

Mjerenje struje Rogovskim svitkom

Đorđić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:763165>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

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



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

Stručni studij

Mjerenje struje Rogovskim svitkom

Završni rad

Ivan Đorđić

Osijek, 2023.

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

Osijek, 16.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

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

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Đorđić
Studij, smjer:	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	A 4638, 27.07.2020.
OIB Pristupnika:	05275472246
Mentor:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	dr. sc. Krešimir Miklošević
Član Povjerenstva 1:	Doc. dr. sc. Venco Ćorluka
Član Povjerenstva 2:	doc. dr. sc. Goran Rozing
Naslov završnog rada:	Mjerenje struje Rogowskim svitkom
Znanstvena grana završnog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada	
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	16.09.2023.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 27.09.2023.

**Ime
prezime
studenta:**i
Ivan Đorđić**Studij:**

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br.
studenta,
godina
upisa:**

A 4638, 27.07.2020.

**Turnitin
podudaranje
[%]:**

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje struje Rogovskim svitkom**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Venco Ćorluka

i sumentora ,

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. ELEKTRIČNA STRUJA	2
2.1. Pojam električne struje.....	2
3. METODE MJERENJA IZMJENIČNE STRUJE	6
3.1. Voltmetar sa suotpornikom (eng. Shunt-om)	6
3.2. Strujni transformator	9
3.3. Strujni transformator s Hallovom sondom.....	13
3.4. Strujni termopretvornik.....	18
3.5. Magnetooptički osjetnik	21
4. ROGOWSKI SVITAK	24
4.1. Princip rada Rogovskijevog svitka	25
4.2. Primjena Rogovskijevog svitka.....	28
4.3. Izvedbe Rogovskijevog svitka	31
5. ANALIZA MJERENJA STRUJE ROGOWSKIJEVIM SVITKOM I STRUJNIM KLIJEŠTIMA	33
5.1. Uvod u mjerenje	33
5.2. Karakteristike Rogovskijevog svitka (CHAOVIN ARNOUX A100) i strujnih kliješta (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)	34
5.3. Mjerenje struje sa Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100) i sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)	35
5.4. Analiza rezultata mjerenja struje sa Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100) i strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)	40
6. ZAKLJUČAK	43
SAŽETAK	44

ABSTRACT	45
LITERATURA	46
ŽIVOTOPIS.....	48

1. UVOD

U svijetu elektroenergetike, precizno i pouzdano mjerenje je od iznimne važnosti. Na preciznom i pouzdanom mjerenju zasnivaju se različite aktivnosti u elektroenergetici uključujući praćenje opterećenja, otkrivanje kvarova, analizu kvalitete energije te upravljanje energijom. Prva mjerenja struje su bila izrazito izazovna zbog ograničenog poznavanja električne struje, nedostatka standardiziranih mjernih jedinica te nedostatka tehnologije s kojom bi mjerenja bila moguća.

Uobičajeno, mjerenje struje se provodi metodama kao što su strujni transformatori koji često zahtijevaju prekid kruga te mogu biti izazovni za ugradnju. Svi ovi izazovi su naveli znanstvenike da razviju praktičniji i precizniji način mjerenja električne struje. Na taj način je, pojavom novijih tehnologija kao što je Rogowskijev svitak, došlo do revolucije u mjerenju. U prvom poglavlju ovoga rada će se objasniti osnove električne struje, kao što su definicija električne struje, razni mediji kroz koje struja može protjecati te nositelji naboja u tim medijima. Također je opisana i mjerna jedinica za električnu struju, amper, te promjene njezine definicije od njenog nastanka pa sve do danas. U drugom poglavlju su objašnjene razne metode mjerenja izmjenične struje te njihovi principi rada, odnosno efekti električne struje na kojima se bazira njihov rad. U trećem poglavlju je stavljen naglasak na Rogowskijev svitak, odnosno detaljno je opisan njegov princip rada, te zakoni na kojima se temelji njegov rad. Uz princip rada, navedene su i opisane razne primjene Rogowskijevog svitka te i njegove izvedbe. U četvrtom poglavlju je provedena analiza mjerenja struje Rogowskijevim svitkom i strujnim kliještima pri različitim frekvencijama, te su u konačnici svi rezultati detaljno opisani te uspoređeni.

1.1. Zadatak završnog rada

U ovom radu će se razjasniti načini mjerenja i problemi pri mjerenju struje, prednosti i nedostaci mjerenja struje pomoću Rogowskijevog svitka te načini i principi na kojima se zasnivaju mjerenja s Rogowskijevim svitkom. Također će se navesti konkretan primjer mjerenja uz pomoć strujnih kliješta te Rogowskijevog svitka te će se analizirati rezultati mjerenja.

2. ELEKTRIČNA STRUJA

2.1. Pojam električne struje

Električna struja je usmjereno gibanje slobodnih nositelja električnog naboja kroz neki medij. U ovisnosti o mediju kroz koji struja protječe, radi se o različitim nositeljima električnog naboja. odnosno:

- Vodiči, odnosno materijali koji imaju visoku električnu vodljivost, kao što su metali poput bakra, aluminija, srebra. U ovim materijalima, glavni nositelj električnog naboja je elektron.
- Elektroliti, odnosno tvari koje kada se rastope u nekakvom otapalu, kao što je voda, stvaraju elektrolitsku otopinu koja ima svojstvo vođenja električne struje. U ovim otopinama, elektroliti se raspadaju na katione i anione, odnosno pozitivno nabijene ione te negativno nabijene ione. Te dvije čestice čine nositelje električne struje u elektrolitu.
- Poluvodiči, odnosno materijali koji imaju svojstvo da se pri prolasku električne struje ponašaju i kao vodič i kao izolator. Nositelji naboja u poluvodičima su elektroni, te šupljine.
- Plinovi, odnosno tvari poput zraka. Kroz ovakve medije električna struja počinje teći kada dođe do ionizacije plina, odnosno razdvajanja atoma ili molekula plina na pozitivne i negativne ione. Ionizacija se postiže uporabom visokog napona, odnosno jakog električnog polja. Prilikom ionizacije dolazi do nastajanja slobodnih elektrona i pozitivnih iona koji omogućuju protok električne struje.

Električna struja se mjeri u mjernoj jedinici Amper (A), koja je jedna od sedam osnovnih mjernih jedinica međunarodnog SI sustava. Jedan amper predstavlja protok naboja vrijednosti jednog kulona kroz nekakav medij u vremenu od jedne sekunde. Jakost električne struje računa se prema izrazu {1}:

$$I = \frac{q}{t} [A] \quad (2-1)$$

gdje su:

I – jakost električne struje [A]

q – količina električnog naboja [C]

t – vrijeme prolaska naboja kroz nekakav vodič [s]

2.2. Nastajanje mjerne jedinice za struju

Rezolucijom Opće konferencije za mjere i utege (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM), 1960. godine na snagu je stupio Međunarodni sustav jedinica (SI), koji se uspostavio na temelju sedam osnovnih fizikalnih veličina te odgovarajućih mjernih jedinica: duljina (metar), masa (kilogram), vrijeme (sekunda), jakost električne struje (amper), temperatura (kelvin), množina tvari (mol), svjetlosna jakost (kandela), prema [1]. Jedna od sedam osnovnih fizikalnih veličina je jakost električne struje – amper, dok se sve ostale mjerne jedinice u elektromagnetizmu izvode iz osnovnih.

Kao što je ranije spomenuto, amper je osnovna jedinica za definiranje električne struje, te se temelji na elektromagnetskom zakonu zvanom Ampèrov zakon, koji opisuje vezu između struje i magnetskog polja koje ta struja generira. Svoj naziv je dobila prema francuskom znanstveniku André-Marie Ampèreu, koji je bio ključna figura u razumijevanju elektromagnetizma te je proveo brojna istraživanja o elektromagnetizmu.

Prije postojanja SI sustava, postojao je tako zvani Empirički internacionalni amper koji je 1908. g. iz praktičnih razloga bio određen kao jakost struje kojom se elektrolitički sekundno izlučuje 1,11815 mg srebra, prema [1]. Do 2019. g. definicija ampera je glasila: “amper je ona stalna struja koja tekući dvama ravnim, usporednim i neizmjerljivo dugačkim vodičima zanemarivo malog kružnog presjeka, razmaknutim 1 metar u vakuumu, proizvodi među njima silu od 2×10^{-7} njutna po metru duljine” [2]. Sila koju proizvodi jedan amper definirana je izrazom {2}:

$$F'_m = \mu_0 \times \frac{I^2}{2\pi d} \quad (2-2)$$

gdje je:

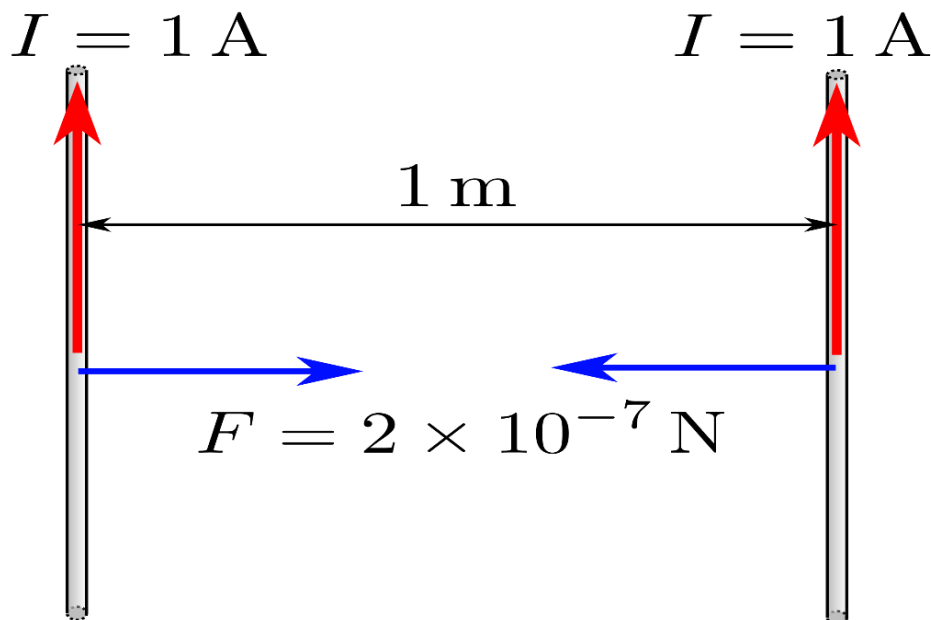
F'_m - ostvarena privlačna magnetska sila [N]

μ_0 – permeabilnost vakuuma, koja iznosi $\approx 4\pi \times 10^{-7}$ [Tm/A]

I – jakost struje [A]

d – razmak između vodiča [m].

Na slici 2.1. je prikazana ilustracija definicije jedinice amper. Prikazana su dva paralelna vodiča neodređene duljine i zanemarivog presjeka koja su međusobno udaljena za 1 m u vakuumu, te koja međusobno djeluju silom od $F = 2 \times 10^{-7}$ N po metru duljine.



Slika 2.1. Slikovni prikaz mjerne jedinice amper [2]

Međunarodni SI sustav je 2019. g. redefinirao mjernu jedinicu kilogram, koja je do tada bila vezana uz fizički objekt. Naime, problem s kilogramom je bio u tome što su prototipi kilograma tijekom vremena na sebe mogli akumulirati mikroskopske nečistoće ili izgubiti atome, što je dovodilo do manjih promjena u masi.

Kako je amper do tada bio definiran silom koja nastaje između dvaju vodiča, te kako je sila definirana preko kilograma koji se s vremenom mijenjao, znanstvenici su htjeli pronaći novi način definiranja ampera.

Tako je 2019. g. amper definiran fiksiranjem elementarnog naboja na vrijednost $e = 1.602176634 \times 10^{-19}C$, te je amper definiran kao električna struja jednaka 10^{19} osnovnih naboja koji se gibaju svakih 1.602176634 sekundi, odnosno gibanje $6.241509074 \times 10^{18}$ elementarnih naboja u jednoj sekundi.

Kao osnovna mjerna jedinica SI sustava, mjerna jedinica za jakost električne struje je po nečemu posebna: za razliku od oma, farada i volta, amper nije moguće pohraniti za kasniju uporabu.

3. METODE MJERENJA IZMJENIČNE STRUJE

Prilikom protjecanja struje kroz nekakav vodljiv materijal, njezino protjecanje se uočava kroz više fizikalnih učinaka, te uz električni učinak, djelovanje struje se opaža i posredstvom njezinih magnetskih i termičkih učinaka. Kako postoji više efekata koji se pojavljuju prilikom protjecanja električne struje, tako je moguće mjeriti jakost električne struje na više načina. Metode za mjerenje izmjenične struje se dijele na tri osnovne skupine (slika 3.1).



