

2. Mjerenje magnetske indukcije pomoću instrumenta: PHIWE TESLAMETER

Vrhovac, Mario

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:200:523513>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-21**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA**

Stručni studij

**Mjerenje magnetske indukcije pomoću instrumenta:
PHYWE TESLAMETER**

Završni rad

Mario Vrhovac

Osijek, 2017

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. INSTRUMENT PHYWE TESLAMETER.....	2
2.1. Način rada.....	2
2.2. Elementi i mogućnosti instrumenta	3
2.3. Rukovanje.....	5
2.3.1. Korištenje sondi.....	5
2.3.2. Nulovanje	6
2.3.3. Mjerenje istosmjernih magnetskih polja	7
2.3.4. Mjerenje izmjeničnih polja.....	7
2.3.5. Korištenje analognog izlaza	7
2.4. Tehnički podaci	7
3. PROCJENA POGREŠKE MJERENJA.....	9
3.1. Mjerna nesigurnost	9
3.2. Određivanje standardne nesigurnosti A tipa.....	10
3.3. Određivanje standardne nesigurnosti B tipa.....	12
3.4. Iskazivanje mjernog rezultata.....	15
4. PROVOĐENJE MJERENJA.....	16
4.1. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4.....	16
4.2. Procjena pogreške mjerenja istosmjernog magnetskog polja zavojnica L1, L2, L3 i L4....	20
4.3. Procjena pogreške mjerenja izmjeničnog magnetskog polja zavojnica L1, L2, L3 i L4.....	23
4.4. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 s obzirom na udaljenost sonde .	24
4.5. Mjerenje gubitaka rasipanja transformatora	28
4.6. Mjerenje gubitaka rasipanja motora	29
4.7. Mjerenje magnetskog polja vodiča.....	32
5. ZAKLJUČAK	34

LITERATURA.....	35
SAŽETAK.....	36
ŽIVOTOPIS	37

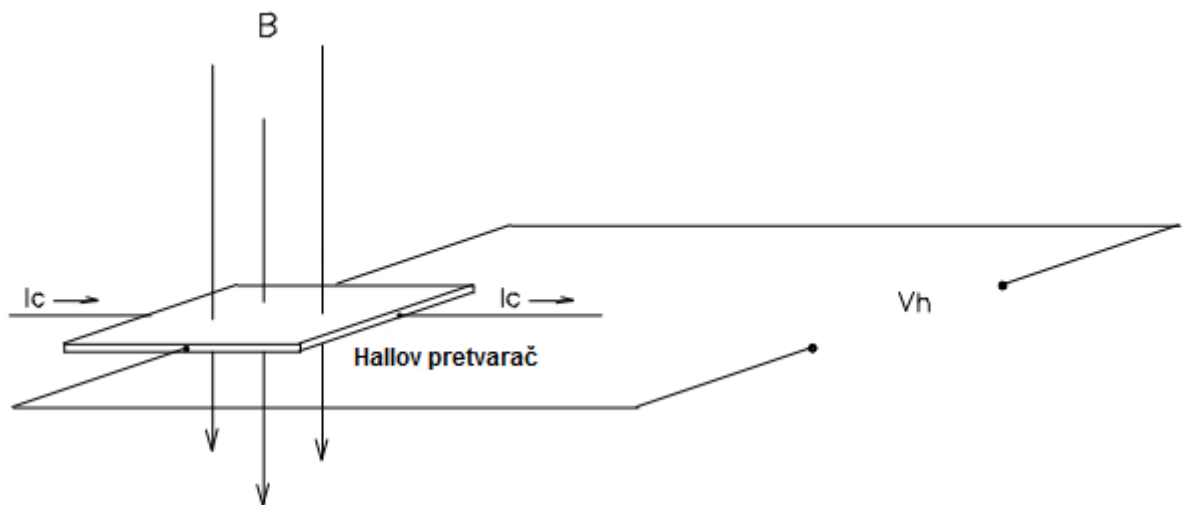
1. UVOD

Tema završnog rada je mjerenje magnetske indukcije pomoću instrumenta: PHYWE teslametar. Problem odnosno zadatak završnog rada je opisati način rada, rukovanje i mogućnosti mjernog uređaja PHYWE teslametar. Treba provesti sva mjerenja koja nudi instrument za različite vrste materijala uključujući i zrak. Mjeriti istosmjerna i izmjenična magnetska polja. Na kraju treba procijeniti pogrešku mjerenja. Jedna od bitnijih tema jest objašnjenje načina rada odnosno objašnjenje metode koju koristi uređaj kako bi izmjerio gustoću magnetskog toka. Također bitno je i provođenje mjerenja kako bi se usporedbom različitih materijala i njihovih magnetskih svojstava moglo doći do određenih zaključaka. Elementi završnog rada su: sadržaj, uvod, glavni dio rada koji se sastoji od četiri poglavlja u kojima je razrađena tematika, zaključak, literatura, sažetak i životopis. U drugom poglavlju objašnjeno je: što je teslametar i koja je njegova svrha, na koji način mjeri magnetsku indukciju, koji su njegovi elementi i kako se koriste, kako se provodi mjerenje. Drugo poglavlje odnosi se na postupak procjene pogreške mjerenja, objašnjavanje pojma mjerne nesigurnosti, na koji način se prikazuju dijagrami očitavanja mjerenja, postupak određivanja standardnih nesigurnosti A i B tipa i na kraju iskazivanje mjernog rezultata. Četvrto poglavlje obuhvaća provođenje raznih mjerenja. Mjerene su magnetske indukcije četiriju zavojnica različitih karakteristika, te su procijenjene pogreške mjerenja. Provedena su mjerenja magnetske indukcije zavojnica s obzirom na udaljenost sonde od zavojnice. Zavojnice su mjerene aksijalnom i tangencijalnom. Također, mjereni su gubici rasipanja transformatora i motora, te je izmjereno magnetsko polje oko ravnog vodiča.

2. INSTRUMENT PHYWE TESLAMETER

2.1. Način rada

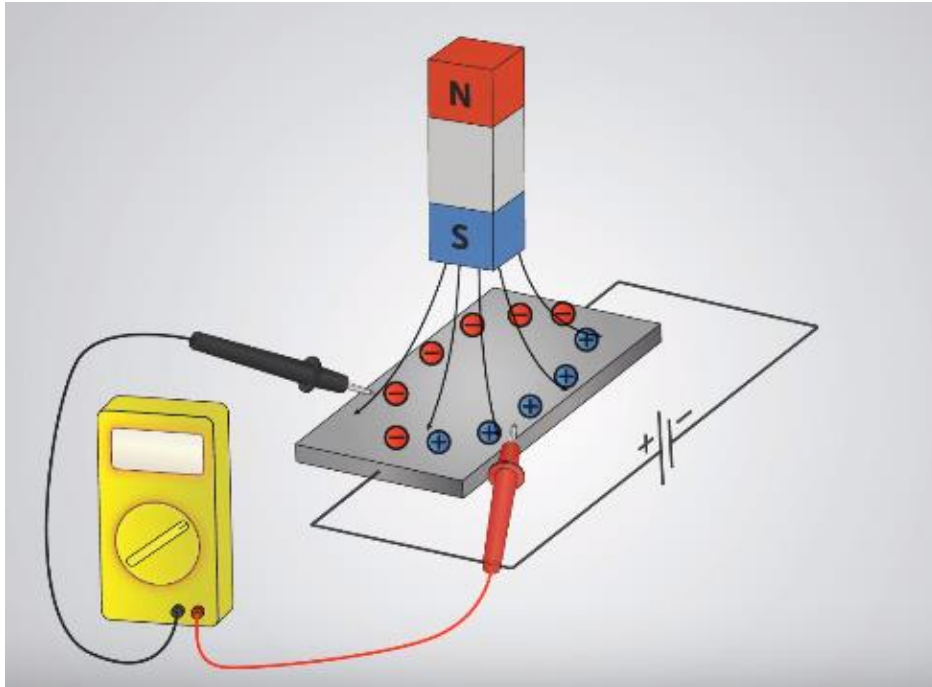
Teslametar je instrument koji služi za mjerenje gustoće magnetskog toka odnosno magnetske indukcije. Način rada teslametra temelji se na hallovom efektu, a uređaj koji omogućuje njegov nastanak jest hallov pretvarač. Hallov pretvarač je tanka pločica načinjena od poluvodičkog materijala na koju su spojena 4 vodiča (Sl. 2.1.). [1]



Sl. 2.1. Hallov pretvarač [2]

Konstantna istosmjerna struja (I_c) prolazi kroz pločicu. Struju tvore mali nosioci naboja odnosno elektroni, šupljine i ioni koji u ovom slučaju prolaze ravno kroz pločicu. Kada silnice magnetske indukcije (B) prolaze kroz pločicu, na naboj djeluje lorentzova sila. Ona nastaje uslijed gibanja naboja u magnetskom polju. Ta sila zakrivljuje putanju naboja kroz pločicu, pa se tako naboji kreću uz rub pločice. Pozitivni naboji će se kretati uz jedan rub pločice, a negativni uz drugi rub, što će uzrokovati razliku potencijala odnosno nastanak hallovog napona (V_h). Takva pojava zove se hallov efekt. Uz hallov napon moguće je odrediti smjer magnetskog toka. U jednom smijeru napon će biti pozitivan a u drugom (obrnutom) napon će biti negativan. Ako jednaki broj silnica prolazi u oba smijera, hallov napon će biti 0 V. Ta osjetljivost na smjer magnetskog toka omogućuje mjerenje istosmjernih i izmjeničnih magnetskih polja. Hallov napon ovisan je o kutu prolaska magnetskih

silnica kroz pločicu. Pa će tako hallov napon biti najveći kada silnice prolaze okomito na pločicu.
[2][3]



Sl. 2.2. Prikaz putanje naboja uslijed hallovog efekta [4]

2.2. Elementi i mogućnosti instrumenta

Teslametar se napaja iz gradske mreže putem kabela i uljučuje se pomoću prekidača za napajanje koji se nalazi na stražnjoj strani kućišta. Elementi PHYWE teslametra koji su prikazani na slici (Sl. 2.3.) su sljedeći:

1. Ulaz - priključak za spajanje hallovih sondi
2. Vijak za podešavanje - za grubo nulovanje
3. Koračni prekidač - za odabiranje mjernog područja
4. Preklopka - za odabiranje mjerenja istosmjernog ili izmjeničnog polja
5. Digitalni zaslon - za prikazivanje mjerenih vrijednosti. Prikaz 3 digita s oznakom smjera polja i decimalnom točkom
6. Potenciometar - za fino nulovanje
7. Izlaz - za spajanje vanjskog mjernog instrumenta [1]



Sl. 2.3. Elementi PHYWE teslametra [1]

Uz instrument dostupne su dvije hallove sonde od kojih je barem jedna nužna kako bi se mogla koristiti kao senzor za mjerenje. Jedna od njih je specijalno dizajnirana tako da mjeri magnetsko polje koje je orijentirano aksijalno u odnosu na njenu dršku. Takav tip sonde zove se aksijalna sonda. Ona je pogodna za mjerenje magnetskog polja unutar zavojnice. Sonda je duga 30 cm kako bi se omogućilo lakše mjerenje unutar dužih zavojnica. Druga sonda mjeri magnetsko polje okomito u odnosu na dršku sonde. Takav tip sonde zove se tangencijalna sonda. Ona je ekstremno tanka i ravna te služi za mjerenja unutar uskih zračnih prostora koji mogu biti veličine svega 1 mm.

