja je razmjerna struji magnetiziranja i_1 , jer je tada $H = N_1 i_1 / l$, gdje je l duljina uzorka. Stoga je horizontalni otklon snopa razmjernan jakosti H magnetskog polja u uzorku:

$$U_{R1} = \frac{R_1 l}{N_1} H = k_H H \quad (5-7)$$

Na pločice za vertikalni otklon dovodi se pad napona na kapacitetu C . Pri tom se odabire

$R_2 \gg \frac{1}{C\omega}$, pa u sekundarnom krugu teče struja: $i_2 \approx e_2 / R_2$. Kod uzorka čiji je efektivni presjek S , inducira se u sekundarnom namotu napon:

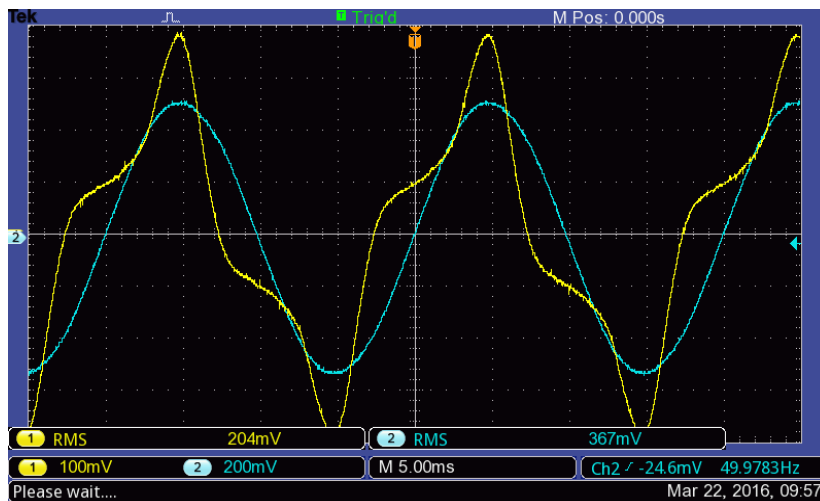
$$e_2 = -N_2 S \frac{dB}{dt} \quad (5-8)$$

Pa u sekundarnom krugu teče stuja:

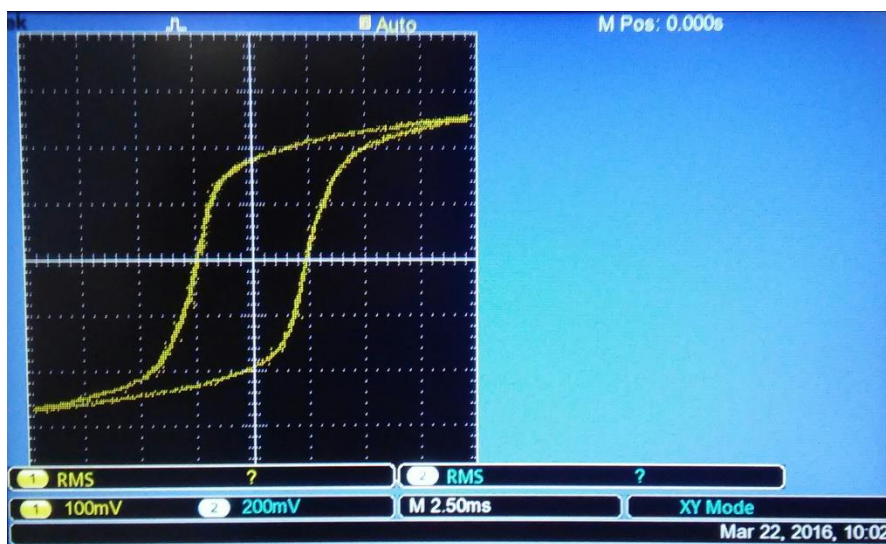
$$i_2 = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt} \quad (5-9)$$

Na kapacitetu C valda napon $u_C = \frac{1}{C} \int i_2 dt$, pa uvrštavajući u izraz (5-9) dobivamo da je pad napona na kapacitetu, a time i otklon snopa u smjeru y , razmjernan indukciji B u uzorku:

$$u_C = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B = k_B B \quad (5-10)$$



Slika 5.3.2 Valni oblik struje i napona snimljeno osciliskopom



Slika 5.3.3 Izmjenična petlja histereze transformatora 220/35V
snimljena osciliskopom

Modeliranje simulacije pomoću MATLAB-a se opisuje preko naponske jednačbe:

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt} \quad (5-11)$$

Iz prethodne jednačbe vidi se da narinutom naponu izvora drži pad napona na otporu namota i pad napona samoindukcije, također vidljiva je nelinearnost samo u magnetskom dijelu kruga kao promjena magnetskog zlančanog toka u jedinici vremena.