Slika 3.1. Podjela metoda za mjerenje izmjenične struje [1]

3.1. Voltmetar sa suotpornikom (eng. Shunt-om)

Jedna od uobičajenih metoda za izravno mjerenje izmjenične struje je voltmetar u kombinaciji sa suotpornikom (eng. Shunt), koji je prikazan na slici 3.2. Za ovakvo mjerenje koristi se voltmetar ili digitalni multimetar koji je spojen preko suotpornika koji mora biti iznimno precizan, te unaprijed određene vrijednosti. Ova metoda mjerenja električne struje se također naziva i mjerenje U-I metodom.

Kako bi ova metoda bila učinkovita, otpor shunta mora biti vrlo nizak kako struja ne bi stvarala značajan pad napona na shuntu. Vrijednosti otpora shunt otpornika se kreću od $100 \mu\Omega$ do nekoliko $100 \text{ m}\Omega$. Shuntovi otpora manjeg od $0,1 \Omega$ namataju se manganinskom trakom, dok se oni većih iznosa namataju manganinskom žicom. Prolaskom struje kroz shunt, na njemu se pojavi napon, koji je proporcionalan struji koja teče kroz njega prema izrazu za Ohmov zakon:

$$U = I \times R, \quad (3-1)$$

gdje je:

U – pad napona na shunt-u [V]

I – struja koja prolazi kroz shunt, odnosno mjerena struja [A]

R – otpor shunta [Ω]



Slika 3.2. Shunt namijenjen za mjerenje struja do 500 A, s izlaznim naponom od 50 ili $100 \pm 0.1\%$ mV [4]

Važno je napomenuti da se vrijednost otpora shunta odabire u ovisnosti o očekivanoj struji koja će poteći kroz njega, tako da pad napona koji će se stvoriti na shuntu ne bude prevelik, te da ne naruši precizno mjerenje. Uz vrijednost otpora shunta, bitno je imati i shunt adekvatne snage, kako ne bi došlo do njegovog uništenja.

Nakon pravilno odabranog shunta, shunt se priključuje na voltmetar i pristupa se mjerenju. Uz poznatu vrijednost otpora shunta, te izmjerenog napona, struja se jednostavno određuje preko izraza za Ohmov zakon:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3-2)$$

gdje je:

I – izračunata struja [A]

U – izmjereni pad napona na shuntu [V]

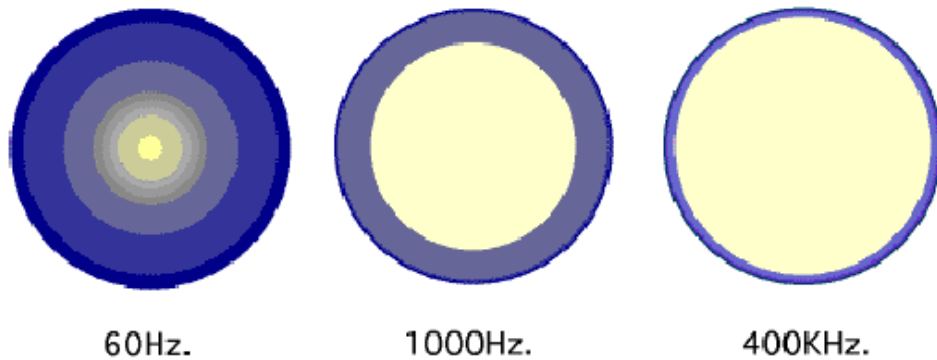
R – vrijednost otpora shunta [Ω]

Ova metoda se često koristi u industrijskim aplikacijama, električnim vozilima, solarnim sustavima i drugim područjima gdje se traži precizno mjerenje struje.

Mjerenjem uz pomoć shunta, odnosno U-I metodom je moguće izravno mjerenje struje, te je relativno jednostavna za primjeniti. Međutim, prilikom ovakvog mjerenja struje vrlo je važno odabrati pravilan shunt otpornik, te provesti kalibriranje instrumenata za mjerenje napona kako bi se osigurala točnost mjerenja.

Mjerenjem izmjenične struje uz pomoć shunta nastupaju i dodatni problemi, kao što su pojava površinskog učinka (skin efekt) i parazitskih parametara shunta, prvobitno njegov vlastiti induktivitet.

Skin efekt je neželjena pojava koja se javlja u vodiču kojim protječe izmjenična struja. Uzrok skin efekta je međudjelovanje magnetskih polja koja nastaju protjecanjem struje te električnog otpora samog vodiča. Prilikom protjecanja izmjenične struje, ona teče dvosmjerno uz brze promjene smjera. Povećanjem frekvencije, magnetsko polje koje nastaje protjecanjem struje inducira električno polje suprotnog smjera u vodiču koje se suprotavlja protjecanju struje te ju gura prema površini vodiča čime raste otpor vodiča jer je smanjena površina kojom bi protjecala struja. Pri većim frekvencijama i većim presjecima vodiča dolazi do sve većeg izražaja skin efekta. Na slici 3.3. je prikazan površinski presjek cilindričnih vodiča. Plava boja predstavlja koncentriranost elektrona u vodiču, dok žuta predstavlja površinu kojom struja ne teče. Vidljivo je kako pri većim frekvencijama struja gotovo isključivo teče uz sam rub vodiča.



Slika 3.3. Skin efekat pri različitim frekvencijama [5]

Skin efekt je moguće smanjiti promjenom načina izvedbe shunta, odnosno korištenjem više raspodijeljenih paralelnih vodiča manjeg presjeka, čime se postiže i bolje odvođenje topline. Utjecaj vlastitog induktiviteta ističe se neželjenim izmjeničnim magnetskim tokom shunta u petlji koju on čini s priključenim voltmetrom. Problem vlastitog induktiviteta se rješava sa bifilarnim namotom otporne žice kod shuntova za manje struje, dok se kod shuntova za veće struje, magnetski tok smanjuje simetričnim savijanjem otpornog materijala.

3.2. Strujni transformator

Strujni transformator, odnosno strujni mjerni transformator (slika 3.4.) je električni uređaj koji se koristi u svrhu mjerenja relativno visokih struja te zaštite. Strujni transformatori se primjenjuju na raznim mjestima kao što su elektroenergetska postrojenja, industrija, mjerni instrumenti te u distribucijskim mrežama za praćenje i upravljanje opterećenja.



Slika 3.4. Strujni mjerni transformator montiran na potpornom izolatoru [6]

Glavni razlog primjene strujnog transformatora je mogućnost mjerenja visokih struja bez uporabe instrumenata namijenjenih za visoke struje. Struja koja se želi mjeriti dolazi na primar transformatora te se na sekundaru dobiva reducirana struja u ovisnosti o prijenosnom omjeru strujnog transformatora. Prijenosni omjer strujnog transformatora se računa prema sljedećem izrazu:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3-3)$$

gdje je:

I_1 – mjerena struja [A]

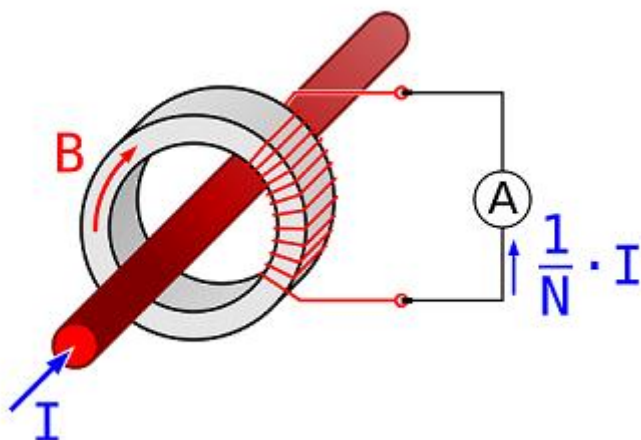
I_2 – reducirana mjerena struja [A]

N_1 – broj zavoja primarnog namota

N_2 – broj zavoja sekundarnog namota

Vrijednosti struja za strujne transformatore su standardizirane, te one iznose 5 A i 1 A. Strujni transformatori se proizvode s različitim prijenosnim omjerima tako da zadovolje standardizirane vrijednosti u ovisnosti o uvjetima na mjestu primjene. Tako, na primjer, primjenom omjera 1000:5, uz struju primara iznosa 1000 A, na sekundarnoj strani teče struja od 5 A.

Na slici 3.5. je prikazan princip rada strujnog transformatora.



Slika 3.5. Princip rada strujnog transformatora [7]

Primarnim namotom koji ima jednu petlju, odnosno vodičem koji prolazi kroz jezgru, teče primarna struja, odnosno nereducirana struja. Protjecanjem struje kroz vodič dolazi do pojave magnetskog polja, silnice primarnog promjenjivog magnetskog polja presijecaju sekundarni namot te dolazi do induciranja napona prema Faraday-evom zakonu prema izrazu {1}:

$$E = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3-4)$$

gdje su:

E – inducirani napon [V]

$\Delta\phi$ – promjena magnetskog toka [Wb]

Δt – promjena vremena [s]

U praksi se gotovo uvijek radi o namotima s više zavoja, te tada Faraday-ev zakon glasi:

$$E = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (3-5)$$

gdje N predstavlja broj zavoja namota.

Induciranjem napona na sekundarnom namotu uz priključen mjerni instrument, odnosno ampermetar koji zatvara sekundarni krug, poteče reducirana struja koja se mjeri (3-6)

prilikom čega je bitno paziti na vrijednost napona na sekundaru koji je puno veći od napona na primaru jer se napon mijenja obrnuto proporcionalno struji prema izrazu:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3-7)$$

gdje je:

U_1 – napon na primarnoj strani transformatora [V]

U_2 – napon na sekundarnoj strani transformatora [V]

N_1 – broj zavoja primarnog namota

N_2 – broj zavoja sekundarnog namota

odnosno, prema izrazu:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3-8)$$

gdje je:

U_1 – napon na primarnoj strani transformatora [V]

U_2 – napon na sekundarnoj strani transformatora [V]

I_1 – mjerena struja [A]

I_2 – reducirana struja [A]

Iz prijenosnog omjera, vidljivo je kako smanjenjem struje, dolazi do povećanja napona u onoliko mjeri koliko je struja reducirana. Primjerice, kod prijenosnog omjera 1000:5, struja na sekundaru će biti 250 puta manja u odnosu na primar, međutim napon će biti 250 puta veći.

Iz ovog razloga je vrlo bitno obratiti pozornost na prisutni napon pri mjerenju reduciranih vrijednosti struja.

Strujni transformatori uz funkciju mjerenja također mogu služiti i za zaštitu, ova vrsta transformatora ima zaštitne releje s vrlo kratkom brzinom djelovanja. Zaštitni releji su automatski upravljani, odnosno sami se uključuju i isključuju. U slučaju kvara, zaštitni relej se isključuje, te je potrebno utvrditi razlog kvara koji je izazvao aktiviranje releja prije ponovnog uključivanja.

Razlog primjene strujnih transformatora u zaštiti je njihovo točno i pouzdano mjerenje struje, koje je vrlo važno kako bi se otkrila bilo kakva odstupanja od nazivnih parametara.

3.3. Strujni transformator s Hallovom sondom

Strujni transformatori s Hallovom sondom u odnosu na klasični strujni transformator ima razne prednosti te nedostatke. Glavna razlika između ova dva strujna transformatora je njihov princip rada na koji mjere struju.

Strujni transformatori s Hallovom sondom rade na princip Hallovog efekta, dok klasični strujni transformatori rade na principu elektromagnetske indukcije, odnosno Faraday-evog zakona.

Hallov efekt je pojava koja se bazira na principu pojave razlike napona, tzv. Hallov napon na vodiču kada je on izložen okomitom magnetskom polju i struji. Hallov efekt je otkriven 1879. g. od strane Edwina Hall-a po kojemu je i dobio ime.

Princip rada Hall sonde, prikazane na slici 3.6., bazira se na Lorentzovom pravilu, nazvanom po Nizozemskom fizičaru Hendriku Lorentz-u. Lorentzovo pravilo opisuje silu koja djeluje na nositelje naboja kada se oni kreću kroz elektromagnetsko polje.



Slika 3.6. Hall sonda s 3 pina [8]

Ukupna sila F koja djeluje na nositelje naboja je suma električne sile F_E i magnetske sile F_B te se računa prema izrazu {1}:

$$F = F_e + F_b \quad (3-9)$$

gdje je F_e električna sila koja se računa prema Coulomb-ovom zakonu, te je određena prema električnom polju u kojem se nabijena čestica nalazi, te je izražena izrazom:

$$F_e = qE \quad (3-10)$$

gdje q predstavlja naboj nabijene čestice, odnosno $1,6 \times 10^{-19}C$, dok E predstavlja jakost električnog polja.