Teslametar ima 3 mjerna područja:

- 0-20 mT (točnost 0.01 mT)
- 0-200 mT (točnost 0.1 mT)
- 0-1999 mT (točnost 1 mT)

Područje iznad 1 T pogodno je za mjerenje jakih magnetskih polja. Teslametar također ima ugrađeni snimač izlaza 2 volta koji prikazuje snimku tijekom indukcije (npr. za promatranje petlje histereze). Za snimanje su prikladni računalni sustavi za mjerenje. Uređaj mjeri istosmjerna i izmjenična magnetska polja. U oba slučaja izlaz snimača pruža istosmjerni napon. Za istosmjerna polja, smjer polja može biti identificiran putem predznaka na zaslonu ili polariteta napona od izlaza snimača. [1]

2.3. Rukovanje

Prije početka uporabe PHYWE teslametra, nužno je pročitati sigurnosne mjere opreza kako ne bi naštetili instrumentu ili kako ne bi došlo do ozlijeđe korisnika. Sigurnosne mjere opreza su:

1. Provjeriti odgovara li napon mreže naponu napajanja instrumenta koji je naznačen na natpisnoj pločici
2. Instalirati instrument tako da prekidač za napajanje i priključni utikač budu lako dostupni.
3. Ne prekrivati ventilaciju.
4. Koristiti instrument samo u suhim prostorijama u kojima nema rizika od eksplozije
5. Koristiti instrument samo u svrhu za koju je konstruiran. [1]

2.3.1. Korištenje sonde

Komponenta magnetske indukcije koja ide u smjeru osi sonde mjeri se aksijalnom sondom. Točka mjerenja je na samom kraju sonde. Moguće je odrediti i smjer magnetskog polja. Ako je magnetsko polje usmjereno prema dršci od sonde (npr. ispred sjevernog pola magneta) vrijednost će biti prikazana kao pozitivna, a ako je polje obrnutog smjera, vrijednost će biti negativna. Tangencijalna sonda ima zaštitnu cjevčicu koja se mora maknuti prije mjerenja. Hallov pretvarač ugrađen je u ravni plastični držak debljine oko 1 mm. Njegova pozicija (točka mjerenja) u dršku je jasno vidljiva. U tom slučaju komponenta magnetske indukcije biti će izmjerena ako je okomita na dršku sonde. I kod tangencijalne sonde također je moguće odrediti smjer magnetskog polja. Pozitivna vrijednost kazuje da polje ulazi u sondu sa strane sonde na kojoj se nalazi natpisna pločica, a negativna vrijednost kazuje da polje ide u obrnutom smjeru. Sonde moraju biti pravilno pozicionirane radi preciznog mjerenja. Da bi se izbjegla oštećenja sonda bi trebala biti smještena u metalnoj cijevi. [1]



Sl. 2.4. Tangencijalna i aksijalna sonda [2]

2.3.2. Nulovanje

Ova procedura je bitna samo pri mjerenju istosmjernih magnetskih polja. Kod mjerenja izmjeničnog magnetskog polja teslametar se nuluje automatski u roku od nekoliko sekundi. Preklupkom treba biti uključeno mjerenje istosmjernog magnetskog polja. Zatim treba spojiti hallovu sondu na priključak instrumenta. Prije početka mjerenja, na zaslonu treba biti prikazana nula, a to se podešava pomoću potenciometra za fino nulovanje. Ako to nije moguće, potenciometar se stavlja u srednji položaj te se pomoću odvijača podešava vijak za grubo nulovanje i tako se minimizira vrijednost na zaslonu. Nakon toga ponovo se podešava potenciometrom za fino nulovanje. Preporučuje se nulovanje pri najmanjem mjernom području tj. 20 mT, kako bi se izbjegla ponovna podešavanja pri naknadnom korištenju većih mjernih područja. Bitno je znati da Zemljino magnetsko polje u tom području proizvodi očitavanje od ± 4 digita ($40 \mu\text{T}$). Ako nije odrađena kompenzacija tog polja za vrijeme nulovanja, potenciometar bi trebao biti postavljen kako bi okretanje sonde za 180° rezultiralo promjenu predznaka a ne mijenjalo apsolutnu vrijednost jakosti polja. Kada se mjere polja od vodiča kojima teče struja, prije nulovanja preporuča se da struja magnetskog polja bude isključena pri postavljanju sonde na točku mjerenja, to eliminira mješanje dodatnih neželjenih polja. Kada se mjeri u području 20 mT, nulovanje treba provjeriti i podesiti (ako je potrebno) u prvih nekoliko minuta nakon što je teslametar uključen. Preporučeno je uključiti teslametar 10 minuta prije početka mjerenja jer će tada promjena u nulnoj skali biti zanemariva. [1]

2.3.3. Mjerenje istosmjernih magnetskih polja

Kada je teslametar nulovan, spreman je za mjerenje. Preklopkom treba biti uključeno mjerenje istosmjernog polja. Ako se na zaslonu pojavi broj jedan (bez vodećih nula) to je znak da se treba prebaciti na veće mjerno područje. U tom slučaju, prikazan je i smjer polja. [1]

2.3.4. Mjerenje izmjeničnih polja

Preklopkom treba uključiti mjerenje izmjeničnog polja. Ako nema polja koje utječe na sondu, zaslon će u roku od nekoliko sekundi prikazati nulu. Teslametar je odmah spreman za korištenje. Pri mjerenju izmjeničnih polja teslametar reagira na promjene u roku od 3 sekunde. Zatim se na zaslonu prikazuje efektivna vrijednost magnetske indukcije koja bi trebala biti sinusoidalnog oblika. Teslametar je baždaren za mjerenje izmjeničnog polja frekvencije 50 Hz. Moguće su i ekstremno precizne mjere do 500 Hz. Isto kao i pri mjerenju istosmjernih polja, ako je na zaslonu prikazana vrijednost 1 bez vodećih nula, potrebno je povećati mjerno područje. Okretanje sonde za 180° neće utjecati na promjenu vrijednosti jer pri mjerenju izmjeničnog polja uvijek će biti prikazane pozitivne vrijednosti na zaslonu. [1]

2.3.5. Korištenje analognog izlaza

Na analogni izlaz (4mm priključak) može se spojiti izlazni mjerni instrument. Uz yt i xyt snimače, moguće je spojiti i računalne sustave za mjerenje. Izlazni napon reagira na digitalni zaslon. 1 mV po digitu; granica reagiranja na izlazni napon je ± 1.999 V (samo pozitivni predznak kod mjerenja izmjeničnih magnetskih polja). Izlazni mjerni instrument koji je spojen na teslametar trebao bi imati unutarnji otpor barem 20 k Ω . [1]

2.4. Tehnički podaci

Tab. 2.1. Tehnički podatci instrumenta i mjernih sondi pri temperaturi 25 °C [1]

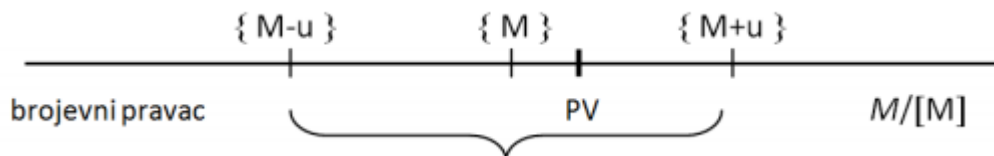
Raspon temperature pri radu instrumenta	5 – 40 °C
Relativna vlažnost	< 80 %
Mjerno područje	10 ⁻⁵ do 1999 mT
Točnost (Navedeno do 1 T)	Istosmjerno polje: ± 2 % Izmjenično polje 50 – 500 Hz: ± 2 %

	Izmjenično polje 500 – 1000 Hz: ± 3 %
Materijal hallovog pretvarača	Galijev arsenid (GaAs)
Temperaturni koeficijent (10 – 40 °C)	$\leq 0,04$ %/K
Granična frekvencija (izmjeničnog polja)	5 kHz
Analogni izlaz	Raspon napona: 0... ± 2 V Kalibracijski faktor: 1 mV/digit
Razred zaštite	I
Ulazni napon (+6 %/-10 %)	Vrijednost zadana na natpisnoj pločici
Mrežna frekvencija	50/60 Hz
Prividna snaga	10 VA
Mrežni osigurač (5mm x 20 mm)	Vrijednost zadana na natpisnoj pločici
Dimenzije kućišta	225*235*170 mm
Težina	3,75 kg
Hallova sonda, aksijalna	Duljina sonde (bez drške): 300 mm Promjer sonde: 6 mm Težina: 0,38 kg
Hallova sonda, tangencijalna	Dimenzije sonde (bez drške): 75*5*1 mm Težina: 0,20 kg

3. PROCJENA POGREŠKE MJERENJA

3.1. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost može se definirati kao iskaz o kvaliteti rezultata mjerenja ili kao procjena raspona vrijednosti unutar kojeg realno očekujemo da leži prava vrijednost mjerene veličine. [5]



Sl 3.1. Mjerni rezultat s mjernom nesigurnošću [5]

