

Mjerenje struje bez prekidanja strujnog kruga

Šubarić, Igor

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:897737>

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 STRUJE BEZ PREKIDANJA STRUJNOG
KRUGA**

Završni rad

Igor Šubarić

Osijek, 2016.



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ETFOS

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu završnog rada na stručnom studiju

Osiijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu završnog rada
na stručnom studiju**

Ime i prezime studenta:

Studij, smjer:

Mat. br. studenta, godina upisa:

Mentor:

Sumentor:

Predsjednik Povjerenstva:

Član Povjerenstva:

Naslov završnog rada:

Primarna znanstvena grana rada:

**Sekundarna znanstvena grana (ili
polje) rada:**

Zadatak završnog rada

**Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita
(završnog rada):**

**Kratko obrazloženje ocjene prema
Kriterijima za ocjenjivanje završnih i
diplomskih radova:**

Primjena znanja stečenih na fakultetu:
Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka:
Jasnoća pismenog izražavanja:
Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku, godine

Potpis predsjednika Odbora:

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:

Studij:

Mat. br. studenta, godina upisa:

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

izrađen pod vodstvom mentora

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
2. ROGOWSKIJEV SVITAK.....	2
2.1. Princip rada.....	2
2.2. Izvedbe uređaja.....	4
2.2.1. Savitljivi Rogowskijev svitak sa integratorom	4
2.2.2. H-svitak s kompenzacijskim obručom i potenciometrom	5
2.2.3. Rogowskijev svitak načinjen od više svitaka spojenih u seriju	6
2.2.4. Rogowskijev svitak načinjen od više svitaka na tiskanim pločicama.....	7
2.2.5. Rogowskijev svitak načinjen na jednoj tiskanoj pločici	7
2.2.6. Rogowskijev svitak načinjen na dvije tiskane pločice.....	8
2.3. Integracija napona.....	9
2.4. Mjerni opseg	9
2.4.1. Strujni mjerni opseg	9
2.4.2. Frekvencijski mjerni opseg	10
2.5. Naponsko-strujna karakteristika	10
2.6. Značajke uređaja.....	11
3. STRUJNA KLIJEŠTA	12
3.1. Princip rada.....	12
3.1.1. Princip rada Hallovog osjetnika	12
3.2. Izvedba uređaja sa Hallovim osjetnikom.....	13
3.3. Značajke Hallovog osjetnika smještenog u strujnim kliještima	14
3.4. Strujni mjerni opseg Hallovog osjetnika smještenog u strujnim kliještima	15
4. STRUJNO OPTIČKI MJERNI PRETVARAČ	16
4.1. Princip rada.....	16
4.2. Izvedbe uređaja.....	17

4.2.1. Strujno optički pretvarač sa optičkim vlaknom	17
4.2.2. Strujno optički pretvarač u obliku prstena	18
4.3. Značajke strujno optičkog mjernog pretvarača	19
5. ANALIZA MJERENJA SA STRUJNIM KLIJEŠTIMA I ROGOWSKIJEVIM SVITKOM .	20
5.1. Uvod u mjerenje	20
5.2. Karakteristike strujnih kliješta (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE) i Rogowskijevog svitka (CHAOVIN ARNOUX A100)	21
5.3. Mjerenja sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE) i Rogowskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100).....	22
5.4. Analiza rezultata mjerenja sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE) i Rogowskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100).....	30
6. ZAKLJUČAK	33
7. LITERATURA.....	34
SAŽETAK.....	35
ABSTRACT	36
ŽIVOTOPIS	37