Magnetska sila F_b koja djeluje na nabijene čestice određena je izrazom:

$$F_b = q(v \times B) \quad (3-11)$$

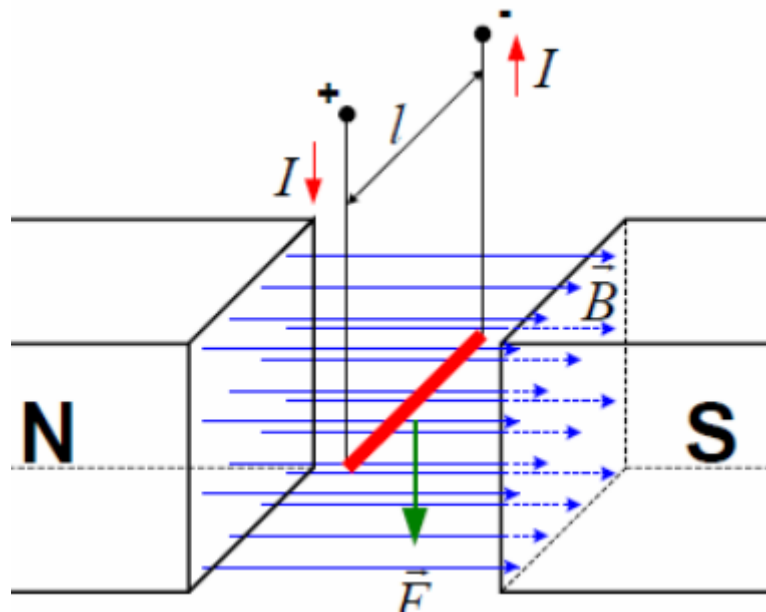
gdje je:

B – jakost magnetskog polja [T]

v – brzina nabijene čestice [m/s]

q – naboj nabijene čestice

Smjer magnetske sile je okomit na smjer brzine nabijene čestice i smjer magnetskog polja.

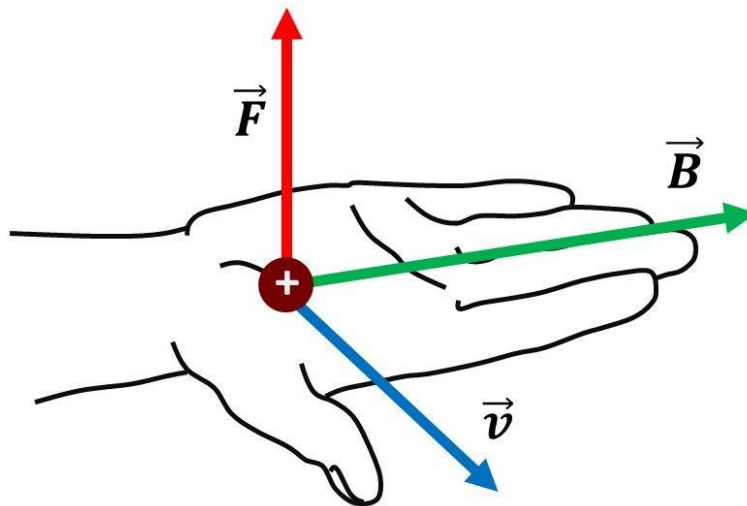


Slika 3.7. Smjer sile na vodič kojim protječe struja u magnetskom polju [9]

Na slici 3.7. je prikazan vodič koji je pod djelovanjem vanjskog magnetskog polja, vodič je priključen na istosmjerni napon, te vodičem poteče istosmjerna struja. Protjecanjem struje stvara

se vlastito magnetsko polje vodiča te dolazi do međudjelovanja između vanjskog i vlastitog magnetskog polja što dovodi do djelovanja sile na vodič.

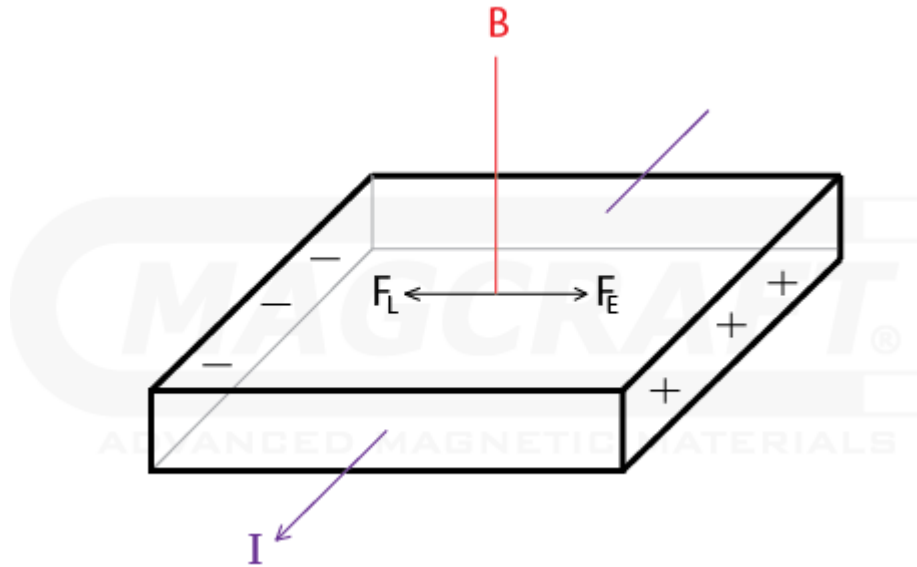
Sila koja djeluje na vodič naziva se Lorentzova sila, te će biti usmjerena prema pravilu desne ruke, prikazanom na slici 3.8.



Slika 3.8. Pravilo desne ruke [9]

Ispruženi prsti pokazuju smjer magnetskih silnica, palac pokazuje smjer brzine dok smjer sile na pozitivno nabijenu česticu izlazi okomito iz dlana prema gore. Za slučaj negativno nabijene čestice smjer sile ulazi u dlan, dakle sila djeluje prema dolje.

Hallov efekt primjenjuje Lorentzovu silu koja uzrokuje nakupljanje naboja na jednu stranu vodiča, slika 3.9., što rezultira pojavom električnog polja te razlike napona, odnosno napona koji se može mjeriti na rubovima pločice (Hallov napon).



Slika 3.9. Razdvajanje naboja kao posljedica Lorentzove sile [10]

Hallov napon definiran je izrazom {10}:

$$V_H = \frac{I \times B}{n \times q \times d} \quad (3-12)$$

gdje je:

V_H – Hallov napon [V]

I – jakost struje kroz pločicu [A]

B – jakost magnetskog polja u kojem se nalazi pločica [T]

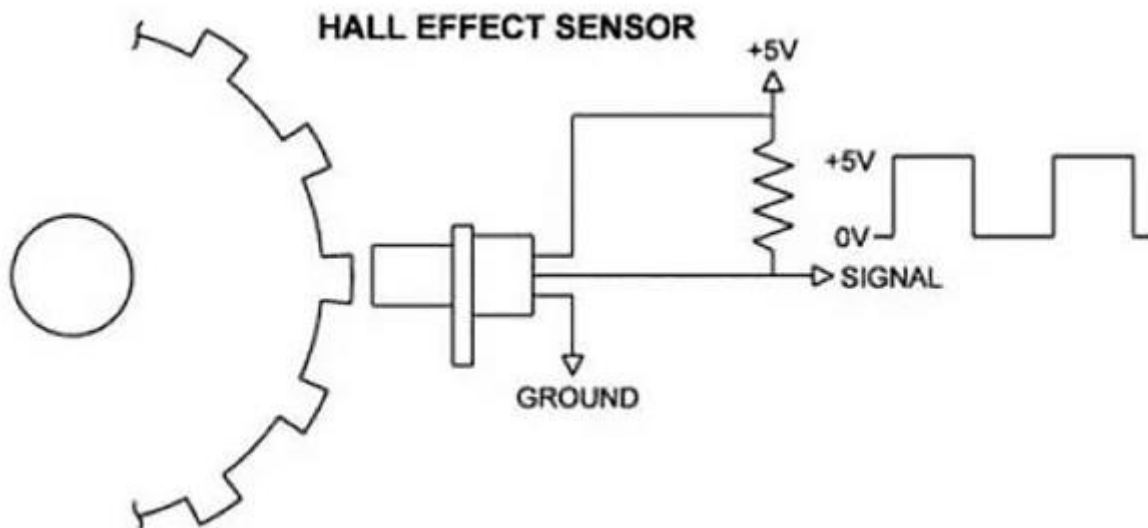
n – gustoća mobilnih nositelja naboja

q – iznos elementarnog naboja, odnosno $1,6 \times 10^{-19} C$

d – debljina pločice [m]

Hallov efekt je proporcionalan magnetskom polju B koje nastaje protjecanjem mjerene struje, te je iz tog razloga moguće mjeriti i istosmjerne struje do $100 \pm 10^{-3} kA$.

Kako bi se mogla mjeriti izmjenična struja, potrebno je osigurati dodatne elektroničke sklopove koji će pretvarati dobiveni Hallov napon u iskoristive električne signale koji se dalje mogu analizirati.



Slika 3.10. Shema spoja i izlazni napon Hallove sonde [11]

Na slici 3.10. je prikazana shema spoja Hallove sonde koja učitava položaj jednog zupčanika. Sondi se dovodi napajanje od 5 V, te se prati izlazni napon. Izlazni napon je pravokutnog oblika, odnosno radi se o digitalnom signalu s vrijednostima 0 i 1. Kada brijeg na zupčaniku dođe u položaj sonde, dolazi do promjene magnetskog polja te uzrokuje promjenu Hallovog napona te se generira vrijednost 1 na izlazu, usuprotno izlazna vrijednost je 0.

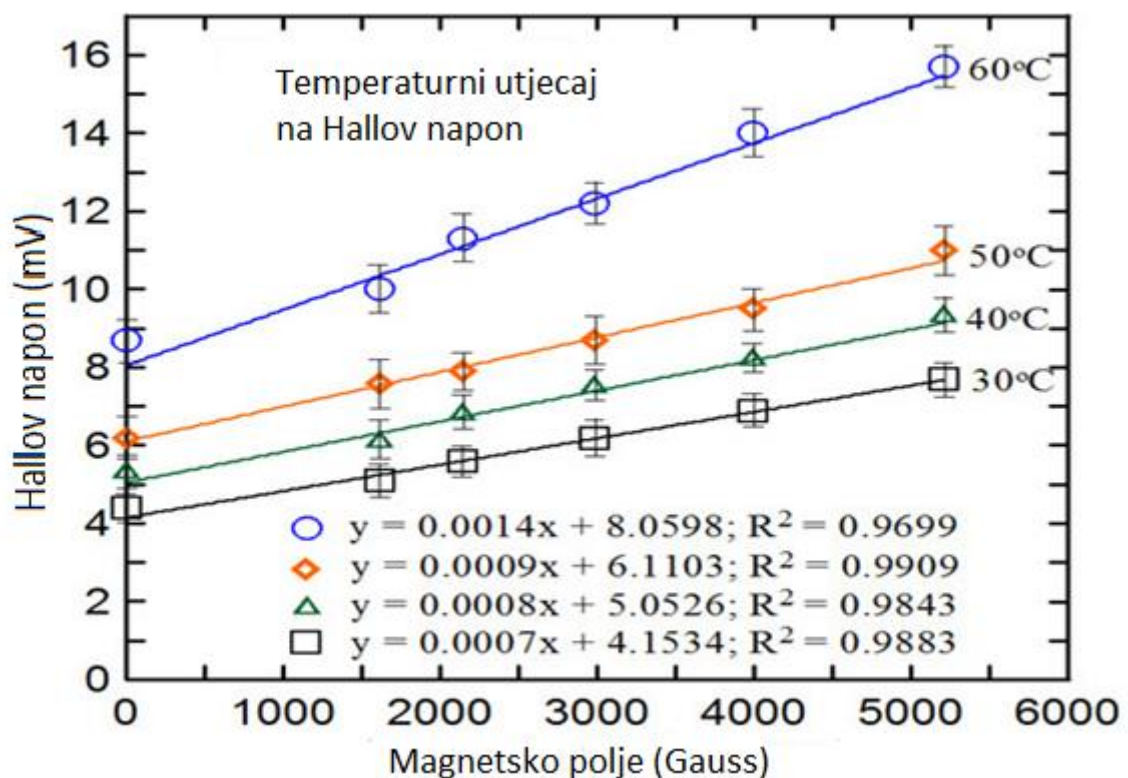
Hallova sonda se postavlja u samu jezgru strujnog transformatora, pri čemu su magnetski tok i Hallov napon proporcionalni mjerenoj struji. Dodavanjem Hallove sonde strujnom transformatoru ostvaruje se mogućnost mjerenja istosmjerne struje, te uz uporabu feritne jezgre proširuje se i frekvencijski doseg u kojem se može mjeriti i to do 10^4 Hz.