PV – Dogovorena prava vrijednost

M – Najbolja procjena mjerene veličine

u – Mjerna nesigurnost

Nakon izvršenog mjerenja, na temelju dobivenih vrijednosti procjenjuje se nesigurnost i određuje raspon vrijednosti u kojem se očekuje postojanje vrijednosti mjerene veličine. Dobiveni mjerni rezultat smatra se najvjerojatnijom vrijednošću mjerene veličine. Nesigurnost ispravljenog mjernog rezultata biti će manja. Ispravljanje mjernog rezultata ovisit će o veličini ispravka i namjeni mjernog rezultata. Uzroci nastanka nesigurnosti mjernog rezultata su sljedeći:

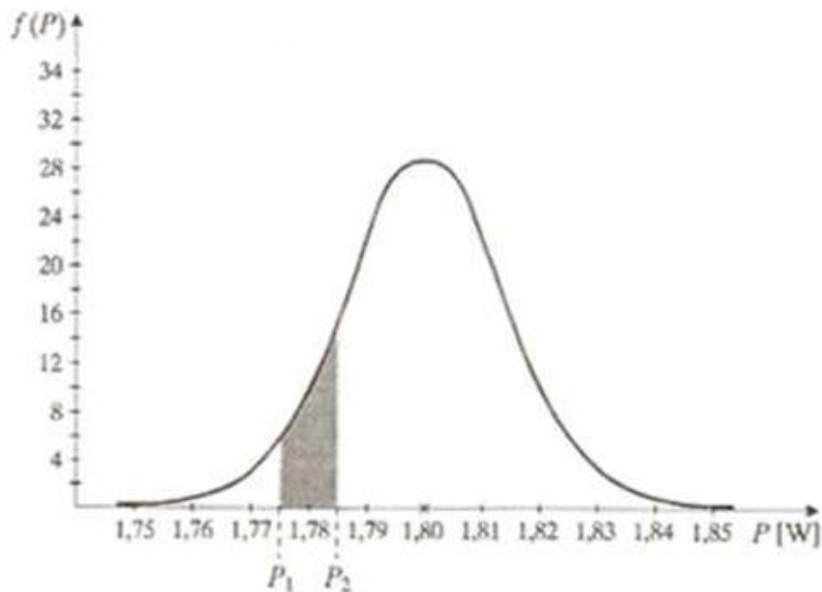
1. Etaloni
2. Mjerna oprema
3. Nepotpuna definicija i nesavršena realizacija mjerene veličine
4. Nedovoljno poznavanje utjecaja okoline na mjerenje
5. Mjeritelj
6. Promjena očitavanja ponovljenih mjerenja pri prividno istim uvjetima
7. Preostala sistemska odstupanja

Postoje dvije kategorije od kojih se grupiraju komponente mjerne nesigurnosti:

1. Nesigurnost A tipa – Komponente nesigurnosti koje su određene statičkim metodama
2. Nesigurnosti B tipa – Komponente koje su procijenjene drugim metodama [5]

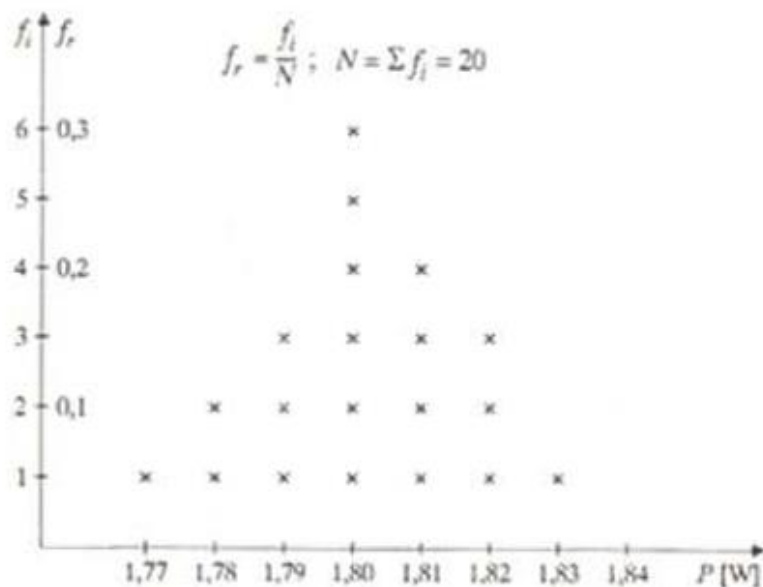
3.2. Određivanje standardne nesigurnosti A tipa

Standardna nesigurnost A tipa određuje se eksperimentalno, statističkim metodama. Ako se vremenski stalna veličina x mjeri više puta, da se pritom uvjeti ne mijenjaju, niz dobivenih očitavanja x_i međusobno će se razlikovati (ako je razlučivanje dovoljno) zbog raznih utjecaja uzrokovanih mnoštvom malih nekontroliranih promjena koje se neprekidno zbivaju u mjernoj opremi, mjernom objektu, okolini i mjeritelju. Razdioba učestalosti pojedinih očitavanja može se prikazati na nekoliko načina, ovisno o broju ponovljenih mjerenja i razlučivosti pojedinih očitavanja. Kada bi broj ponovljenih mjerenja bio beskonačan i kada bi razlučivost bila beskonačno velika, razdioba učestalosti pojedinih očitavanja bila bi prikazana kao normalna razdioba (Sl. 3.2.). [5] [6]



Sl. 3.2. Primjer normalne razdiobe s kontinuiranom varijablom P gdje $f(P)$ predstavlja gustoću učestalosti varijable P . [5]

Budući da je u ovom mjerenju PHYWE teslametrom broj ponovljenih mjerenja manji od 30, te je razlučivost mala, razdioba učestalosti pojedinih očitavanja biti će prikazana na drugačiji način (Sl. 3.3.).



Sl. 3.3. Primjer razdiobe gdje je broj očitavanja manji od 30 uz malu razlučivost.[5]

f_i – Učestalost pojedinog očitavanja

f_r – Relativna učestalost

N – Broj ponovljenih mjerenja

Takav način mjerenja u kojem se pojavljuje više sličnih ili istih vrijednosti omogućuje nam da odredimo aritmetičku sredinu odnosno srednju vrijednost i standardno odstupanje. Aritmetička sredina očitavanja je najbolja procjena tj. najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine. Ona se računa prema sljedećem izrazu: [5]

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3-1)$$

\bar{x} – Aritmetička sredina

x – Očitana vrijednost

n – Broj očitanih vrijednosti

Standardno odstupanje pojedinačnih rezultata mjerenja čini mjeru raspršenosti očitavanja nekog mjerenja odnosno mjeru nepreciznosti. Računa se sljedećom formulom: [5]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-2)$$

s – Standardno odstupanje

n – Broj ponovljenih mjerenja

\sum - Suma

x – Očitana vrijednost

\bar{x} – Aritmetička sredina

Nakon izračunatog standardnog odstupanja možemo dobiti konačnu vrijednost standardne nesigurnosti A tipa tako da dobiveno standardno odstupanje podijelimo s brojem ponovljenih mjerenja pod korjenom. [5]

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3-3)$$

u_A – Standardna nesigurnost A tipa

s – Standardno odstupanje

n – Broj ponovljenih mjerenja

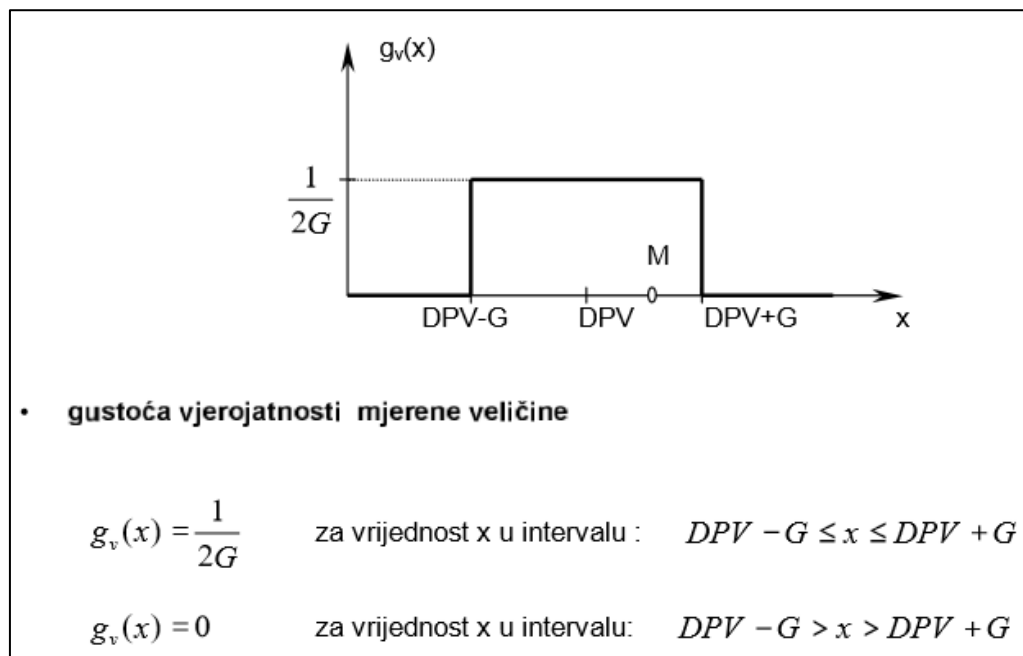
3.3. Određivanje standardne nesigurnosti B tipa

Određivanje standardne nesigurnosti B tipa temelji se na:

1. Specifikacijama mjerne opreme
2. Podacima o umjeravanju mjerila
3. Podacima o ponovljivosti i obnovljivosti mjernog postupka
4. Podacima o ranije provedenim sličnim mjerenjima
5. Iskustvu i znanju o svojstvima relativnih mjerila i mjernih objekata

6. Nesigurnosti podataka iz priručnika i drugih izvora, koji su korišteni pri računanju mjernog rezultata
7. Raznim drugim informacijama o zaokruživanju, razlučivosti, histerezi, kvantizaciji, itd.
8. Procjeni nesigurnosti ispravaka

U tehničkim podacima mjerila navedene su točnosti, odnosno granične pogreške. Granična pogreška je najveća dopuštena pogreška koju mjerilo može imati, uz uvjet pravilne uporabe, da se još smatra ispravnim. Granične pogreške mjerila ne mogu sadržavati informaciju o stvarnoj vrijednosti pogreške. Zbog toga se pretpostavlja da su sve vrijednosti mjerene veličine unutar raspona koji omeđuje granice $DPV - G$, $DPV + G$ jednako vjerovatne, a izvan tih granica nemoguće. Takav oblik razdiobe naziva se pravokutna razdioba. Graf pravokutne razdiobe prikazuje se ovako: [6]