Iz naponske jednačbe numeričkom integracijom računa se vremenski ovisan ulančani tok:

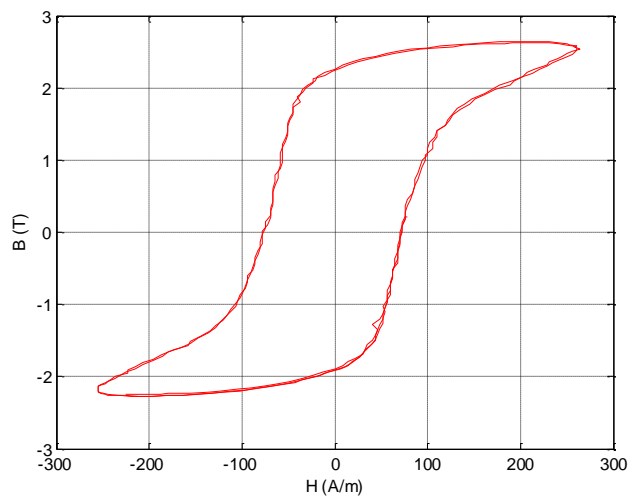
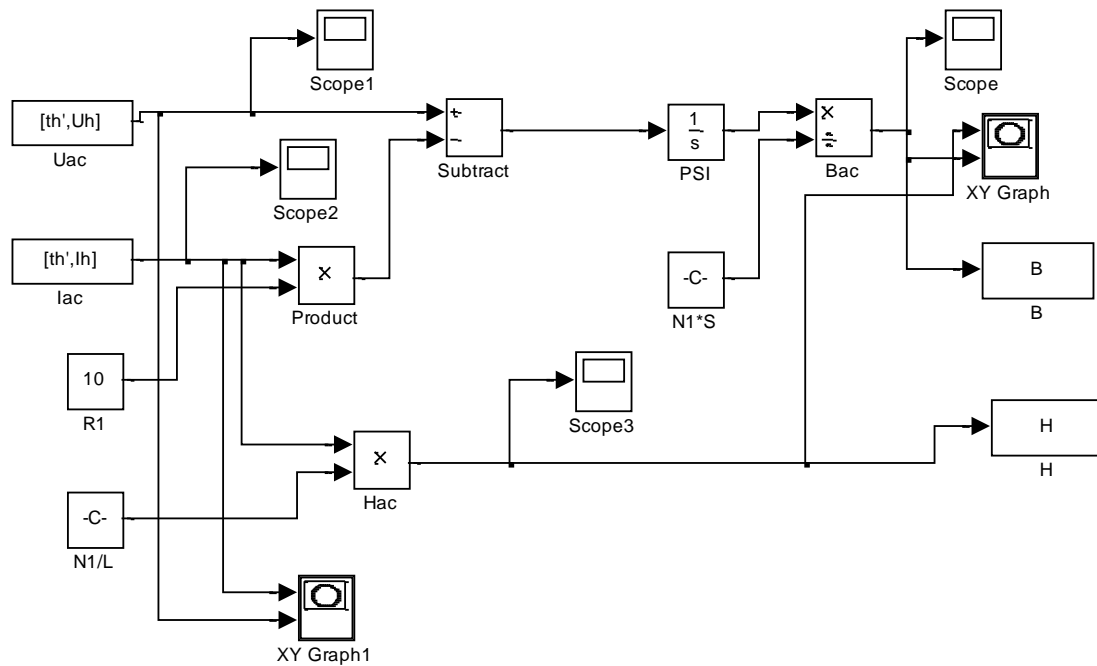
$$\psi(t) = \int_0^t [u(\tau) - Ri(\tau)] d\tau \quad (5-12)$$

Dijeljenjem ulančanog magnetskog toka ψ sa broja zavoja N i presjeka jezgre S dobije se magnetska indukcija B :