Prednosti dodavanja Hallove sonde u strujni transformator su beskontaktno mjerenje, izoliranje sekundarnog namota od primarnog što pridonosi na sigurnosti te vrlo širok raspon struja koje se mogu mjeriti, od nekoliko miliampera pa čak do nekoliko tisuća ampera, u ovisnosti o namjeni strujnog transformatora.

Međutim, uz sve svoje prednosti, primjena strujnog transformatora s Hallovom sondom ima i nekoliko bitnih nedostataka, npr. zahtjevaju zaseban izvor napajanja, te je potrebno pretvarati izlazne veličine u digitalni oblik. Cijena je također veća za strujne transformatore s Hallovom sondom jer zahtjevaju puno više komponenata za pravilan rad te točno mjerenje. Međutim, jedan

od većih nedostataka pri uporabi strujnih transformatora s Hallovom sondom je temperaturna osjetljivost.

Pri različitim temperaturama, Hall sonda može imati varijacije u izlaznom naponu, gdje izlazni napon odstupa od očekivanih vrijednosti. Dakle, promjena temperature može uvesti pogreške pri mjerenju i samim tim narušiti točnost mjerenja. Kako bi se ovaj problem izbjegao, dodaju se naknadne komponente kao što su senzori temperature koji prate vanjsku temperaturu i prilagođavaju izlazni signal prema trenutnoj temperaturi. Slika 3.11. prikazuje promjenu Hallovog napona za različite temperature. Porastom temperature, raste i sam Hallov napon.



Slika 3.11. Hallov napon u ovisnosti o temperaturi [12]

3.4. Strujni termopretvornik

Strujni termopretvornici su jedna od metoda mjerenja električne struje koja se temelji na mjerenju električne struje preko temperature, koriste za potrebe mjerenja nesinusnih efektivnih vrijednosti ili struja visokih frekvencija.

Strujne termopretvornike čini žica napravljena od električno otpornog materijala koji imaju vrlo mali temperaturni koeficijent otpora, npr. manganin, na koju je zalemljen termoelement, koji se dobiva spajanjem kovina ili legura koje imaju relativno visok Seebeckov koeficijent, npr. nikal-konstantan (Ni-Cu), te željezo-konstantan (Fe-CuNi).

Temperaturni koeficijent otpora predstavlja mjeru promjene električnog otpora nekog materijala s promjenom temperature, odnosno predstavlja promjenu električnog otpora nekog materijala uz promjenu temperature od jedan stupanj, te se predstavlja sljedećim izrazom:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (3-13)$$

gdje su:

R – vrijednost otpora pri promjenjenoj temperaturi [Ω]

R_0 – vrijednost otpora pri početnoj temperaturi [Ω]

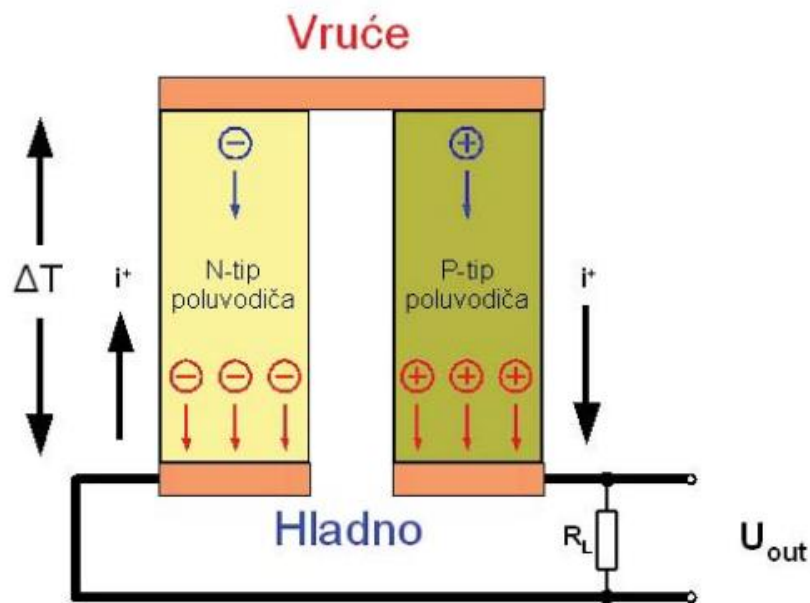
α - temperaturni koeficijent otpora [K^{-1}]

T – vrijednost temperature na kojoj se računa promjena otpora [K]

T_0 – vrijednost početne temperature [K]

Dakle, u strujnim termopretvornicima je vrlo važno odabrati materijal žice koji će imati vrlo nizak temperaturni koeficijent otpora, kako se električni otpor ne bi značajno promjenio porastom temperature te negativno utjecao na rad termoelementa.

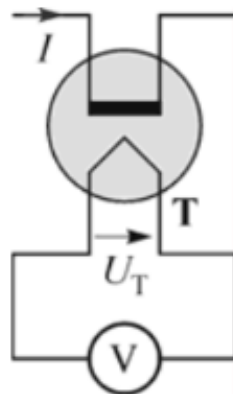
Kako je ranije spomenuto, termoelement je načinjen od kovina ili legura koje imaju relativno visok Seebeckov koeficijent, koji opisuje termoelektrični efekt, odnosno pojavu električnog napona kada se dvije točke materijala izlože temperaturnoj razlici.



Slika 3.12. Seebeckov efekt [13]

Na slici 3.12. je prikazan Seebeckov efekt, odnosno princip rada termoelementa. Na jednu stranu materijala se dovodi toplina, dok drugi kraj ostaje hladan. Razlika temperature između vruće i hladne strane dovodi do generiranja električnog napona. Mjera generiranja napona ovisi o razlici temperature, te je specifičan za svaki materijal. Seebeckov koeficijent može biti pozitivan i negativan. Pozitivan koeficijent podrazumijeva da će generirani napon imati smjer od materijala s većom temperaturom prema materijalu s nižom temperaturom, dok negativni koeficijent podrazumijeva suprotno usmjeren napon.

Princip rada strujnog termopretvornika (slika 3.13.), temelji se na mjerenju napona na krajevima termoelementu, odnosno napona U_T .



Slika 3.13. Strujni termopretvornik [1]

Termopretvornici se rabe za mjerenje struja od nekoliko miliampera do nekoliko desetaka ampera, važno je napomenuti da se pri mjerenju struja do stotinjak ampera koriste termopretvornici u vakuumu u cilju izbjegavanja odvoda topline konvekcijom, te se s tim ostvaruje veća osjetljivost termopretvornika.

3.5. Magnetooptički osjetnik

Magnetooptički osjetnik je uređaj koji se koristi za mjerenje jakosti magnetskih polja, princip rada mu se temelji Faradayevom magnetooptičkom efektu.

Faradayev magnetooptičkih efekt je efekt koji je prisutan u gotovo svim materijalima u određenoj mjeri, on opisuje rotaciju polarizacije svjetlosti koja prolazi kroz nekakav materijal, npr. staklo ili monomodna optička nit prilikom djelovanja magnetskog polja.

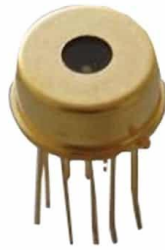
U slučaju provođenja linearno polarizirane svjetlosti kroz materijal, njena polarizacija počinje rotirati. Kut pod kojim će polarizacija rotirati proporcionalan je jakosti magnetskog polja te duljini puta koju prelazi svjetlost kroz materijal.

Magnetsko polje utječe na putanju polariziranih svjetlosti, te dovodi do rotacije polarizacije.

Uz dovoljno dugačak optički put, ostvaruje se mjerljiva rotacija polarizacije, koja predstavlja osjetilo struje.

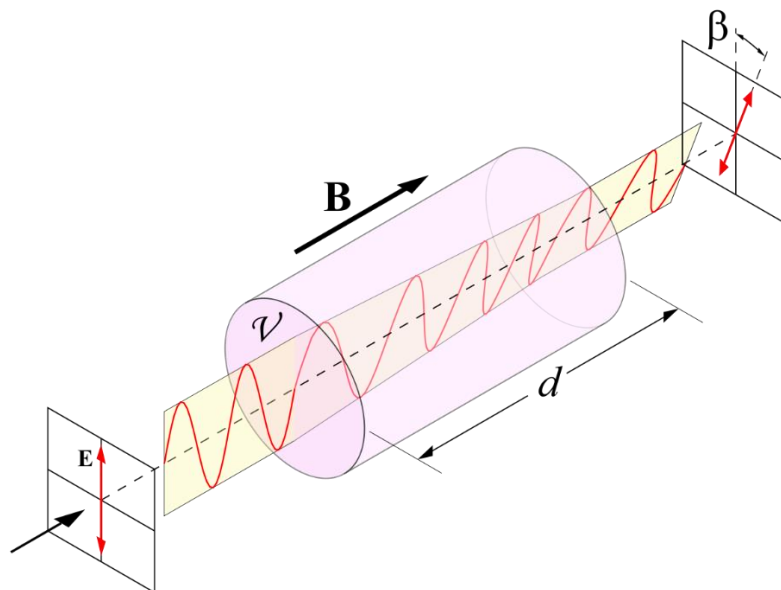
Rotacija polarizacije se detektira pomoću polarizatora i analizatora, polarizator propušta samo linearno polariziranu svjetlost u određenoj ravnini, dok analizator propušta samo svjetlost polariziranu u određenoj ravnini te mjeri jakost svjetlosti.

Prilikom promjene polarizacije, ona rezultira različitim intenzitetima svjetlosti koju detektira analizator. Ove promjene intenziteta se mjere uz pomoć fotodetektora (slika 3.14) koji svjetlosne signale pretvara u električne signale.



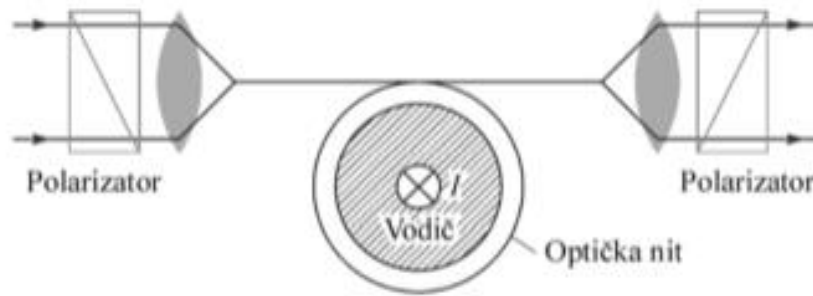
Slika 3.14. Fotodetektor [14]

Jedan od najčešće rabljenih magnetooptičkih osjetnika je Faradayev rotator (slika 3.15.). Faradayev rotator sastoji se od materijala koji ima visok Faradayev koeficijent, npr. staklo, koji je postavljen između dva polarizatora. Magnetsko polje generirano kod Faradayevog rotora nastaje primjenom vanjskog magneta ili elektromagneta.



Slika 3.15. Faradayev rotator [15]

Magnetooptički strujni pretvornici (slika 3.16.) imaju različite aplikacije u područjima u kojima se zahtjeva mjerenje magnetskih polja, kao što su biomedicina, optičke komunikacije, razne senzorske aplikacije, kao što su senzori pokreta, itd.



Slika 3.16. Magnetooptički strujni pretvornik [1]

Prednost magnetooptičkih strujnih pretvornika je dobra izolacija sekundarnog kruga pri visokim naponima radi mogućeg velikog razmaka između vodiča i svjetlovodnog prstena.

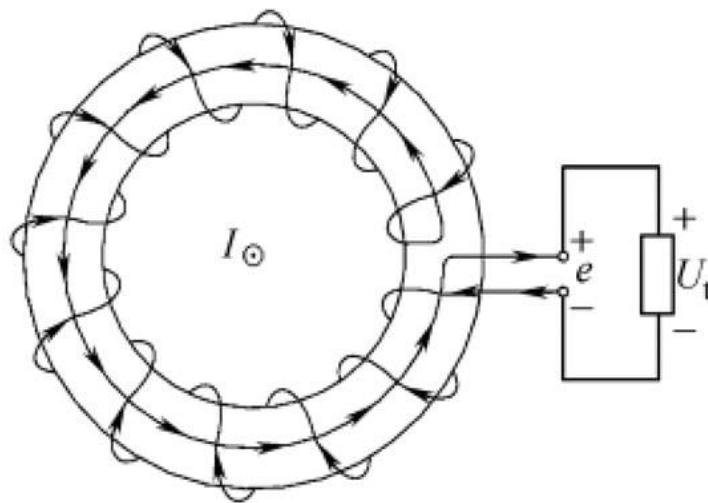
Ovom vrstom strujnog pretvornika moguće je mjeriti struje nižih frekvencija u rasponu od 1 do 10^4 A uz relativnu pogrešku od 10^{-3} .