Sl. 3.4. Prikaz pravokutne razdiobe i njezinih matematičkih svojstava [6]

$g_v(x)$ – Gustoća učestalosti varijable x

DPV – Dogovorena prava vrijednost

G – Granična pogreška

M – Najbolja procjena mjerene veličine

Iz tehničkih podataka za PHYWE teslametar vidljivo je da su granične pogreške iskazane postotkom $G\%$. Budući da će standardna nesigurnost A tipa u ovom mjerenju biti izračunata kao apsolutna vrijednost, zadanu graničnu pogrešku koja je iskazana postotkom treba preračunati u graničnu pogrešku apsolutne vrijednosti. Time se postiže da standardna nesigurnost B tipa bude iskazana u apsolutnoj vrijednosti isto kao što je iskazana i standardna nesigurnost A tipa, što je nužno za daljnje izračunavanje mjerne nesigurnosti. Preračunavanje postotne granične pogreške $G\%$ u apsolutnu graničnu pogrešku G_a radi se tako, da se postotna granična pogreška podijeli sa 100% i pomnoži s aritmetičkom vrijednosti \bar{x} .

$$G_a = \frac{G\%}{100\%} * \bar{x} \quad (3-4)$$

Nakon što je postotna vrijednost preračunata u apsolutnu, može se izračunati standardno odstupanje koje je jednako standardnoj nesigurnosti B tipa. Standardno odstupanje odnosno standardna nesigurnost B tipa računa se tako, da se granična pogreška podijeli s brojem ponavljanja mjerenja pod korjenom. [5]

$$s = u_B = \frac{G}{\sqrt{3}} \quad (3-5)$$

s – Standardno odstupanje

u_B – Standardna nesigurnost B tipa

G – Granična pogreška

Na taj način se procjenjuje nesigurnost ako su na raspolaganju podaci o:

1. Graničnim pogreškama (granicama pogrešaka) mjerila ili izravno mjerene veličine
2. Sigurnim graničnim pogreškama posredno mjerene veličine
3. Statističkim graničnim pogreškama posredno mjerene veličine
4. Podacima o histerezi mjerila, razlučivosti, kvantizaciji i zaokruživanju [5]

Konačna mjerna nesigurnost računa se kao zbroj kvadrata A i B standardne nesigurnosti pod korjenom. [5]

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3-6)$$

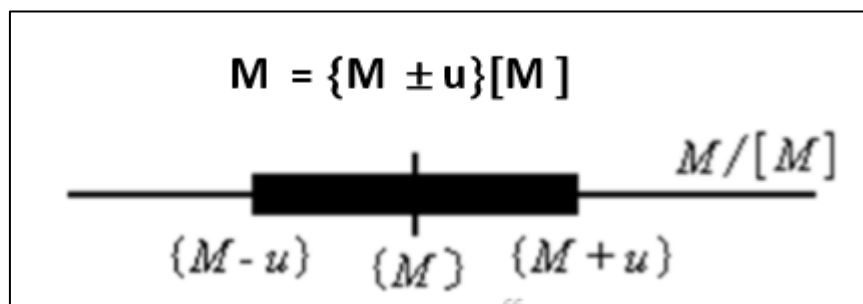
u – Ukupna mjerna nesigurnost

u_A – Standardna nesigurnost A tipa

u_B – Standardna nesigurnost B tipa

3.4. Iskazivanje mjernog rezultata

Mjerni rezultat je konačna vrijednost procesa mjerenja. Iskazuje se procjenom mjerene veličine i mjerne nesigurnosti. Postoje tri razine kojima se iskazuje mjerni rezultat: visoka, srednja i niska razina. Razine se međusobno razlikuju po svojoj namjeni. U ovom radu koristiti će se srednja (S) razina, budući da je ona namijenjena za iskazivanja mjernog rezultata u stručnim radovima. Mjerni rezultat srednje razine sadrži izmjerenu vrijednost $\{M\}$, mjernu nesigurnost $\{u\}$ i mjernu jedinicu $[M]$. [5]

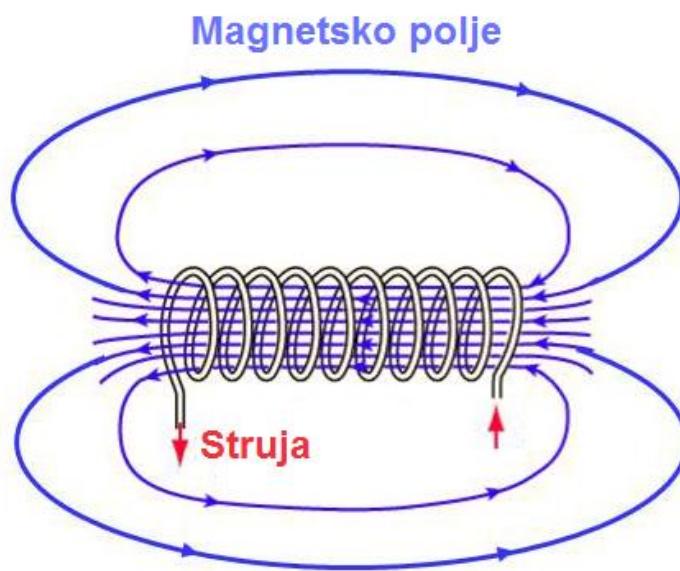


Sl.3.5. Cjelovit mjerni rezultat

4. PROVOĐENJE MJERENJA

4.1. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4

Za mjerenje je korišteno: instrument PHYWE teslametar, aksijalna sonda, četiri bakrene zavojnice različitih karakteristika, istosmjerni i izmjenični naponski izvor. Mjerno područje teslametra podešeno je na 20 mT. Preklopka je prebačena na mjerenje istosmjernog magnetskog polja. Vijkom za podešavanje i potencijometrom instrument je nulovan. Istosmjerni naponski izvor napaja zavojnicu L1 s 0,5 V i 1,5 A. Prolaskom istosmjerne struje kroz zavojnicu javlja se istosmjerno magnetsko polje. Smjer silnica magnetskog polja zavojnice prikazan je na sljedećoj slici:



Sl. 4.1. Magnetsko polje zavojnice kojom prolazi struja.



Sl. 4.2. Zavojnica L1

Aksijalna sonda postavljena je unutar sredine zavojnice jer je unutar zavojnice najveća magnetska indukcija. Na zaslonu teslametra prikazana je vrijednost magnetske indukcije. Mjerenje je ponovljeno 10 puta, te su podaci i vrijednosti sastavljeni u tablicu. Osim mjerenja magnetske indukcije zavojnice L1, mjerene su i zavojnice L2, L3 i L4.



Sl. 4.3. Zavojnica L2



Sl. 4.4. Zavojnica L3



Sl. 4.5. Zavojnica L4

Tab. 4.1. Parametri zavojnica L1, L2, L3 i L4

	Zavojnica L1	Zavojnica L2	Zavojnica L3	Zavojnica L4
Broj zavoja N	250	160	125	100
Dužina zavojnice l [mm]	160	250	160	125
Promjer zavojnice d [mm]	16	32	25	25

Tab. 4.2. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 pri istosmjernoj struji

Redni broj mjerenja	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
1.	2,81	3,03	1,54	2,41
2.	2,82	3,02	1,53	2,39
3.	2,83	3,05	1,54	2,36
4.	2,82	3	1,57	2,37
5.	2,8	2,99	1,55	2,33
6.	2,81	3,04	1,52	2,37
7.	2,81	2,98	1,51	2,38
8.	2,79	3	1,52	2,34
9.	2,77	3,02	1,53	2,37
10.	2,78	3,02	1,5	2,34

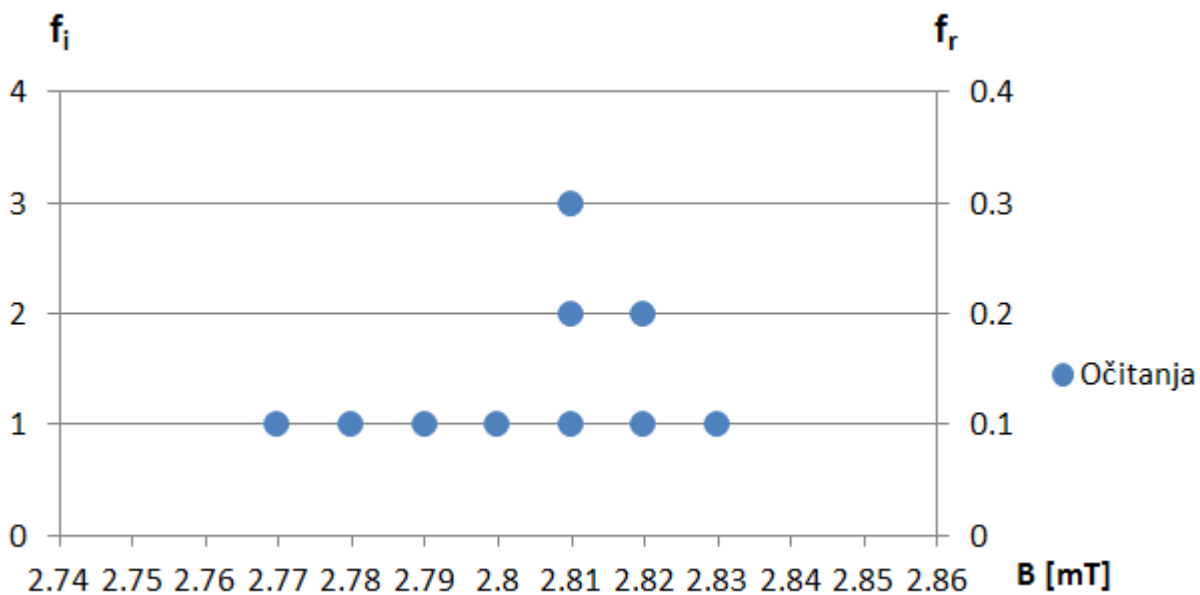
Mjerena je i magnetska indukcija svih zavojnica pri izmjeničnoj struji od 1,5 A. Preklopka je prebačena na mjerenje izmjeničnog magnetskog polja. Mjerno područje ostaje isto (20 mT). Instrument se automatski nuluje i spreman je za korištenje. Princip mjerenja je isti kao i pri mjerenju istosmjernih magnetskih polja, sonda je postavljena unutar zavojnice i mjeri magnetsku indukciju. Mjerenje je ponovljeno 10 puta, te su podaci i vrijednosti sastavljeni u tablicu.