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\psi}{NS} \quad (5-13)$$

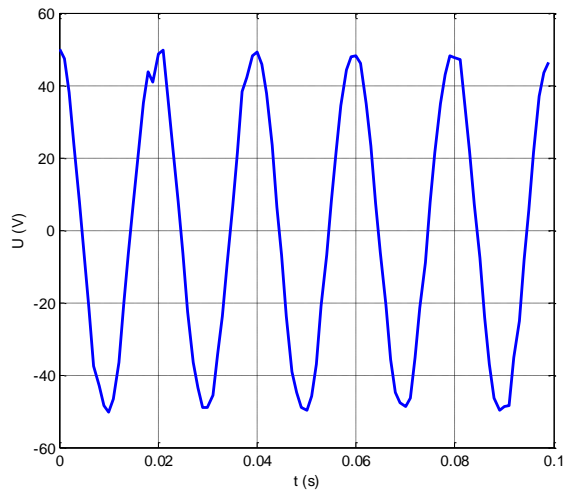
Magnetsko polje H računa se iz zakona protjecanja na osnovu poznatih podataka za stuju I , broj zavoja N i srednje duljine magnetskih silinca l :

$$H = \frac{IN}{l} \quad (5-14)$$

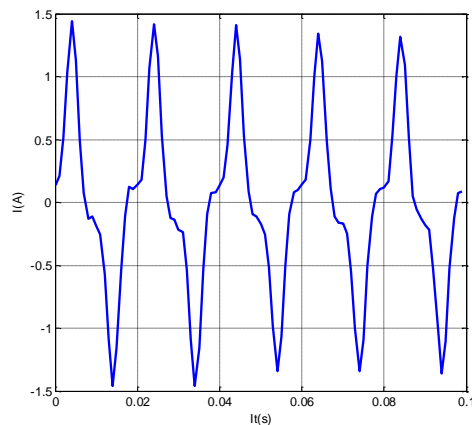


Slika 5.3.4 Izmjenična petlja histereze

transformatora 220/35 V



Slika 5.3.5 Valni oblik napona



Slika 5.3.6 Valni oblik struje

6. Pogreške mjerenja

Razvoj i ostvarivanje tehničkih sustava nezamislivi su bez mjerenja u svim fazama (dizajn, eksperimentalni rad, proizvodnja, provjera). Mjerene veličine su definiranje, mjerenje, iskazivanje mjernih rezultata.[3]

Svakim mjerenjem se ne može doći do apsolutno točnih rezultata, uvijek ima netko odstupanje rezultata od prave vrijednosti, veličine. Odstupanje je veće ili manje, ovisno o kakvoj se pogrešci radi. Mjerne pogreške nastaju zbog nesavršenosti mjernih uređaja i mjeritelja. Razlikujemo tri vrste pogreške: grube pogreške, slučajne pogreške i sistematske pogreške.

6.1 Grube pogreške

Grube pogreške nastaju kada mjeritelj zabilježi krivu vrijednost, zaboravi znamenku prilikom očitavanja, izabere pogrešni mjerni postupak ili krivo očita vrijednost sa instrumenta što nije rijetkost zbog nepreglednosti instrumenta ili neznanja mjeritelja. Mjerenja se rade više puta, pa

dobiveni rezultati s ovakvim pogreškama odstupaju od ostalih rezultata i taj rezultat se uzima u daljnu analizu.

6.2 Sistematske pogreške

Sistematske pogreške nastaju zbog nesavršenosti mjerila, mjera, mjernog postupka, zbog utjecaja okoline, nehomogenost mjernog objekta može biti izvor pogreške. Gubici u željezu jedne ploče dinamo-lima, zbog njegove nehomogenosti, ne smije se određivati na osnovi mjerenja gubitaka samo jednog malog dijela čitave ploče. Slično vrijedi i za određivanje tvrdoće metalnih predmeta. [2]

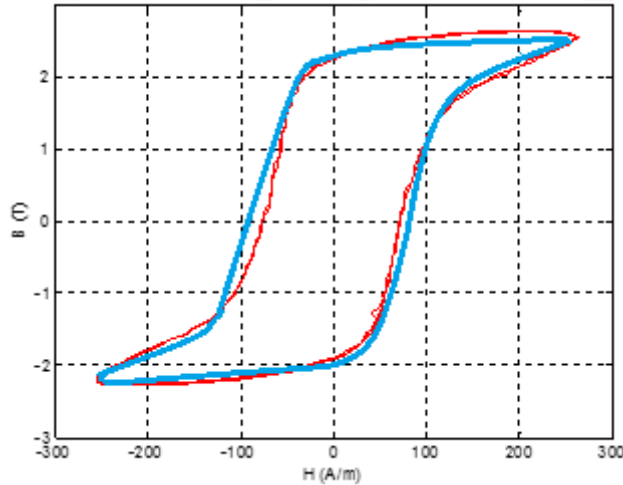
Prema uzorku sistematske pogreške dijelimo na:

- 1.) Instrument (loše baždaren instrument, npr. termometar koji pokazuje $102^{\circ}C$ u kipućoj vodi, a $2^{\circ}C$ u zaleđenoj vodi pri normiranom atmosferskom tlaku. Takav instrument pokazivat će izmjerene vrijednosti koje su konzistentno previskoke).
- 2.) Opažać (npr. očitavanje skale metra pod nekim kutem)
- 3.) Okolina (npr. pad napona u gradskoj mreži uslijed kojeg će izmjerena struja biti stalno preniska).
- 4.) Teorija (npr. ako prema teoriji temperatura okoline ne utječe na očitavanje, a u stvarnosti utječe, taj faktor predstavlja izvor pogreške [4])

Potrebno je poznavati karakteristike mjerne opreme i teoriju metoda koje se primjenjuju tokom mjerenja da bi se što bolje mogla uzeti u obzir sistematska pogreška prilikom analize rezultata.

6.3 Slučajne pogreške

Slučajne pogreške nastaju kada mjeritelj više puta mjeri istu mjerenu veličinu s istim instrumentom i u istim okolnostima i uvjetima dobivat će rezultate koji se razlikuju jedan od drugog. Slučajne pogreške su sve pogreške koje ovise u mjeritelju a nisu nastale zbog nepažnje, zabune ili uporabe neispravnog instrumenta (nisu predvidljive).



Slika 6.3.1 Plava krivulja predstavlja petlju histereze dobivenu balističkom metodom s istosmjernom strujom, crvena krivulja predstavlja izmjeničnu petlju histereze

Razlike između petlji histereza su minimalne, točke zasićenja jedne i druge krivulje su skoro u istoj točki. Plava krivulja je malo šira od crvene, što znači da ima više akumuliranje energije, ali neprimjetno više. Koercitivne sile također su skoro jednake, minimalna je razlika između koercitivnih sila.

Točke petlje histereze dobivene balističkom metodom s istosmjernom strujom (plava krivulja):

$$T_1(251; 2,42), T_2(125,5; 2,41), T_3(0; 2,33), T_4(-125,5; -1,4), T_5(-251; -2,42)$$

Točke izmjenične petlje histereze (crvena boja):

$$T_1(252; 2,5), T_2(126; 2,42), T_3(0; 2,33), T_4(-126; -1,4), T_5(-251; -2,42)$$

Aritmetičke sredine:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^r x_i = \frac{251 + 125,5 + 0 + (-125,5) + (-251) + 252 + 126 + 0 + (-126) + (-252)}{10} = -0,1 \quad (6-1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^s y_j = \frac{2,42 + 2,41 + 2,33 + (-1,4) + (-2,42) + 2,5 + 2,42 + 2,33 + (-1,4) + (-2,42)}{10} = 0,68 \quad (6-2)$$

Varijance:

$$s_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2 = \frac{315508,6}{10} = 31550,86 \quad (6-3)$$

$$s_x = 177,63$$

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^s (y_j - \bar{y})^2 = \frac{45,68}{10} = 4,57 \quad (6-4)$$

$$s_y = 2,14$$

Kovarianca:

$$s_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^r x_i y_j - \bar{x}\bar{y} \quad (6-5)$$

$$s_{xy} = 382,63 - 44,32 = 338,31$$

Koeficijent korelacije:

$$\rho = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{338,31}{177,63 \cdot 2,14} = 0,89 \quad (6-6)$$

Ako je koeficijent korelacije između $0,8 < \rho < 1$ tada je jaka pozitivna veza, što znači da neke promjene kod ispitivanja s izmjeničnom metodom mogli bi izmjeriti i sa istosmjernom metodom.