Za mjerenje malih struja, potrebna je uporaba posebnih materijala. Američki laboratorij NIST (National Institute of Standards and Technology) je uz primjenu reflektirajućeg prstena načinjenog od itrij-željezo granata, ostvario mogućnost mjerenja struja veličina 10^{-7} A.

4. ROGOWSKI SVITAK

Rogowski svitak predstavlja jednostavan i često primjenjivan strujni pretvornik, koji nema feromagnetsku jezgru. Uz pomoć Rogowskijevog svitka mjerena struja se pretvara u naponski signal, koji se daljnje obrađuje. Rogowski svitak je također poznat i kao „zračni“ transformator.

Rogowskijev svitak (slika 4.1.) se izvodi namatanjem zavoja preko nemagnetske jezgre, namatanje bi se trebalo vršiti ravnomjerno razmaknutim zavojima u jednom smjeru, kako bi se izbjegla kapacitivna djelovanja.



Slika 4.1. Rogowski svitak [16]

Strujni pretvornik u obliku Rogowskijevog svitka može biti fleksibilne i krute izvedbe (slika 4.2., 4.3.)



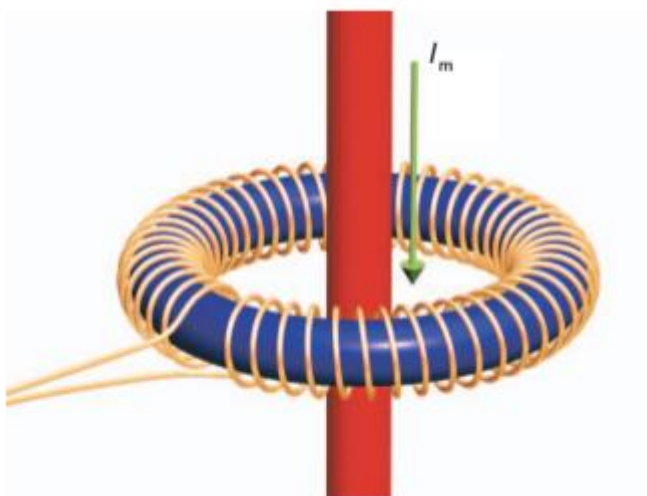
Slika 4.2. Fleksibilna izvedba strujnog pretvornika u obliku Rogowskijevog svitka [17]



Slika 4.3. Kruta izvedba strujnog pretvornika u obliku Rogovskijevog svitka [18]

4.1. Princip rada Rogovskijevog svitka

Princip rada mjerenja struje strujnim pretvornicima s Rogovskijevim svitkom zasniva se na mjerenju induciranog napona u torusu svitka koji nastaje zbog promjene magnetskog toka koji stvara mjerena struja I_m (slika 4.4.) prema Lenzovom pravilu.



Slika 4.4. Prikaz mjerene struje I_m [1]

Lenzovo pravilo je jedno od osnovnih pravila u elektromagnetizmu koje opisuje smjer inducirane struje ili elektromotorne sile u vodiču kada se ono nalazi u magnetskom polju.

Ono govori da je smjer inducirane struje ili elektromotorne sile takav da se protivi promjeni magnetskog polja koje ga je izazvalo, odnosi gledajući Faradayev zakon indukcije napona koji glasi:

$$E = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (4-1)$$

Lenzovo pravilo se u izrazu koji definira Faradayev zakon odnosi na negativan predznak (znak -), što upravo upućuje na definiciju Lenzovog pravila, odnosno, da je inducirani napon suprotnog predznaka od onoga napona koji ga je izazvao.

Dakle, postavljanjem vodiča unutar svitka, dolazi do promjene struje u vodiču, što će izazvati promjenu magnetskog toka u torusu svitka. Navedena promjena magnetskog toka dovodi do indukcije napona u svitku prema prethodno definiranom Faradayevom, odnosno Lenzovom pravilu.

Magnetski tok je potrebno promatrati kroz infinitezimalni dio površine zbog nejednolike preraspodjele magnetskog toka na različitim udaljenostima od vodiča.

Magnetski tok $d\phi$ na udaljenosti r od vodiča iznosi:

$$d\phi = B(r) \times dS, \quad (4-2)$$

gdje je:

$$dS = a * dr, \quad (4-3)$$

odnosno:

$$d\phi = B(r) * a * dr = \mu * H(r) * a * dr, \quad (4-4)$$

gdje je:

$d\phi$ – magnetski tok [Wb]

$B(r)$ – jakost magnetskog polja [T]

a – površina [m^2]

dr – udaljenost namota od vodiča [m]

Može se vidjeti da je magnetski tok proporcionalan jakosti magnetskog polja $B(r)$ na određenoj udaljenosti r . Iz ovog razloga je potrebno poznavati kako će se raspodijeliti magnetski tok, odnosno kako bi se točno mogao izračunati inducirani napon.

Ukoliko je jakost polja na istoj udaljenosti r uvijek jednaka, zakon protjecanja glasi te se računa prema izrazu {19}:

$$\Sigma I = \oint H(r) \times dl, \quad (4-5)$$

tada kroz jedan zavoj svitka teče vremenski promjenjiva struja I, koja se računa rješavanjem integrala po opsegu kružnice I:

$$I = H(r) * \int_{2*r*\pi}^{\infty} dl = H(r) * 2 * r * \pi, \quad (4-6)$$

iz čega slijedi:

$$H(r) = \frac{I}{2 * r * \pi}, \quad (4-7)$$

Ukoliko se u izraz za magnetski tok ϕ na udaljenosti r od vodiča, uvrsti sljedeći izraz:

$$d\phi = \frac{\mu * a * I}{2 * r * \pi} \times dr, \quad (4-8)$$

integracijom se dobiva ukupni tok kroz torus:

$$\phi = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu * a * I}{2 * r * \pi} \times dr = \frac{\mu * a * I}{2 * \pi} \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (4-9)$$

Mjerena struja koja teče vodičem je promjenjiva te će i magnetski tok kroz torus također biti promjenjiv.

Uvrštavanjem ukupnog toka kroz torus u izraz za Lenzovo pravilo, dobiva se izraz za inducirani napon, koji glasi:

$$e(t) = -\frac{N * \mu * a}{2 * \pi} * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * \frac{dI(t)}{dt} \quad (4-10)$$

Ukoliko se strujnim pretvornikom želi mjeriti kontinuirana sinusna struja, u tom slučaju se ne vrši dodatna integracija jer je rezultat derivacije ponovno sinusna struja pod kutom od 90°, što predstavlja mogućnost mjerenja efektivne vrijednosti inducirano napona, koja se računa prema izrazu:

$$U_{ef} = f * N * \mu * a * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * I_{ef}, \quad (4-11)$$

gdje je:

U_{ef} – efektivna vrijednost inducirano napona [V]

f – frekvencija [Hz]

μ – magnetska permeabilnost, koja ovisi o vrsti materijala jezgre [H/m]

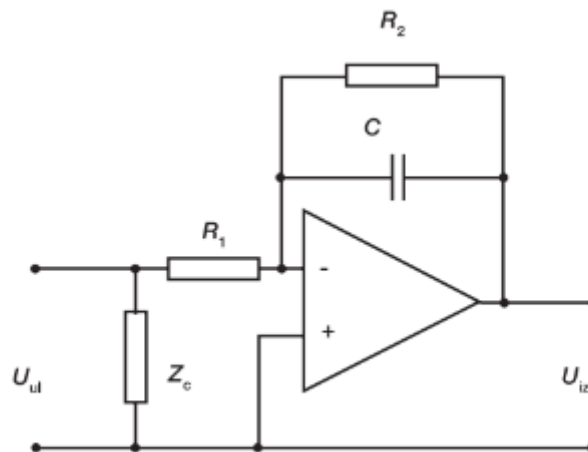
a – površina [m^2]

r_1 – unutarnji polumjer svitka [m]

r_2 – vanjski polumjer svitka [m]

I_{ef} – efektivna vrijednost mjerene struje [A]

Ukoliko se želi dobiti točna slika mjerene veličine, tada se izlaz mora integrirati jer je inducirani napon derivacija mjerene struje, te se u ovu svrhu upotrebljavaju aktivni integratori s operacijskim pojačalom (slika 4.5.).



Slika 4.5. Aktivni integrator s operacijskim pojačalom [19]

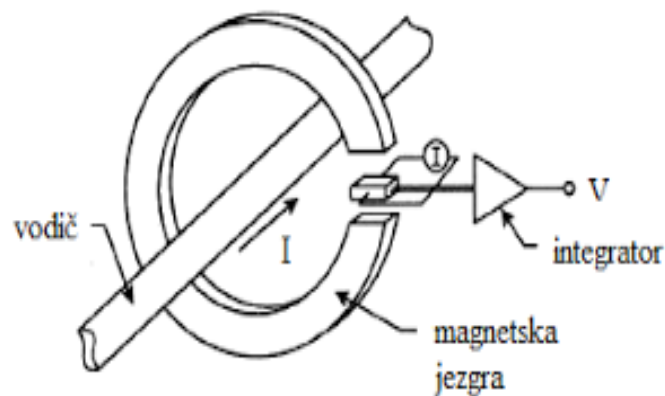
Strujni pretvornici s Rogovskijevim svitkom imaju razne prednosti u odnosu na ostale strujne pretvornike, a neki od njih su jednostavnost izrade, kompaktnost, niska cijena te vrlo širok opseg struja koje se mogu mjeriti (od 10A sve do struja reda MA) u širokom frekvencijskom opsegu.

Uz razne prednosti, ovi pretvornici imaju i nekoliko nedostataka kao što su mala osjetljivost i utjecaj vanjskih polja na mjerene veličine.

4.2. Primjena Rogovskijevog svitka

Rogovski svitak je zbog svoje jednostavne konstrukcije, fleksibilnosti i vrlo visoke točnosti postao vrlo raširen unutar raznih područja, neka od kojih su: mjerenja struje u elektroenergetskom sustavu te ispitivanje elektromotora u postrojenjima.

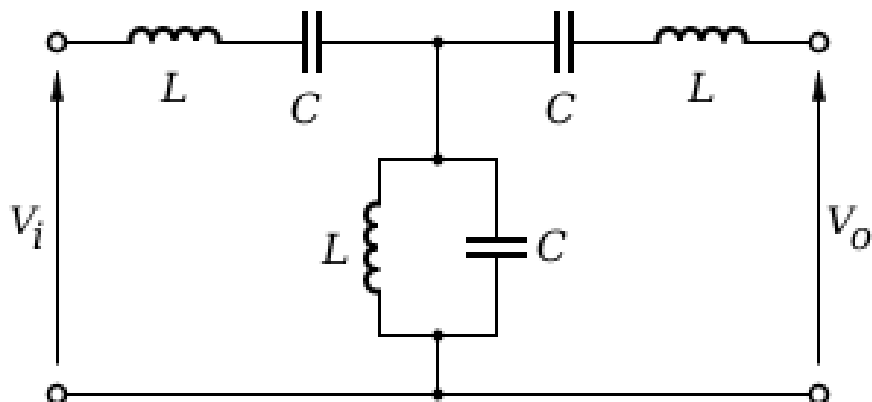
Mjerenja u elektroenergetskim postrojenjima su vrlo opasna radi prisutnosti visokih napona, te se u svrhu tih mjerenja pokušava pronaći što sigurniji način provedbe mjerenja. Za ovu primjenu je Rogowski svitak vrlo dobro rješenje jer on omogućuje „neinvazivno“ mjerenje struje, odnosno beskontaktno mjerenje tako što se vodič kroz koji se mjeri struja obuhvati unutar svitka (slika 4.6). Dakle, nije potreban fizički kontakt s vodičem. Uz sigurnost, ova vrsta mjerenja pridonosi i pouzdanosti samog elektroenergetskog sustava jer nije potrebno prekidati strujne krugove u svrhu mjerenja.



Slika 4.6. Način mjerenja struje Rogowskijevim svitkom [16]

Ispitivanje elektromotora u postrojenjima je također jedna od primjena Rogowskijevog svitka. Ovaj postupak je bitan za provjeru performansi motora, utvrđivanje uvjeta koji se ne bi smjeli pojavljivati u normalnom radu motora te prepoznavanje raznih problema i kvarova.

Uz uporabu Rogowskijevog svitka te pojasno-propusnih filtera (eng. Band-pass filter, slika 4.7.) mogu se ispitivati kvarovi elektromotora.