Tab. 4.3. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 pri izmjeničnoj struji

Redni broj mjerenja	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
1.	2,72	2,92	1,51	2,38
2.	2,73	2,93	1,51	2,36
3.	2,71	2,91	1,53	2,36
4.	2,73	2,9	1,54	2,35
5.	2,7	2,87	1,49	2,38
6.	2,74	2,9	1,48	2,4
7.	2,76	2,89	1,49	2,37
8.	2,72	2,86	1,51	2,4
9.	2,74	2,85	1,52	2,38
10.	2,75	2,89	1,51	2,41

4.2. Procjena pogreške mjerenja istosmjernog magnetskog polja zavojnica L1, L2, L3 i L4

Računa se procjena pogreške za zavojnicu L1. Očitavanja od 10 ponovljenih mjerenja mogu se prikazati dijagramom (Sl.4.6.)



Sl. 4.6. Dijagram očitavanja mjerene magnetske indukcije zavojnice L1 pri istosmjernoj struji

f_i – Učestalost pojedinog očitavanja

f_r – Relativna učestalost

B – Magnetska indukcija

Iz 10 ponovljenih mjerenja za zavojnicu L1 koja su zabilježena u tablici (4.2.) izračunata je aritmetička sredina:

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7 + B_8 + B_9 + B_{10}}{n} \\ &= \frac{2,81 + 2,82 + 2,83 + 2,82 + 2,8 + 2,81 + 2,81 + 2,79 + 2,77 + 2,78}{10} \\ &= 2,804 \text{ mT}\end{aligned}$$

\bar{B} – Aritmetička sredina magnetske indukcije

B – Očitana vrijednost magnetske indukcije

N – Broj ponavljanja mjerenja

Izračunato je standardno odstupanje odstupanje:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B})^2} = \sqrt{\frac{1}{10-1} * 0,00324} = 0,019$$

s – Standardno odstupanje

n – Broj ponovljenih mjerenja

B – Očitana vrijednost magnetske indukcije

\bar{B} – Aritmetička sredina magnetske indukcije

Nakon standardnog odstupanja izračunata je standardna nesigurnost A tipa:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,019}{\sqrt{10}} = 0,006$$

Iz tehničkih podataka u tablici (Tab. 2.1.) vidljivo je da točnost za mjerenje istosmjernog magnetskog polja iznosi $\pm 2\%$. Granična pogreška je iskazana u apsolutnoj vrijednosti:

$$G_a = \frac{G_{\%}}{100\%} * \bar{B} = \frac{2\%}{100\%} * 2,804 = \pm 0,056 \text{ mT}$$

G_a – Apsolutna granična pogreška

$G_{\%}$ - Postotna granična pogreška

\bar{B} – Aritmetička sredina magnetske indukcije

Zatim je izračunata standardna nesigurnost B tipa:

$$u_B = \frac{G}{\sqrt{3}} = \frac{0,056}{\sqrt{3}} = 0,032$$

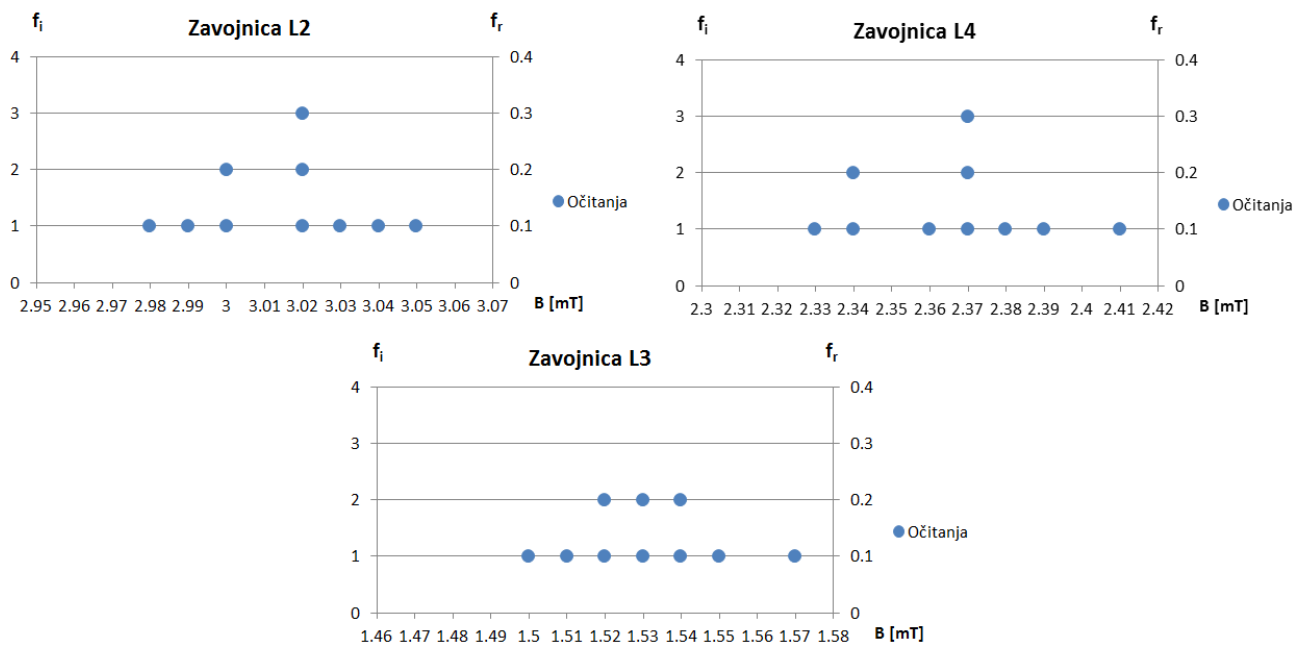
Nakon dobivenih vrijednosti standardne nesigurnosti A i B tipa, izračunava se mjerna nesigurnost:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,006^2 + 0,032^2} = 0,033 \text{ mT}$$

Na temelju izmjerene magnetske indukcije i izračunate mjerne nesigurnosti iskazan je mjerni rezultat na S razini:

$$B = (2,804 \pm 0,033) \text{ mT}$$

Procjena pogreške zavojnica L2, L3 i L4 dobivena je na isti način kao i kod zavojnice L1. Sastavljeni su dijagrami očitavanja, a izračunati parametri mjernog rezultata uvršteni su u tablicu.



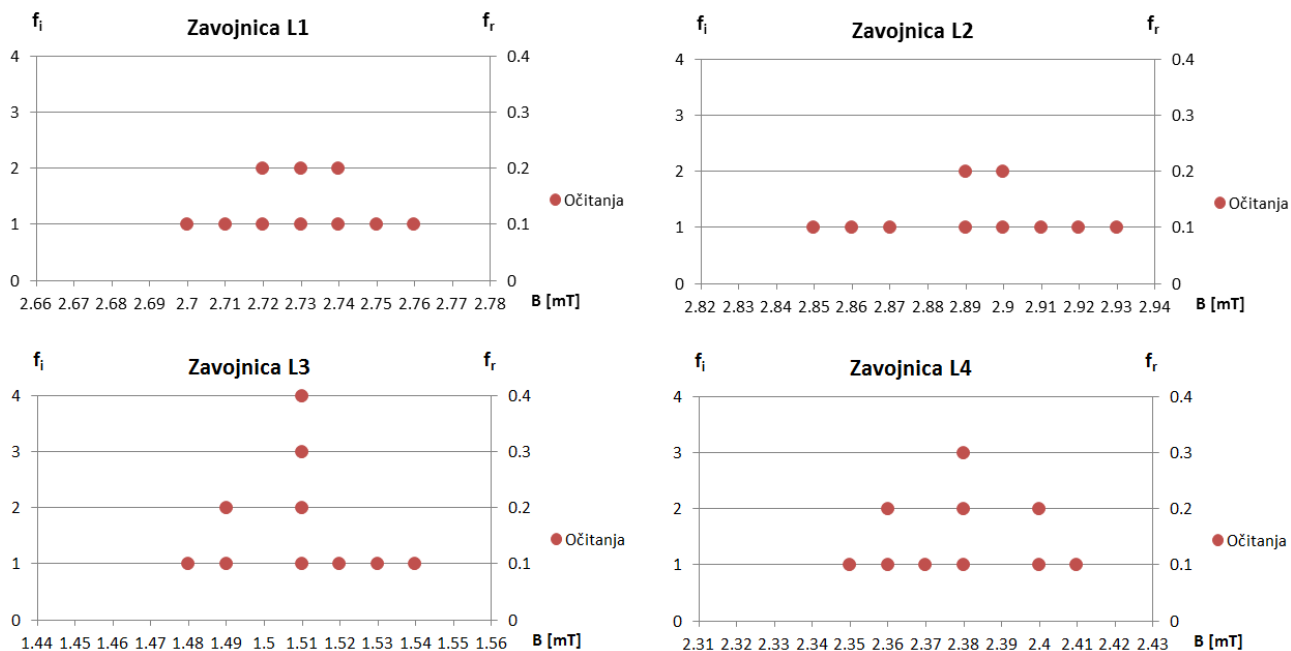
Sl. 4.7. Dijagrami očitavanja mjerene magnetske indukcije zavojnica L2, L3 i L4 pri istosmjernoj struji

Tab. 4.4. Procjena pogreške mjerenja magnetske indukcije zavojnica L2, L3 i L4 pri istosmjernoj struji

	L2	L3	L4
\bar{B} [mT]	3,015	1,531	2,366
s [mT]	0,022	0,02	0,025
u_a [mT]	0,007	0,0064	0,008
G_a [mT]	0,0603	0,031	0,047
u_b [mT]	0,035	0,018	0,027
u [mT]	0,036	0,019	0,028
B [mT]	$(3,015 \pm 0,036)$	$(1,531 \pm 0,019)$	$(2,366 \pm 0,028)$

4.3. Procjena pogreške mjerenja izmjeničnog magnetskog polja zavojnica L1, L2, L3 i L4

Iz tablice (Tab. 4.3.) uzete su vrijednosti za izračun mjernog rezultata i prikaz dijagrama očitavanja.