Zaključak

U radu su objašnjene metode za mjerenje svojstava magnetskih materijala istosmjernom i izmjeničnom strujom. Mjerenje svojstava magnetskih materijala doznajemo koji materijali su pogodni za korištenje u elektrotehnici. Mjerenjem svojstava doznajemo krivulju prvog magnetiziranja materijala, veličinu magnetskog toka, odnos između magnetskog polja i magnetske indukcije, krivulju magnetiziranja, remagnetiziranja i dr. Zbog velike razlike u svojstvima magnetskih materijala, a i zbog različite veličine i oblika materijala, brzine i preciznosti mjerenja, postoje različite metode za mjerenje svojstava magnetskih materijala. U praktičnom dijelu mjerenje svojstava vršilo se „*Balističkom metodom s prstenastim uzorkom*“ s namotima $N_1 = 168$ i $N_2 = 73$. Mjerenje se vršilo s istosmjernom strujom, a s izmjeničnom strujom koristila se metoda „*Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom*“ i vršilo se modeliranje simulacije u MATLAB-u. Pogreške pri mjerenju javljaju se zbog očitavanja, jer kod analogni mjerni instrument na trenutak prikaže otklon i kazaljka se odmah vrati na nulu pa je teško odrediti do koje je vrijednosti kazaljka dosla. Kod digitalnog instrumenta može se namjestiti da instrument zapamti maksimalnu vrijednost, nakon svakog očitavanja treba ga restartirati jer neznamo hoće li slijedeći otklon biti veći ili manji od prijašnjeg ako se ne restartira i otklon bude manji tada instrument neće ništa pokazati jer pamti najveću vrijednost a to je vrijednost prethodnog otklona. Vrijednosti ovise o galvanskoj konstanti i nije kod svakog instrumenta naznačena vrijednost konstante tako da i pogreške mjerenja dosta ovise o galvanskoj konstanti instrumenta jer lako je moguće uzeti pogrešnu konstantu.

I. Literatura

- [1] Predrag Krčum : Električna mjerenja, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije Split, 2012.
- [2] Vojislav Bego : Mjerenja u elektrotehnici, Tehnička knjiga Zagreb
- [3] Mjerne pogreške i točnosti mjerenja, kolegiji "Mjerne metode" Zagreb, <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/MM - Tema1.pdf> (12.9.2015)
- [4] Obrada rezultata mjerenja, Pogreške pri mjerenju, <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~sanja/wp-content/uploads/2012/09/POGRE%C5%A0KE-PRI-MJERENJU.pdf> (12.9.2015.)
- [5] Elektrotehnički materijali tehnologija, magnetski materijali, 1997. https://www.fer.unizg.hr/download/repository/EMIT_M1.pdf (21.12.2015.)
- [6] Brezunščak M. : Mjere i sistemi jedinica, Tehnička knjiga Zagreb, 1961.
- [7] Specht, T.R. & Wagner, R.N : The Theory of the Current Transducer and its Application in the Aluminum Industry
- [8] Ebinger A. : Fortschritte und neuerungen in der Entwicklung von Präzisionsinstrumente fur Fleisch und Wechselstrom

II. Popis slika i tablica

Slika 2.1.1 Krivulja prvog magnetizirana

Slika 2.3.1 Ovisnost permeabiliteta o magnetskoj indukciji

Slika 2.4.1 Petlja histereze

Slika 2.6.1 Toplinska ovisnost krivulje magnetiziranja

Slika 2.7.1 Faktor izbočenosti

Slika 3.1.1 Epsteinov aparat

Slika 3.2.1 Jaram i namoti uređaja za snimanje dinamičke petlje histereze

Slika 3.3.1 Snimanje dinamičke petlje histereze osciloskopom

Slika 4.0.1 Krivulja magnetiziranja materijala

Slika 4.1.1 Shema spoja za snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom

Slika 4.1.2 Krivulja prvog magnetiziranja na osnovi podataka dobiveni mjerenjem prema shemi na slici 4.1.1

Slika 4.1.3 Komutaciona krivulja i petlja histereze

Slika 4.1.4 Shema spoja za snimanje komutacione krivulje i petlje histereze balističkom metodom

Slika 4.1.5 Hopkinsonov jaram

Slika 4.2.1 Fahy-Simplexov permeametar

Slika 4.3.1 Iliovicijev jaram

Slika 4.4.1 Ewingova metoda istma

Slika 4.4.2 Metoda istma s polnim nastavcima

Slika 4.5.1 Stäblein-Steinmitzov uređaj

Slika 4.5.2 Uređaj za snimanje rezmagnetiziranja krivulje magnetiziranja materijala s električnom kompenzacijom toka u zraku

Slika 5.1.1 Shema spoja za snimanje krivulje prvog magnetiziranja balističkom metodom