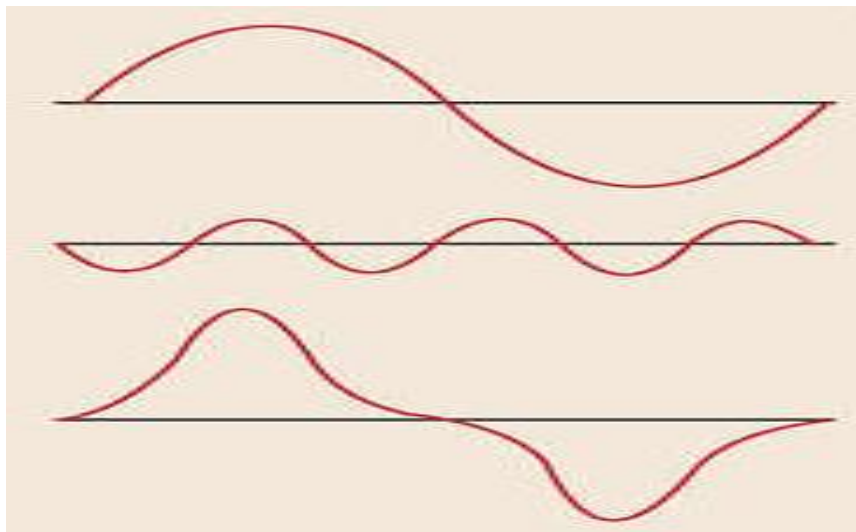


Slika 4.7. Primjer pojasno-propusnog filtera [20]

Pojasno-propusni filteri su filteri uz koje je moguće filtrirati određeni pojas frekvencija koji sadrži korisne harmonike u utvrđivanju kvarova motora.

Utvrđivanje kvarova se vrši tako da se promatra i analizira određeni pojas frekvencije. Neki od kvarova koji se mogu detektirati uz pomoć Rogovskijevog svitka je pojava struja većih od nazivnih, skokovi ili padovi napona, abnormalni harmonici (slika 4.8.) te nebalansirane struje.

Uočavanje abnormalnih harmonika nekad može biti vrlo izazovno, međutim uz primjenu Rogovskijevog svitka, ona se vrlo lagano detektiraju i analiziraju što omogućuje vrlo laganu identifikaciju komponenti harmonika te njihovih izvora.



Slika 4.8. Predstavlja čisti sinusni oblik, njezin treći harmonik, te abnormalni harmonik [1]

Strujni pretvornik s Rogovskijevim svitkom također se koristi i u elektromotornim pogonima za nadzor struje te identifikaciju nepravilnosti ili potencijalnih kvarova u pogonu.

Rogovski svitak u pogonima mjeri struje, te ih uz pomoć dodatnih uređaja uspoređuje i u slučaju protjecanja struje veće od nazivne, dolazi do automatskog isključenja pogona, odnosno motora, kako bi se spriječila daljnja šteta.

U slučaju kratkog spoja Rogovski svitak vrlo brzo detektira visoku struju koja je izazvana kratkim spojem te se aktiviraju sigurnosni mehanizmi koji prekidaju strujni krug.

Rogovski svitak također ima mogućnost pružati informacije o struji koju motor troši, odnosno uz pomoć njega može se odgonetnuti ukoliko je došlo do prekida jednog ili više namotaja.

4.3. Izvedbe Rogovskijevog svitka

Postoje različite vrste Rogovskijevog svitka, u ovisnosti o njihovoj namjeni, složenosti mjerenja, prostoru gdje se primjenjuju.

Jedna od vrsta Rogovskijevog svitka je razdjeljeni Rogovski svitak (eng. Split-core, slika 4.9.). Ovaj svitak ima cilindrični oblik te je podijeljen na pola što mu omogućuju uporabu, odnosno mjerenje struja kroz već postavljene vodiče (bez prekida napajanja).



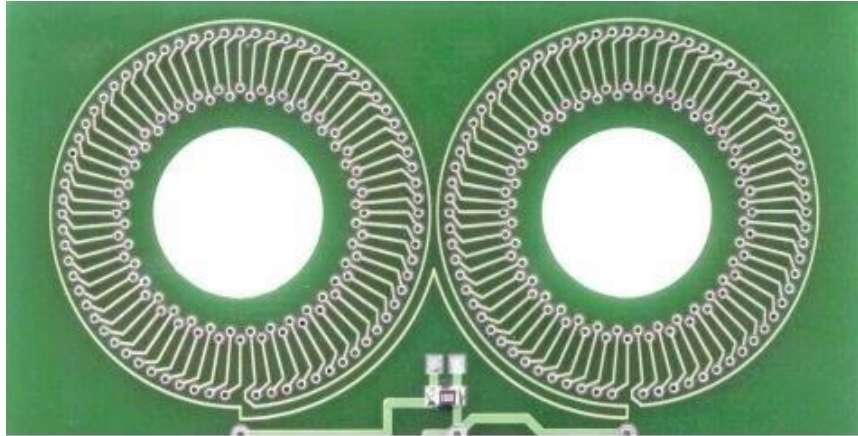
Slika 4.9. Razdjeljeni Rogovski svitak [21]

Fleksibilni Rogovski svitak (slika 4.10.) se primjenjuje za mjerenje struja u složenim ili ograničenim prostorima, gdje je korištenje klasičnog Rogovskijevog svitka otežano. Izrađuje se od visokofleksibilnog materijala koji je vrlo savitljiv te se lako poprima različite geometrijske oblike.



Slika 4.10. Fleksibilni Rogovski svitak [18]

PCB Rogowski svitak (slika 4.11.) je posebna vrsta Rogowskijevog svitka koja je integrirana na tiskanoj pločici (eng. Printed circuit board, skraćeno PCB). Ova vrsta Rogowskijevog svitka je vrlo kompaktna te se lako ugrađuje u razne elektroničke uređaje. Njihova tipična primjena uključuje mjerenje struja u IGBT modulima.



Slika 4.11. Prikaz PCB Rogowskijevog svitka [22]

Kruta izvedba Rogowskijevog svitka (slika 4.12) je čvrsta, uglavnom cilindrična zavojnica koja se postavlja izravno na vodič na kojem se mjeri struja ili se ugrađuje u sustav. Ova vrsta Rogowskijevog svitka uglavnom ima već unaprijed definiranu veličinu i oblik, što otežava njegovu primjenu u određenim uvjetima, gdje je ograničen prostor.



Slika 4.12. Kruta izvedba Rogowskijevog svitka cilindričnog oblika [23]

5. ANALIZA MJERENJA STRUJE ROGOWSKIJEVIM SVITKOM I STRUJNIM KLIJEŠTIMA

5.1. Uvod u mjerenje

U ovom poglavlju su opisana mjerenja s dva mjerna uređaja, odnosno sa strujnim kliještima (slika 5.1), te Rogowskijevim svitkom (slika 5.2). Cilj mjerenja je bio analizirati kako se ti uređaji ponašaju pri različitim iznosima i oblicima struje te pri različitim frekvencijama.



Slika 5.1. Strujna kliješta – Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE [24]



Slika 5.2. Fleksibilni Rogowskijev svitak – CHAOVIN ARNOUX A100 [24]

5.2. Karakteristike Rogowskijevog svitka (CHAOVIN ARNOUX A100) i strujnih kliješta (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)

U tablicama 5.1., odnosno 5.2. prikazane su osnovne karakteristike mjernih instrumenata korištenih pri mjerenju.

Tablica 5.1. Karakteristike strujnih kliješta – Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE [25]

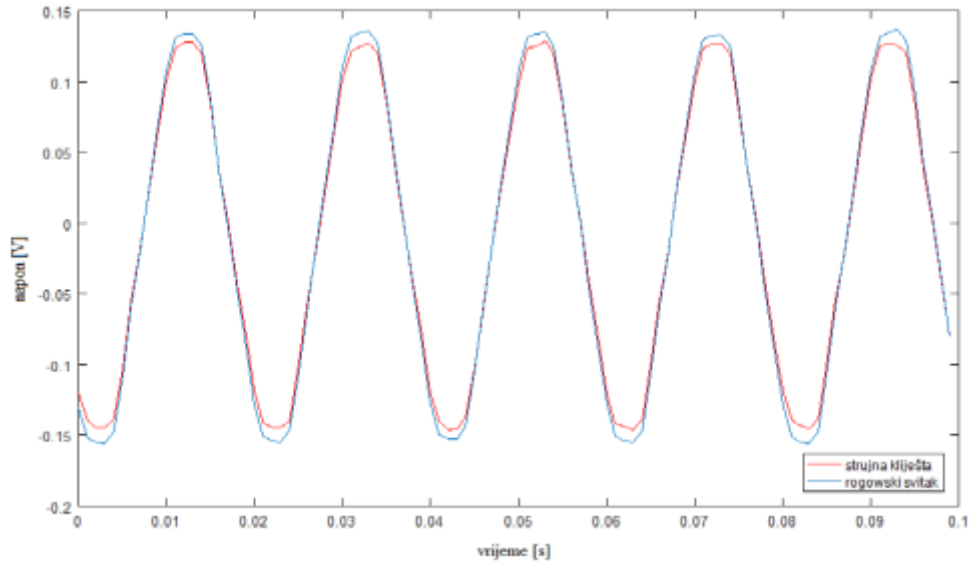
Karakteristike:	Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE
Strujni opseg	10 mV/A – 100 mV/A
Frekvencijski opseg	Istosmjerni signal do 100 kHz
Maksimalna ulazna struja	100 A vršno, 70 A efektivno
Radna temperatura	0°C - +50°C, +32F – +122 F
Maksimalni promjer mjenog vodiča	11.8 mm
Maksimalni napon mjenog vodiča	600 V

Tablica 5.2. Karakteristike Rogovskijevog svitka – CHAOVIN ARNOUX A100 [26]

Karakteristike:		CHAOVIN ARNOUX A100			
Strujni opseg		10 mV/A, 100 mV/A	200 A AC, 20 A AC		
Frekvencijski opseg		10 Hz – 20 kHz			
Maksimalna izlazna struja / maksimalan izlazni napon		Nema ograničenja / 4.5 V vršnog signala			
Točnost	Vrijednost	20 A		200 A	
	Ulazna struja	0.5 A – 5 A	5 A – 20 A	0.5 – 5 A	0.5 – 200 A
	Pogreška izlaznog signala [%]		≤ 1 %		≤ 1 %
	Fazni pomak	≤ 1.3 °	≤ 1.3 °	≤ 1.3 °	≤ 1.3 °
Radna temperatura		-10 °C - +55 °C			
Duljina senzora		45 cm			
Promjer zatvorenog senzora		14 cm			

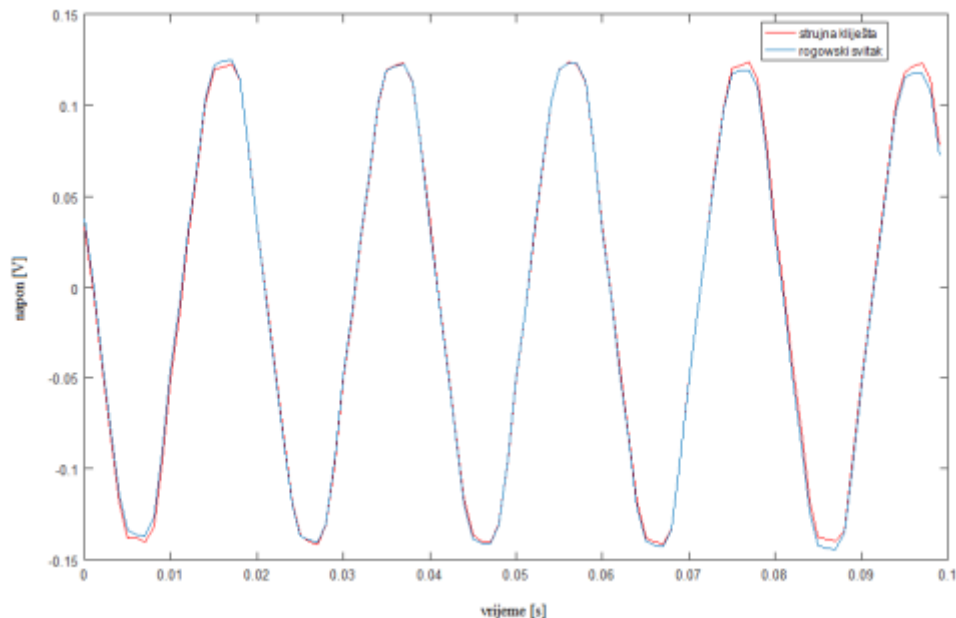
5.3. Mjerenje struje sa Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100) i sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)

Mjerenje 1: U prvom mjerenju je mjeren sinusni signal efektivne vrijednosti struje 1 A, frekvencije 50 Hz. Vodič kroz koji teče struja koja se mjeri dodiruje senzor Rogovskijevog svitka. [24] Prema slici 5.3. je vidljivo kako su izmjereni oblici vrlo slični kako po obliku tako i po vrijednosti, može se vidjeti da je Rogovskijev svitak izmjerio malo veće vrijednosti u odnosu na strujna kliješta, no u zanemarivoj mjeri.