Sl. 4.8. Dijagrami očitavanja mjerene magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 pri izmjeničnoj struji

Tab. 4.5. Procjena pogreške mjerenja magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 pri izmjeničnoj struji

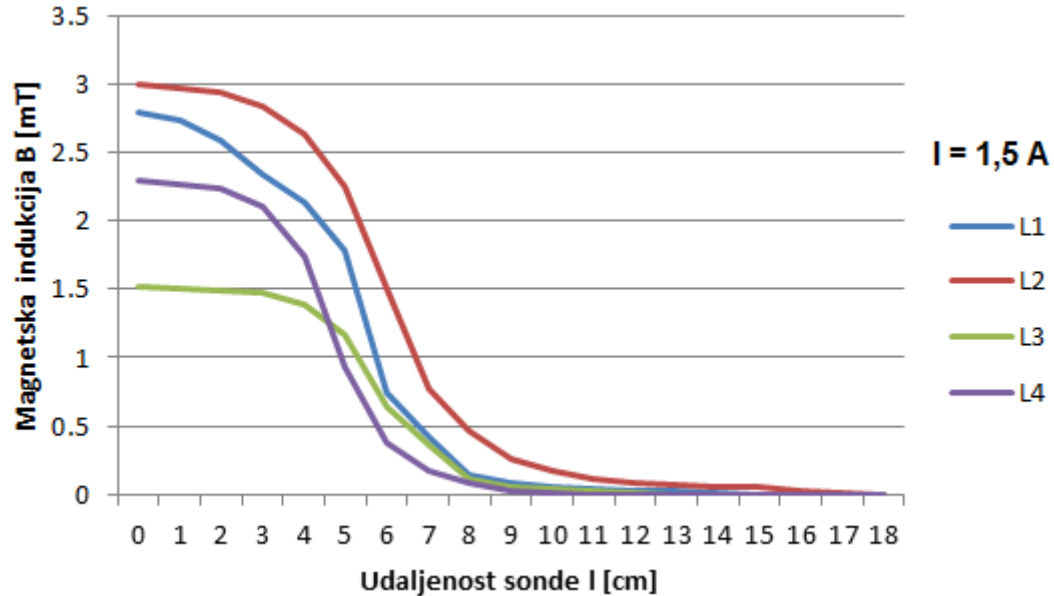
	L1	L2	L3	L4
\bar{B} [mT]	2,73	2,892	1,509	2,379
s [mT]	0,018	0,026	0,019	0,02
u_a [mT]	0,0057	0,0082	0,006	0,0063
G_a [mT]	0,546	0,058	0,03	0,048
u_b [mT]	0,032	0,033	0,017	0,028
u [mT]	0,033	0,034	0,018	0,029
B [mT]	$(2,73 \pm 0,033)$	$(2,892 \pm 0,034)$	$(1,509 \pm 0,018)$	$(2,379 \pm 0,029)$

4.4. Mjerenje magnetske indukcije zavojnica L1, L2, L3 i L4 s obzirom na udaljenost sonde

Aksijalnom sondom mjerena je unutrašnjost zavojnice. Nakon svakog očitavanja, sonda je pomaknuta za 1 cm od sredine unutrašnjosti zavojnice.

Tab. 4.6. Mjerenje magnetskih polja unutar zavojnica L1, L2, L3 i L4 s obzirom na udaljenost sonde

Udaljenost sonde od sredine unutrašnjosti zavojnice l [cm]	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
0	2,79	3	1,52	2,3
1	2,73	2,97	1,5	2,27
2	2,59	2,93	1,49	2,24
3	2,34	2,83	1,47	2,1
4	2,14	2,63	1,38	1,74
5	1,78	2,25	1,17	0,93
6	0,75	1,51	0,64	0,38
7	0,42	0,77	0,36	0,18
8	0,15	0,47	0,12	0,08
9	0,09	0,26	0,06	0,02
10	0,06	0,17	0,04	0,01
11	0,04	0,12	0,02	0
12	0,03	0,09	0,01	0
13	0,02	0,07	0	0
14	0,01	0,06	0	0
15	0	0,05	0	0
16	0	0,03	0	0
17	0	0,01	0	0
18	0	0	0	0

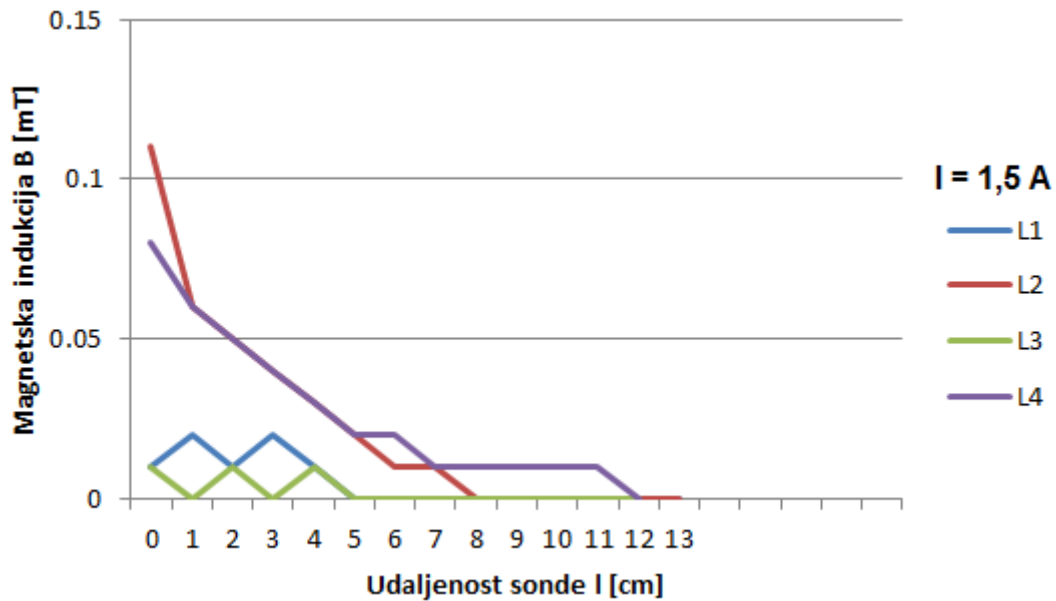


Sl. 4.9. Dijagram mjereno magnetskog polja unutar zavojnica s obzirom na udaljenost sonde

Osim mjerenja unutrašnjosti zavojnice, mjereno je i magnetsko polje oko zavojnice. Magnetsko polje oko zavojnice mjereno je tangencijalnom sondom.

Tab. 4.7. Mjerenje magnetskog polja oko zavojnica L1, L2, L3 i L4 s obzirom na udaljenost sonde

Udaljenost sonde od sredine zavojnice l [cm]	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
0	0,01	0,11	0,01	0,08
1	0,02	0,06	0	0,06
2	0,01	0,05	0,01	0,05
3	0,02	0,04	0	0,04
4	0,01	0,03	0,01	0,03
5	0	0,02	0	0,02
6	0	0,01	0	0,02
7	0	0,01	0	0,01
8	0	0	0	0,01
9	0	0	0	0,01
10	0	0	0	0,01
11	0	0	0	0,01
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0



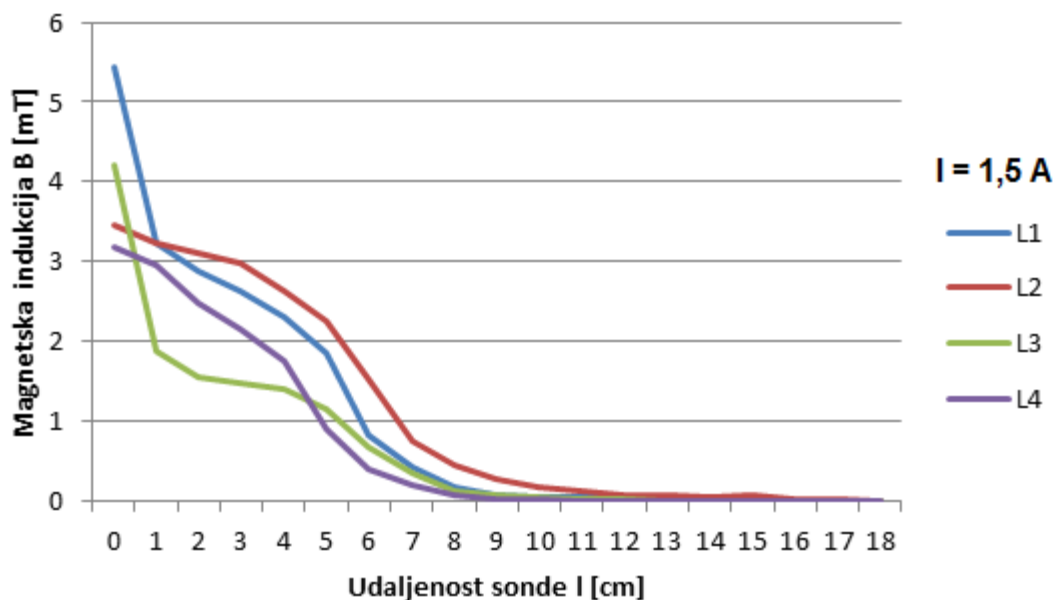
Sl. 4.10. Dijagram mjerenja magnetskog polja oko zavojnica s obzirom na udaljenost sonde

Mjerenja unutar i oko zavojnice su ponovljena s tim da je u svaku zavojnicu umetnuta željezna jezgra valjkastog oblika duljine 7,7 mm i promjera 8 cm.