Slika 5.1.2 Krivulja prvog magnetiziranja na osnovi podataka dobiveni mjerenjem

Slika 5.2.1 Shema spoja za snimanje petlje histereze

Slika 5.2.2 Petlja histereze dobivena s analognim galvanometrom

Slika 5.2.3 Petlja histereze dobivena s digitalnim galvanometrom

Slika 5.3.1 Snimanje dinamičke petlje histereze osciliskopom

Slika 5.3.2 Valno oblik struje i napona snimljeno osciliskopom

Slika 5.3.3 Izmjenična petlja histereze transformatora 220/35 V snimljena osciliskopom

Slika 5.3.4 Izmjenična petlja histereze transformatora 220/35 V snimljena u MATLAB-u

Slika 5.3.5 Valni oblik napona

Slika 5.3.6 Valni oblik Struje

Slika 6.3.1 Plava krivulja predstavlja petlju histereze dobivenu balističkom metodom s istosmjernom strujom, crvena krivulja predstavlja izmjeničnu petlju histereze

Tablica 2.1 Curieva točka za feromagnetske elemente

III. Sažetak

Postoje razne metode za snimanje svojstava magnetskih materijala. Pod svojstvima magnetski materijala sporazumjeva se snimanje krivulje magnetiziranja, histereze, krivulje demagnetiziranja i permeabiliteta. Postoje izmjenične i istosmjerne mjerne metode. Odabiranje mjerne metode ovisi o oblicima, veličinama uzoraka, brzini i točnosti mjerenja i o potrebnoj veličini mjernog polja jer kod mekih magnetskih materijala treba omogućiti mjerenje polja jakosti manjih od $10^{-1} A/m$, a kod tvrdih većih od $10^6 A/m$. Kod balističke metode s prstenastim uzorkom razmatra se postupak snimanja krivulje magnetiziranja na uzorku prstenastog oblika. Kod štapnih uzoraka koristi se jarmom velikog presjeka od magnetski materijala, a to je Hopkinsonov jaram. Fahy-Simplexov permeametar je uređaj kojim se određuje jakost magnetskog polja mjerenjem magnetskog pada napona. I kod Iliovicijevo jarma se jakost magnetskog polja u uzroku određuje mjerenjem magnetskog pada napona. Metoda istma se koristi kod mjerenja jačih polja, iznad $5 \cdot 10^4 A/m$, a postiže se posebnim oblikom uzoraka koji je jako sužen na mjernom dijelu. Ta metoda nije prikladna za određivanje petlje histereze, zato se u praksi koristi metoda istma s polnim nastavcima. Stäblein-Steinitzov uređaj kod postupaka određivanja magnetskih karakteristika koristi se rotirajućim ili titrajućim svitkom i prikaldan je za tekuća mjerenja u proizvodnji.

IV. Summary

There are different methods for recording properties of magnetic materials. Magnetic property material means recording the magnetization curve, hysteresis, degaussing curve and permeability. There are alternating and direct current measurement methods. Selecting the measurement method depends on the shapes, sizes, patterns, speed and accuracy of measurements $10^{-1} A/m$ and the required size of the measuring field $10^6 A/m$, because in soft magnetic materials should allow the measurement of fields smaller than, and in hard bigger than. In the ballistic method with ring pattern considers the process of recording the magnetization curve on a sample of annular shape. In stick samples, it uses large sections yoke of the magnetic material, and that it's the Hopkins yoke. Fahy-Simplexov permeameter is a device which determines the strength of the magnetic field by measuring the magnetic low voltage drop. , Also with Iliovicievs yoke, the sample of magnetic field intensity it is determined with meas mag low volt. Same method is used in measuring the stronger fields, above $5 \cdot 10^4 A/m$, and it is a special type of sample that is very narrow in the measuring part. This method is not suitable for the determination of the hysteresis loop, so in practice its used the Istmo method with pole ext. Stäblein-Steinitzov device with methods of determining the magnetic characteristics is used with rotating or vbrtg coil and its suitable fr cur mes in prod.

V. Životopis

Marko Toman rođen 21.01.1994. u Mistelbachu (Austrija), pohađao osnovnu školu Ivan Goran Kovačić u Štitaru. Nakon završetka osnovne škole upisuje srednju školu Tehnička škola Županja smjer elektrotehnika. Godine 2012. upisao stručni studiji elektrotehnike smjer elektroenergetike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.