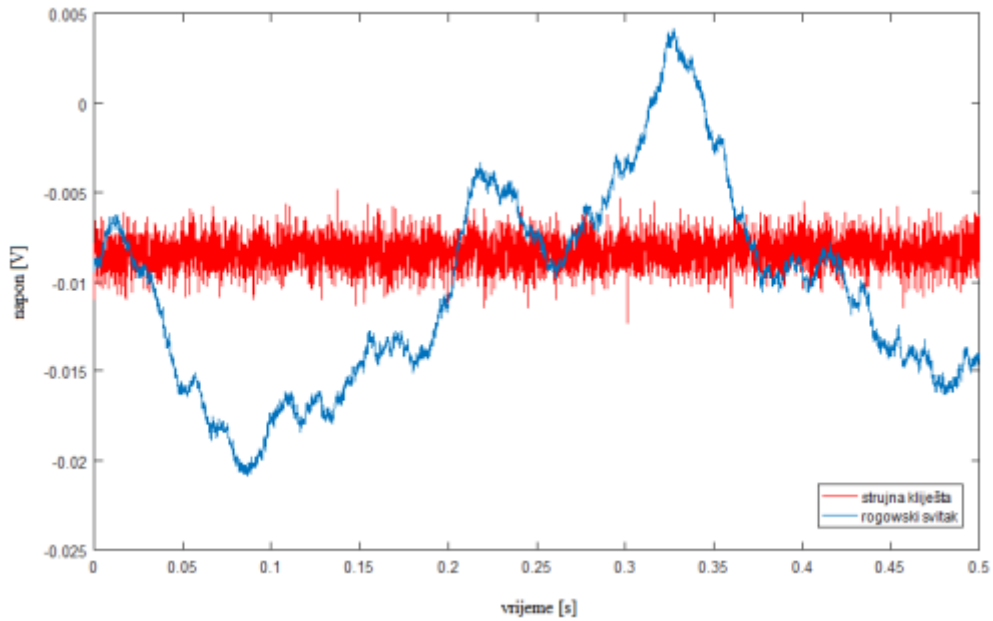
Slika 5.3. Signal sinusnog oblika izmjeren sa Rogowskijevim svitkom i strujnim kliještima u slučaju kada mjerni vodič dodiruje senzor Rogowskijevog svitka [24]

Mjerenje 2: Kod drugog mjerenja mjeri se ponovno sinusni signal efektivne vrijednosti 1 A, frekvencije 50 Hz, dok se vodič kojim protječe mjerena struja postavlja u središte Rogowskijevog svitka. [24] Kod ovog mjerenja je prema slici 5.4. vidljivo kako je Rogowskijev svitak pokazao gotovo identične rezultate kao i strujna kliješta.



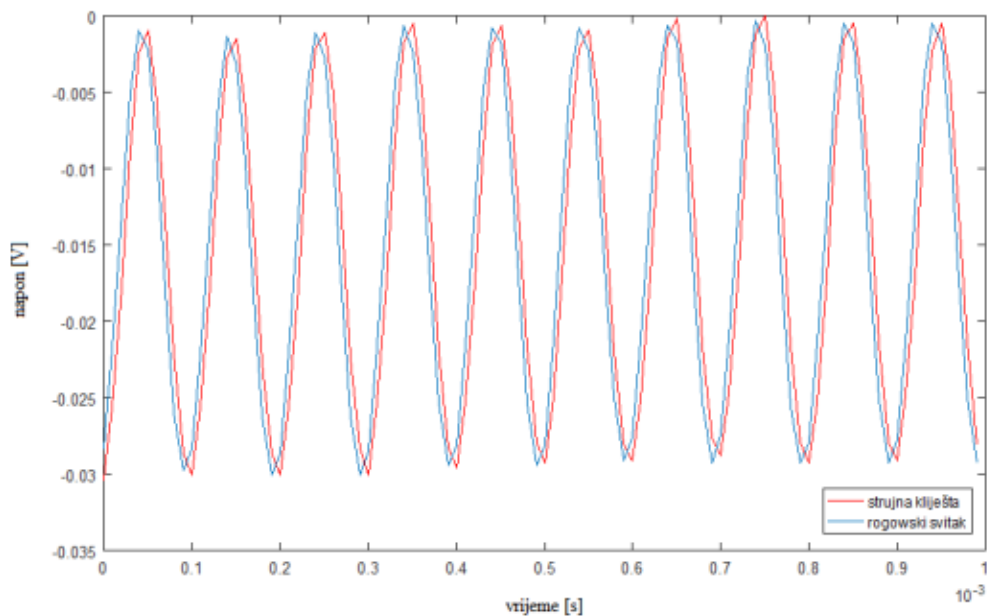
Slika 5.4. Signal sinusnog oblika izmjeren sa Rogowskijevim svitkom i strujnim kliještima u slučaju kada je mjerni vodič u središtu Rogowskijevog svitka. [24]

Mjerenje 3: Prilikom ovog mjerenja, mjeri se sinusni signal efektivne vrijednosti 0 A, frekvencije 50 Hz, pri naponu od 0 V, dakle kroz mjerni vodič ne teče struja. [24] Prema slici 5.5. vidljivo je kako pri mjerenju struje od 0 A dolazi do pojave šumova kod Rogovskijevog svitka.



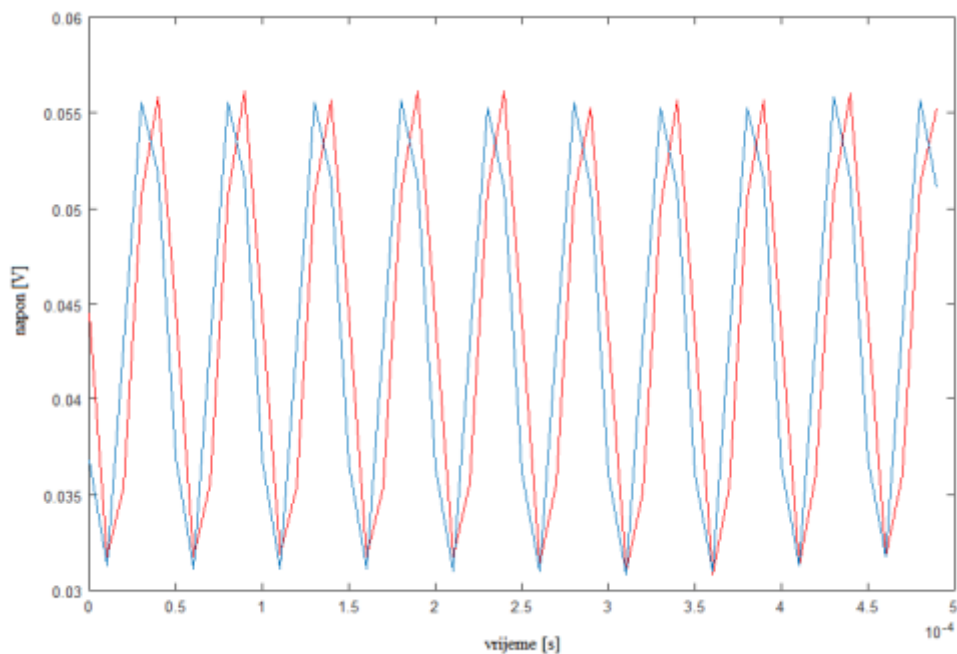
Slika 5.5. Prisutnost šumova [24]

Mjerenje 4: Mjeri se sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 10 kHz. [24] Prema slici 5.6. vidljivo je kako i strujna kliješta i Rogovskijev svitak mjere približno iste vrijednosti.



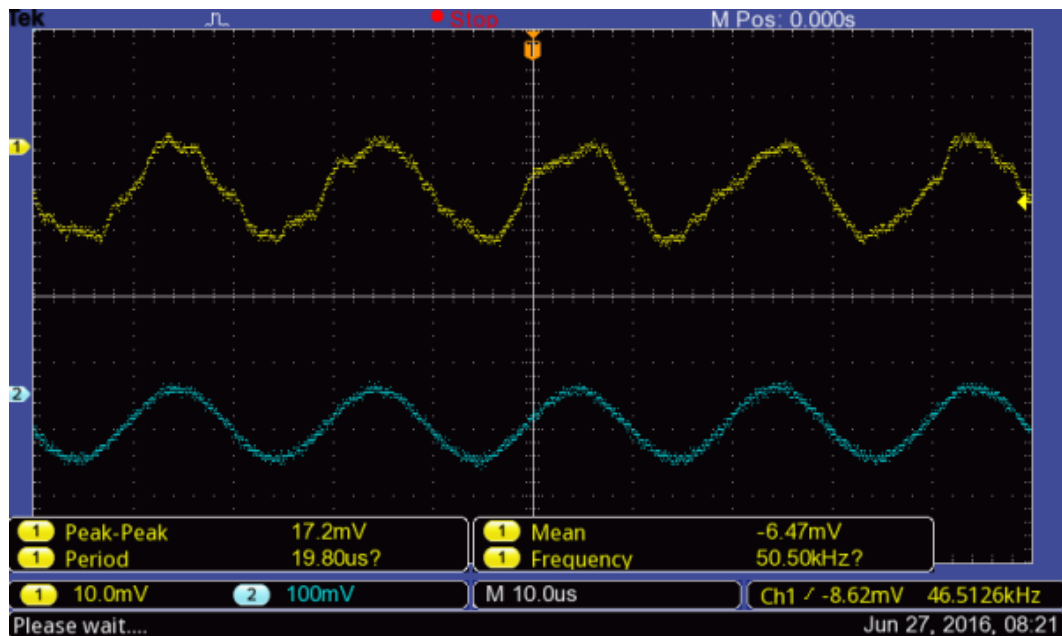
Slika 5.6. Signal sinusnog oblika izmjeren sa Rogowskijevim svitkom i strujnim kliještima pri struji od 100 mA i frekvenciji od 10 kHz [24]

Mjerenje 5: Mjeri se sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 20 kHz. [24] Prema slici 5.7. vidljivo je kako su mjerenja gotovo identična kao i u prethodnom mjerenju.



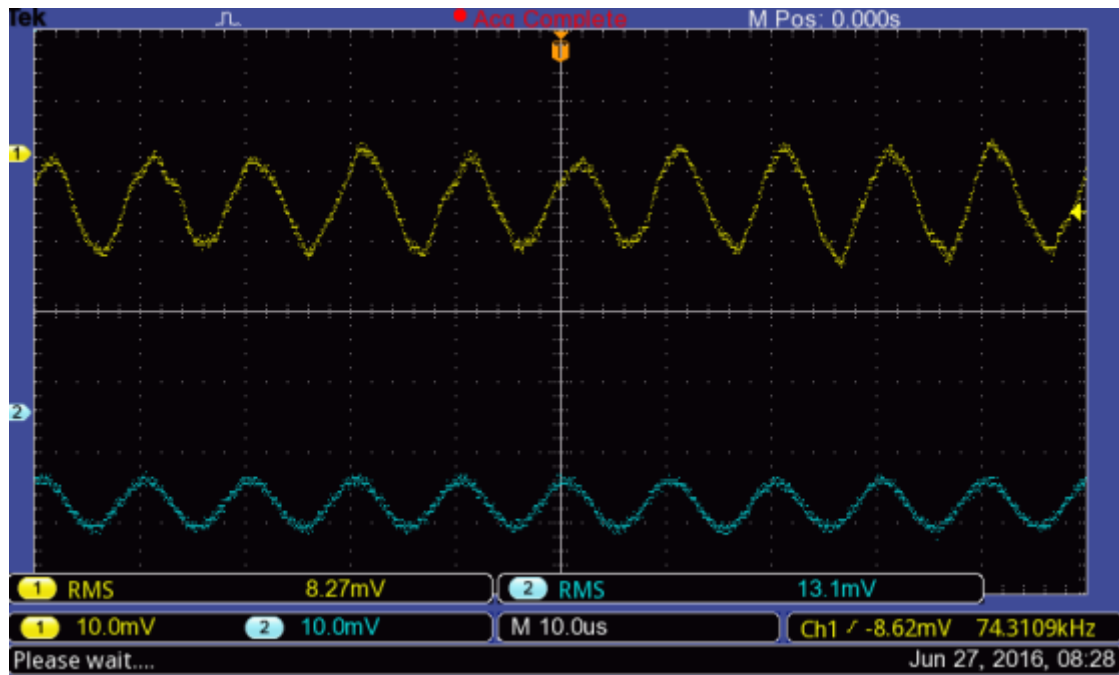
Slika 5.7. Signal sinusnog oblika izmjeren sa Rogowskijevim svitkom i strujnim kliještima pri struji od 100 mA i frekvenciji od 20 kHz [24]

Mjerenje 6: Mjeri se sinusni signal efektivne vrijednosti struje 86.2 mA te frekvencije od 50 kHz. [24] Prema slici 5.8. vidljivo je kako pri ovim frekvencijama dolazi do izobličenja signala koji je mjereno sa strujnim kliještima, žuti signal predstavlja signal mjereno strujnim kliještima, dok plavi signal predstavlja signal mjereno Rogovskijevim svitkom).