Tab. 4.8. Mjerenje magnetskih polja unutar zavojnica L1, L2, L3 i L4 s željeznom jezgrom s obzirom na udaljenost sonde

Udaljenost sonde od sredine unutrašnjosti zavojnice l [cm]	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
0	5.43	3.46	4.22	3.18
1	3.24	3.23	1.88	2.96
2	2.89	3.11	1.56	2.49
3	2.64	2.97	1.48	2.14
4	2.3	2.63	1.39	1.75
5	1.85	2.26	1.16	0.9
6	0.82	1.52	0.68	0.41
7	0.43	0.76	0.35	0.19
8	0.16	0.46	0.12	0.08
9	0.08	0.27	0.06	0.03
10	0.05	0.17	0.05	0.01
11	0.04	0.12	0.02	0

12	0.04	0.08	0.01	0
13	0.02	0.07	0	0
14	0.01	0.05	0	0
15	0	0.06	0	0
16	0	0.03	0	0
17	0	0.01	0	0
18	0	0	0	0

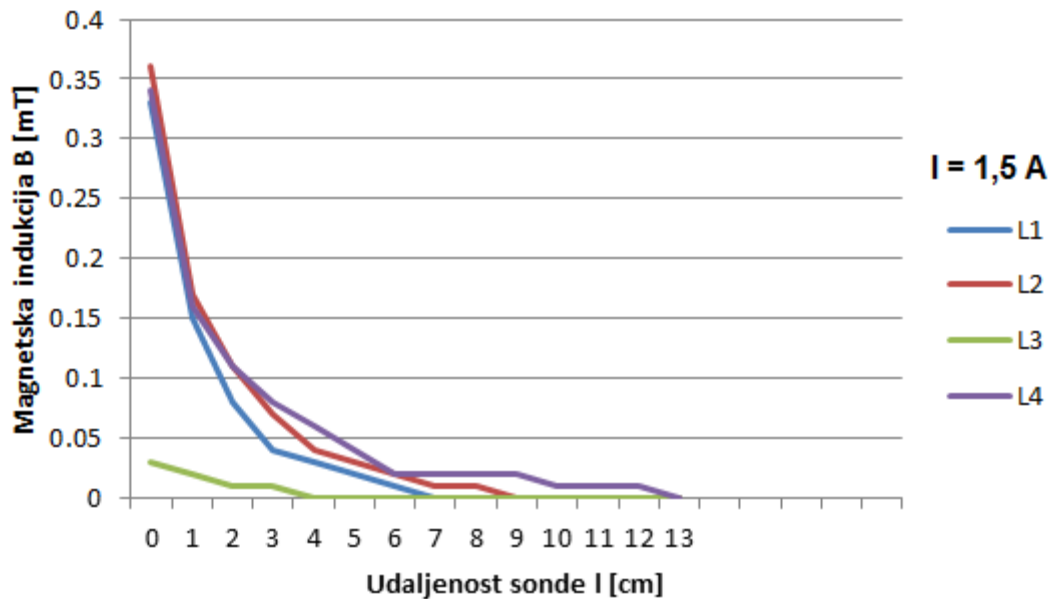


Sl. 4.11. Dijagram mjerenog magnetskog polja unutar zavojnica s željeznom jezgrom s obzirom na udaljenost sonde

Tab. 4.9. Mjerenje magnetskog polja oko zavojnica L1, L2, L3 i L4 s željeznom jezgrom s obzirom na udaljenost sonde

Udaljenost sonde od sredine zavojnice l [cm]	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L1	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L2	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L3	Magnetska indukcija B [mT] zavojnice L4
0	0.33	0.36	0.03	0.34
1	0.15	0.17	0.02	0.16
2	0.08	0.11	0.01	0.11
3	0.04	0.07	0.01	0.08
4	0.03	0.04	0	0.06
5	0.02	0.03	0	0.04
6	0.01	0.02	0	0.02
7	0	0.01	0	0.02

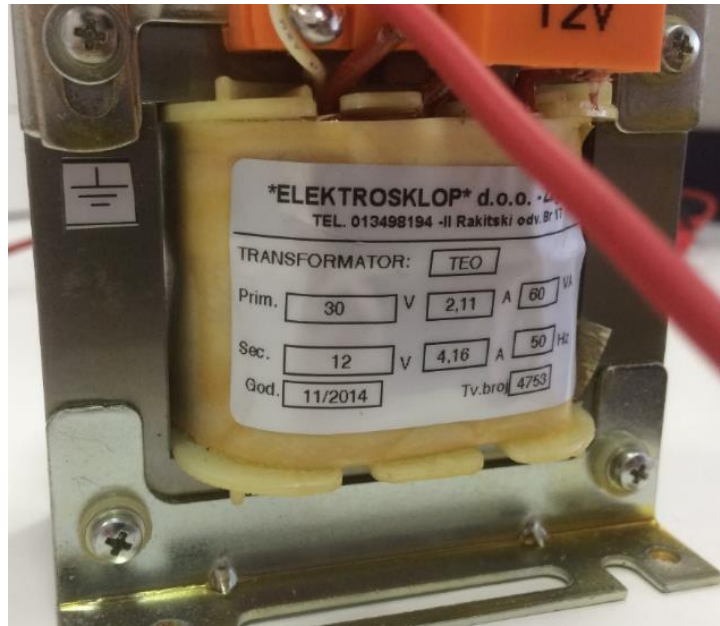
8	0	0.01	0	0.02
9	0	0	0	0.02
10	0	0	0	0.01
11	0	0	0	0.01
12	0	0	0	0.01
13	0	0	0	0



Sl. 4.12. Dijagram mjerenja magnetskog polja oko zavojnica s željeznom jezgrom s obzirom na udaljenost sonde

4.5. Mjerenje gubitaka rasipanja transformatora

Gubici rasipanja transformatora jesu dio magnetskog polja koji ne ulazi u jezgru transformatora nego se izgubi u okolnom zraku. Mjerenje je obavljeno na jednofaznom transformatoru koji ima sljedeće parametre:



Sl. 4.13. Parametri transformatora

Na primar transformatora iz izmjeničnog naponskog izvora doveden je napon od 30V. Najveći gubici rasipanja izmjereni su s gornje strane transformatora i iznose oko 0,47 mT. Manji gubici izmjereni su s bočnih strana transformatora i iznose oko 0,3 mT.

4.6. Mjerenje gubitaka rasipanja motora

Mjereno je magnetsko polje izvan kućišta izmjeničnog motora koji ima sljedeće nazivne podatke:



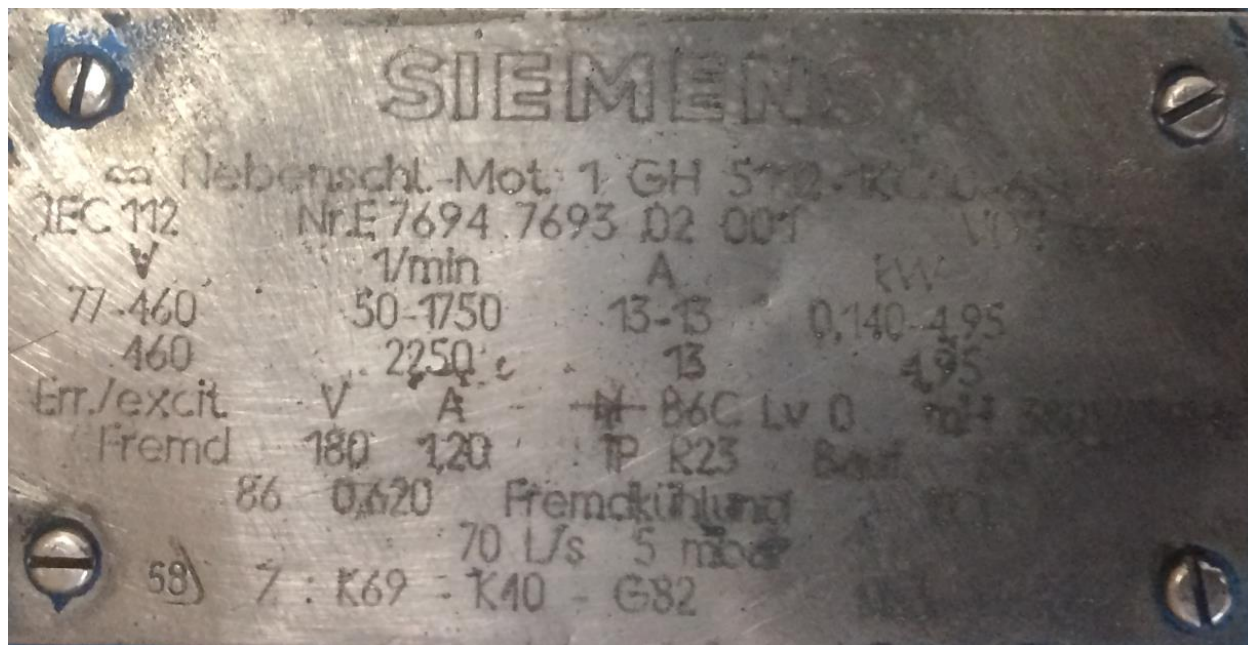
Sl. 4.14. Natpisna pločica izmjeničnog motora

Budući da se radi o izmjeničnom motoru, preklopka na teslametru prebačena je na mjerenje izmjeničnog magnetskog polja. Najveće vrijednosti magnetske indukcije dobivene su mjerenjem tangencijalnom sondom gdje je drška sonde paralelno postavljena u odnosu na osovinu motora, kao što je prikazano na sljedećoj slici:



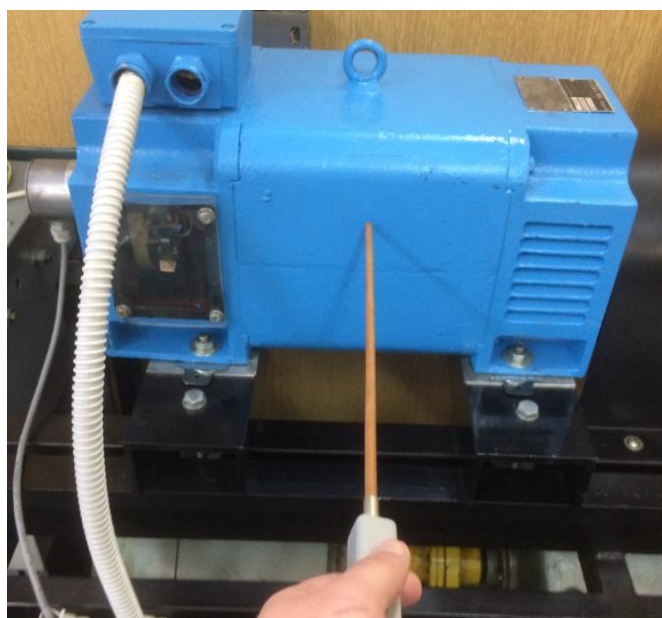
Sl. 4.15. Mjerenje magnetske indukcije izmjeničnog motora

Izmjerena je vrijednost od 2,21 mT. Mjerenjem tangencijalnom sondom postavljenom tako da drška bude okomita na osovinu motora dobivene su manje vrijednosti (oko 0,5 mT). Udaljavanjem sonde od motora, vrijednost magnetske indukcije se smanjuje. Mjereno je i magnetsko polje izvna kućišta istosmjernog motora koji ima sljedeće parametre (Sl. 4.16.).