Slika 5.8. Sinusni oblik mjereno strujnim kliještima i Rogovskijevim svitkom pri struji od 86.2 mA i frekvenciji od 50 kHz [24]

Mjerenje 7: Mjeri se sinusni signal efektivne vrijednosti struje 86.2 mA te frekvencije 75 kHz. [24] Prema slici 5.9. gdje žuti signal predstavlja mjerenje strujnim kliještima, dok plavi signal predstavlja mjerenje Rogovskijevim svitkom, može se vidjeti da su izobličenja i dalje prisutna kod mjerenja provedenog sa strujnim kliještima.



Slika 5.9. Sinusni oblik mjeren strujnim kliještima i Rogovskijevim svitkom pri struji od 86.2 mA i frekvenciji od 75 kHz [24]

5.4. Analiza rezultata mjerenja struje sa Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100) i strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE)

Prije početka svih mjerenja, strujni opsezi Rogovskijevog svitka i strujnih kliješta su postavljeni na opseg 100 mV/A. [24]

Mjerenje 1: Pri prvom mjerenju mjerio se sinusni signal efektivne struje od 1 A i frekvencije 50 Hz, gdje je vodič dodirivao senzor Rogovskijevog svitka. Poznavajući efektivnu struju od 1 A, može se odrediti i maksimalna vrijednost struje, prema izrazu (5-1). Odnosno, maksimalna vrijednost struje iznosi 1.41 A. Maksimalna vrijednost napona se određuje prema izrazu (5-2), te ona tako iznosi 141 mV. Prilikom usporedbe izmjenjenog napona Rogovskijevog svitka i strujnih kliješta, može se vidjeti kako je signal mjeren Rogovskijevim svitkom bliži izračunatoj vrijednosti maksimalnog napona te se može zaključiti kako su mjerenja izvršena pomoću Rogovskijevog svitka bila točnija, te imala manja odstupanja u odnosu na mjerenja izvršena pomoću strujnih kliješta.

$$I_m = \sqrt{2} \times I_{ef} \quad (5-1)$$

$$U_m = \sqrt{2} \times U_{ef} \quad (5-2)$$

Mjerenje 2: U drugom mjerenju mjeren je isti sinusni signal kao i u prvom mjerenju uz postavljanje vodiča u središte Rogovskijevog senzora. Prilikom usporedbe sinusnih oblika dobivenih u prvom i u drugom mjerenju može se vidjeti kako položaj vodiča kod Rogovskijevog svitka utječe na njegovu točnost. Konkretno, moglo se vidjeti kako je u prvom mjerenju Rogovskijev svitak pokazivao veće izmjerene vrijednosti u odnosu na strujna kliješta, dok su u drugom mjerenju izmjerene veličine gotovo identične.

Mjerenje 3: U trećem mjerenju mjeren je sinusni signal efektivne vrijednosti struje približno 0 A i frekvencije 50 Hz. Mjerenje je izvršeno u svrhu utvrđivanja utjecaja vrlo malih struja na izlazni oblik strujnih kliješta i Rogovskijevog svitka. Iz izmjerenih signala vidljivo je kako dolazi do nepravilnosti u obliku signala, odnosno do šumova i kod strujnih kliješta i kod Rogovskijevog svitka. Međutim, uz prisutnost šumova kod oba načina mjerenja, može se zaključiti kako su šumovi manje prisutni kod mjerenja sa strujnim kliještima, prema čemu se može zaključiti da su strujna kliješta bolji izbor za mjerenje vrlo malih vrijednosti struja.

Mjerenje 4: U četvrtom mjerenju mjeren je sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA i frekvencije 10 kHz. Iz izmjerenih vrijednosti vidljivo je kako su i strujna kliješta i Rogovskijev svitak pokazali gotovo jednake vrijednosti koje su približne očekivanoj mjerenoj efektivnoj vrijednosti od 100 mA.

Mjerenje 5: U petom mjerenju mjeren je sinusni signal efektivne vrijednosti 100 mA i frekvencije 20 kHz. Iz izmjerenih signala vidljivo je kako su maksimalne vrijednosti napona signala mjerenih strujnim kliještima i Rogovskijevim svitkom približno 120 mV. Iz navedene maksimalne vrijednosti napona, određuje se efektivna vrijednost napona koja iznosi 85 mV. Može se vidjeti kako izmjerena vrijednost odstupa od očekivane vrijednosti za 15%, što ukazuje na to da pri većim frekvencijama dolazi do smanjene točnosti strujnih kliješta te Rogovskijevog svitka.

Mjerenje 6 i 7: U šestom i sedmom mjerenju mjeren je sinusni oblik efektivne vrijednosti struje 86.2 mA pri frekvencijama od 50 kHz, te 75 kHz. U šestom pa tako i u sedmom mjerenju su bile vidljive oscilacije kod signala mjerenog strujnim kliještima. Iz izmjerenih signala kod frekvencije 50 kHz se može zaključiti kako je amplituda izlaznog napona iznosila 8.6 mV, te kako je strujni opseg kliješta bio postavljen na 100 mV/A, tada je maksimalna vrijednost struje iznosila 86 mA. Poznavanjem maksimalne vrijednosti struje, određuje se efektivna vrijednost struje koja iznosi 61 mA. Usporedbom izmjerene struje i očekivane struje vidi se kako izmjerena struja odstupa od

očekivane za čak 29%, što je značajna razlika u odnosu na prethodno mjerenje. Iz izmjerenih vrijednosti kod frekvencije od 75 kHz vidljivo je kako efektivna vrijednost izlaznog napona iznosi 8.27 mV za mjerenje sa strujnim kliještima, te 13.1 mV za mjerenje s Rogovskijevim svitkom. Dakle, radi se o izmjerenoj efektivnoj vrijednosti od 82.7 mA za mjerenje sa strujnim kliještima, te 131 mA za mjerenje sa Rogovskijevim svitkom. Ukoliko se ove vrijednosti usporede s očekivanom efektivnom vrijednosti struje koja inosi 86.2 mA, može se zaključiti kako je mjerenje Rogovskijevim svitkom odstupalo 52% od očekivane vrijednosti, dok je mjerenje sa strujnim kliještima odstupalo 4% od očekivane vrijednosti.

6. ZAKLJUČAK

Iz ovog završnog rada se može zaključiti kako je svaka opisana metoda mjerenja izmjenične struje specifična na svoj način, te ima svoje prednosti i mane. Može se zaključiti kako je svaka metoda mjerenja dovoljno pouzdana te da se odabir metode mjerenja vrši prema mjestu primjene samog uređaja za mjerenje, odnosno prema uvjetima kojima je izložen uređaj, količini dostupnog prostora, periodičnosti mjerenja, itd. Promatrajući Rogowskijev svitak moglo se zaključiti kako je on uvelike olakšao postupak mjerenja kako zbog svoje male mase, niske cijene, jednostavnosti, mogućnosti mjerenja velikih struja tako i povećanju sigurnosti radi svoje mogućnosti neinvazivnog mjerenja. Analizirajući rezultate prva dva mjerenja struje uz pomoć Rogowskijevog svitka i strujnih kliješta moglo se zaključiti kako je položaj vodiča kod Rogowskijevog svitka imao utjecaj na njegovu izlaznu veličinu, te su u prvom mjerenju izmjerene vrijednosti Rogowskijevog svitka i strujnih kliješta bile gotovo iste, uz mala odstupanja, dok su u drugom mjerenju gdje je vodič bio postavljen u središte Rogowskijevog senzora, rezultati mjerenja bili identični. Prilikom ostalih mjerenja moglo se zaključiti da su oba uređaja imala određeni raspon frekvencije pri kojima su se oni ponašali gotovo identično, te su se njihovi rezultati počeli međusobno razlikovati pri visokim frekvencijama ili pri mjerenju vrlo malih struja.

SAŽETAK

Ovaj završni rad opisuje osnove električne struje, razne medije kroz koje ona protječe i načine protjecanje struje kroz svaki od medija. Također su opisani i rani stadiji određivanja mjerne jedinice koja bi se koristila za mjerenje električne struje, odnosno njene definicije kao i definicija sadašnje mjerne jedinice za mjerenje električne struje. Ovaj završni rad opisuje razne metode mjerenja električne struje, no stavlja fokus na mjerenje električne struje uz pomoć Rogowskijevog svitka koji omogućuje mjerenje struja bez prekida strujnog kruga u kojem se koristi, odnosno neinvazivno mjerenje. Svaka metoda je detaljno opisana i uspoređena sa drugim mogućim metodama mjerenja električne struje.

Ključne riječi: mjerenje struje, mjerna jedinica, Rogowskijev svitak, električna struja

ABSTRACT

CURRENT MEASURING USING A ROGOWSKI COIL

This final paper covers the basics of electricity, various mediums through which electricity can flow and the ways current flows through each of them. Early stages of determining the unit that would be used for measuring electrical current are also explained as well as the most recent definition of the unit used for measuring current. This paper explains various methods for measuring currents, but focuses on current measuring with a Rogowski coil which provides a way to measure currents without breaking up the circuit in which it's used, so called non-invasive measuring. Each method was described in detail and is compared to other available methods of measuring.

Key words: current measuring, unit, Rogowski coil, electricity

LITERATURA

- [1] Luka Ferković, Doktorska disertacija, Precizno mjerenje izmjenične struje Rogovskijevim svitkom, Zagreb, 2007.
- [2] Kuzmanović, B. Ferković, L., Baus, Z., Definicija ampera je zbujujuća, Zagreb, 2007.
- [3] <https://learn.adafruit.com/circuit-playground-a-is-for-ampere/what-is-an-ampere> (4.6.2013)
- [4] <https://www.megatron.de/en/products/shunts/shunt-resistor-sma.html> (25.6.2023)
- [5] <https://www.quora.com/Why-is-skin-effect-only-occurring-on-AC-not-on-DC> (10.3.2017)
- [6] <https://www.dasotec.it/en/services/low-voltage-measurement/measurement-of-ct-ratio-polarity-ohmic-resistance-knee-point/> (5.5.2019)
- [7] https://simple.wikipedia.org/wiki/Current_transformer (8.10.2016)
- [8] <https://www.melexis.com/en/product/mlx92215/hall-latch-high-sensitivity> (28.3.2023)
- [9] Gordan Paradžik, Diplomski rad, Demonstracijski pokusi u magnetizmu, Osijek, 2015.
- [10] <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/12329> (28.9.2022)
- [11] <https://www.kperformance.be/KdFiSM3EngineSpeedMeasurements>
- [12] <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/3/299> (12.3.2021)
- [13] Šumiga I., Grđan M., Huđek J., Termoelektrični moduli – fizikalne osnove i smjernice za uporabu, Varaždin, 2007.
- [14] <https://www.hwlibre.com/bs/fotodetektor/>
- [15] <https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Faraday-effect.svg> (14.4.2007)
- [16] <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4176> (26.9.2019)
- [17] <https://www.conrad.com/p/metrel-a-1227-5-m-clamp-meter-adapter-adc-reading-range-30-3000-a-2536173> (9.5.2023)
- [18] <https://www.rocoil.co.uk/products-rigid-coils/> (20.6.2023)

- [19] https://www.researchgate.net/figure/The-Wien-bridge-oscillator-f-o-1-2pRC-9947-2-Hz-Y-1-1-Z-1-G-pC-Y-2-1-Z-2_fig1_281495131 (1.2001)
- [20] https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Bandpass_Filter.svg (16.10.2008)
- [21] http://www.chuangy.com/en/product_11.html
- [22] <https://community.element14.com/products/eagle/f/forum/28896/pcb-based-rogowski-coil-design-software> (2015)
- [23] <http://www.rogowski.cn/pro.aspx?FId=n3:3:3>
- [24] Igor Šubarić, Završni rad, Mjerenje struje bez prekidanja strujnog kruga, Osijek, 2016.
- [25] <https://www.tek.com/en/sites/default/files/media/media/resources/a621-a622-current-probes-datasheet-60w150813.pdf>
- [26] <https://meter.hu/uploaded/lakatfogo%20adapterek.pdf>

ŽIVOTOPIS

Autor ovog završnog rada, Ivan Đorđić, rođen je u Zagrebu 11.4.2001. godine. Po završetku osnovne škole upisuje se u Tehničku školu Županja u Županji, smjer elektrotehničar. Nakon završetka srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer Elektroenergetika. U slobodno vrijeme bavi se automobilizmom te mehanikom.

Potpis autora