Sl. 4.16. Natpisna pločica istosmjernog motora

Preklopka teslametra prebačena je na mjerenje istosmjernog magnetskog polja. Magnetsko polje izvan kućišta motora mjereno je aksijalnom sondom. Najveći iznos magnetske indukcije dobiven je tako da sonda bude okomito postavljena s obzirom na osovinu motora.

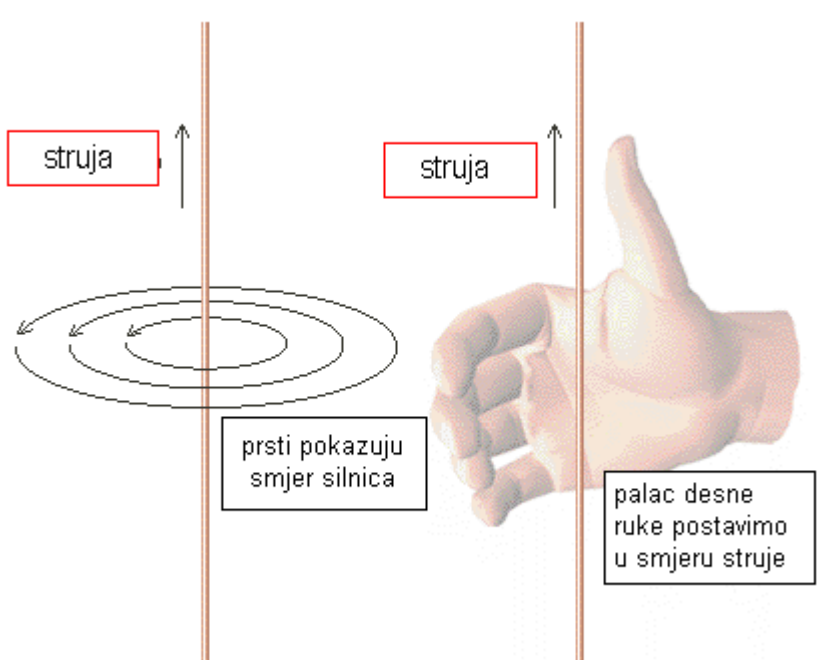


Sl. 4.17. Mjerenje magnetske indukcije istosmjernog motora

Izmjerena je vrijednost od 1,07 mT. Postavljanjem aksijalne sonde tako da drška bude paralelna s obzirom na os osovine motora dobije se manja vrijednost magnetske indukcije koja iznosi oko 0,40 mT.

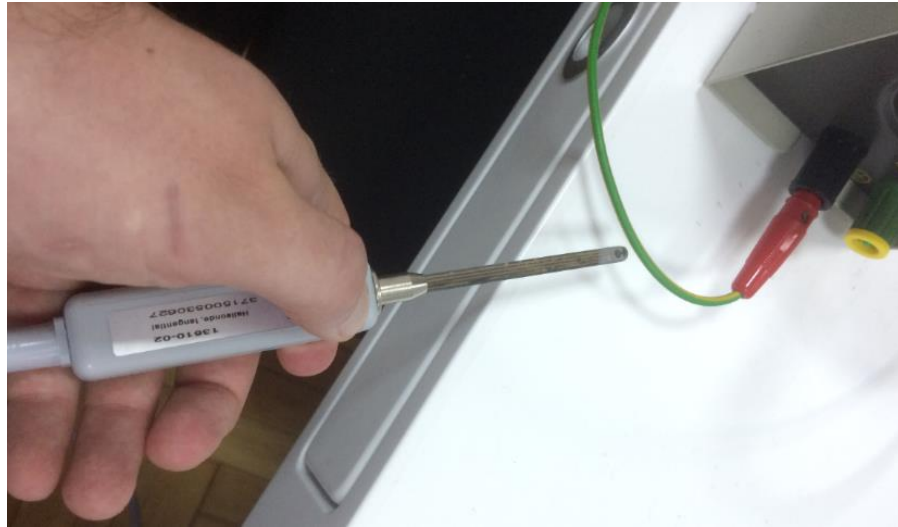
4.7. Mjerenje magnetskog polja vodiča

Za mjerenje je korišten izmjenični naponski izvor, otpornik i vodiči. Kroz izmjenični naponski izvor pušten je napon od 50 V u strujni krug. U strujnom krugu postavljen je otpornik od 50 Ω kako bi vodičima prolazila željena struja od 1 A. Prolaskom struje kroz vodič javlja se magnetsko polje kao što je prikazano na slici ispod:



Sl. 4.18. Magnetsko polje ravnog vodiča kojim protječe struja

Magnetsko polje mjereno je tangencijalnom sondom. Budući da je struja kroz vodič vrlo mala, izmjerena vrijednost teslametrom iznosi samo 0.01 mT.



Sl. 4.19. Mjerenje magnetskog polja vodiča

5. ZAKLJUČAK

Teslametar je instrument koji služi za mjerenje gustoće magnetskog toka odnosno magnetske indukcije. Način rada teslametra temelji se na hallovom efektu, a uređaj koji omogućuje njegov nastanak jest hallov pretvarač. Uz instrument dostupne su dvije hallove sonde, a to su aksijalna i tangencijalna od kojih je barem jedna nužna kako bi se mogla koristiti kao senzor za mjerenje. Prije početka uporabe PHYWE teslametra nužno je pročitati sigurnosne mjere opreza kako ne bi naštetili instrumentu ili kako ne bi došlo do ozlijede korisnika. Mjerna nesigurnost može se definirati kao iskaz o kvaliteti rezultata mjerenja ili procjena raspona vrijednosti unutar kojega realno očekujemo da leži prava vrijednost mjerene veličine. Postoje dvije kategorije od kojih se grupiraju komponente mjerne nesigurnosti, a to su standardna nesigurnost A tipa i standardna nesigurnost B tipa. Nakon procjene mjerne veličine i izračunate mjerne nesigurnosti, može se iskazati mjerni rezultat. Mjerni rezultat je konačna vrijednost procesa mjerenja. Mjerena je magnetska indukcija zavojnica L1, L2, L3 i L4. Dužina, promjer, broj zavoja zavojnice i jakost struje koja njome protječe utjecat će na intenzitet magnetske indukcije. Ubacivanjem željezne jezgre u zavojnicu povećava se intenzitet magnetske indukcije. Kada bi željezna jezgra bila duža i većeg promjera nego kao što je jezgra koja je korištena u ovom mjerenju, magnetska indukcija zavojnice bi se znatno povećala. Mjerenjem magnetskog polja unutar zavojnice dobivene su znatno veće vrijednosti magnetske indukcije nego mjerenjem magnetskog polja oko zavojnice. Udaljavanjem sonde od zavojnice vrijednost magnetske indukcije se smanjuje. Mjerena su istosmjerna i izmjenična magnetska polja zavojnica kojima je u oba slučaja puštena jednaka struja iz naponskog izvora. Dobivene vrijednosti su podjednake, jer PHYWE teslametar ima jednaku točnost mjerenja u oba slučaja. Pri mjerenju gubitaka rasipanja motora, mogla se izmjeriti i magnetska indukcija namota motora. Pri takvom postupku morao bi se rastaviti motor, kako bi se sondama moglo doći do samog namota motora.

LITERATURA

[1] PHYWE excellence in science

<https://www.phywe.com/en/teslameter-digital.html> [Pristupljeno: 4.8.2017]

[2] OMEGA Engineering, INC.

<https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M3685.pdf> [Pristupljeno: 7.8.2017]

[3] Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect [Pristupljeno: 15.8.2017]

[4] How to mechatronics

<http://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/hall-effect-hall-effect-sensors-work/> [Pristupljeno: 26.8.2017]

[5] D. Dorić, Mjerenja u elektrotehnici stručni studij – predavanja, Osijek, 6.3.2017.

[6] Osnove mjerenja – skripta – Studentski.hr

<http://studentski.hr/system/materials/p/b07c2896be5344e4fd573f3a0993837e0bf7314e.zip?1439380802> [Pristupljeno: 27.8.2017]

SAŽETAK

Problem završnog rada je objasniti što je teslametar, koja je njegova funkcija i kako se njime rukuje. Treba objasniti što su pogreške mjerenja i kako one utječu na mjerni rezultat. Navesti formule i statističke metode potrebne za određivanje mjernog rezultata. Iskoristiti sve funkcije kojima instrument raspolaže pri izvođenju raznih mjerenja. Usporediti dobivene vrijednosti mjerenja i izvesti određene zaključke. Rješavanje problema temelji se na korištenju raznovrsnih literatura koje daju teorijska znanja o teslametru i procjeni njegovih pogrešaka. Praktični dio problema rješavan je provođenjem mjerenja i uspoređivanjem istih. Rezultat završnog rada je: stečeno znanje o instrumentu PHYWE teslametar, razumijevanje ponašanja elektromagnetskih polja u okolini, shvaćanje postupka računanja mjerne nesigurnosti i iskazivanja mjernog rezultata.

Ključne riječi: Teslametar, magnetska indukcija, procjena pogreške mjerenja, magnetsko polje.

ABSTRACT

The problem of final work is to explain what is teslameter, what is its function and how to handle it. It should be explained what are measurement errors and how they affect measurement result. Adduce formulas and statistic methods needed for determination of measurement result. Use all the instrument functions while doing various measurements. Compare the obtained measurement values and make certain conclusions. Solving problems is based on the use of a variety of literature that provides theoretical knowledge of the teslameter and its error estimation. Practical part of the problem is solved by conducting measurements and then comparing them. Result of the final work is: acquired knowledge of the PHYWE teslameter instrument, understanding the behavior of electromagnetic fields in the environment, understanding the procedure of calculating the measurement uncertainty and finally displaying the measurement result.

Keywords: Teslameter, magnetic induction, measurement error estimation, magnetic field.

ŽIVOTOPIS

Mario Vrhovac rođen je 29.2.1996. godine u Osijeku. Nakon završetka osnovne škole Vladimir Nator u Đakovu, upisuje srednju strukovnu školu Braće Radić u Đakovu, smjer: ekonomist. Nakon završetka srednje škole upisuje preddiplomski stručni studij elektroenergetike na fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.