1. UVOD

Često se pojavljuje potreba izmjeriti trenutnu struju ili snimiti podatke u nekom vremenskom periodu a da se pri tome u postrojenju ne prekida strujni krug. Cilj ovog završnog rada pod nazivom (Mjerenje struje bez prekidanja strujnog kruga) je da pronađemo takve uređaje, opišemo njihov princip rada, izvedbu takvih uređaja i da analiziramo rezultate mjerenja takvih uređaja. U ovom završnom radu opisivati ćemo tri takva uređaja a to su Rogowskijev svitak , strujna kliješta i strujno optički mjerni pretvarač. U prvom dijelu biti će opisan Rogowskijev svitak, njegov princip rada, izvedba uređaja te opis njegovih dijelova kao i njegove karakteristike, a nakon toga će se provesti mjerenja i analiza rezultata mjerenja. U drugom dijelu biti će opisana strujna kliješta, princip rada strujnih kliješta, izvedba te analiza rezultata mjerenja strujnih kliješta. U zadnjem poglavlju biti će opisan princip rada strujno optičkih uređaja kao i njihove izvedbe.

2. ROGOWSKIJEV SVITAK

2.1. Princip rada

Rad Rogovskijevog svitka se zasniva na Amperovom zakonu protjecanja i Faradeyevom zakonu indukcije. U Amperovom zakonu se opisuje magnetsko polje koje se nalazi oko vodiča kroz kojeg protječe struja, a može se izraziti preko formule (2-1).[3]

$$i = \oint \vec{H} d\vec{l} = \int_0^l H \cos \alpha dl \quad (2-1)$$

- i - obuhvaćena struja
- α -kut između vektora magnetskog polja i dl
- H - jakost magnetskog toka
- dl - infinitezimalni dio duljine duž promatrane petlje

Faraday-ev zakon objašnjava razliku potencijala između krajeva Rogovskijevog svitka koja se mijenja promjenom magnetskog polja, a izražava se induciranom elektromotornom silom u svitku (2-2).[3]

$$e_s = \int_0^l e_{dl} n dl = -\mu_0 An \frac{d}{dt} \int_0^l H \cos \alpha dl = -\mu_0 An \frac{di}{dt} \quad (2-2)$$

Mjerenje Rogovskijevim svitkom se izvodi mjerenjem induciranog napona u torusnom svitku koji nastaje zbog promjene magnetskog toka (ϕ) u svitku. Prema Lenzovu pravilu promjenu magnetskog toka (ϕ) uzrokuje mjerena struja. Kako mjerena struja uzrokuje promjenu magnetskog toka (ϕ), ta promjena će uzrokovati promjenu magnetskog toka (ϕ) unutar samoga zavoja svitka što rezultira induciranjem napona na krajevima svitka prema izrazu (2-3).[1]

$$e = -N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2-3)$$

Pri čemu je [1] :

- e - ukupni inducirani napon
- N - broj zavoja svitka
- $d\phi(t)$ - promjena toka unutar jednog namota svitka

- dt- promjena vremena

Zbog različite raspodjela magnetskog toka (ϕ) na različitim udaljenostima od promatranog mjenog vodiča magnetski tok je potrebno gledat kroz infinitezimalni dio presjeka torusnog svitka na udaljenosti (r) prema izrazu (2-4).[1]

$$d\phi = B(r) \cdot a \cdot dr = \mu \cdot H(r) \cdot a \cdot dr \quad (2-4)$$

Kako je magnetski tok ($d\phi$) kroz presjek (dS) razmjerni jakosti magnetskog polja ($H(r)$) neophodno je poznavati raspodjelu tog polja da bi se izračunao napon koji se inducira na krajevima svitka. Vremenski promjenjiva struja kroz jedan zavoj svitka dobije se integracijom po duljini kružnice prema izrazu (2-5).[1]

$$I = H(r) \cdot \int_{2 \cdot r \cdot \pi} dI = H(r) \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad (2-5)$$

Slijedi da se raspodjela magnetskog polja dobije prema izrazu (2-6).[1]

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (2-6)$$

Ako sada izraz (2-4) za magnetski tok ($d\phi$) uvrstimo u izraz za raspodjelu magnetskog polja (2-6) dobijemo magnetski tok na udaljenosti (r) od vodiča prema izrazu (2-7).[1]

$$d\phi = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr \quad (2-7)$$

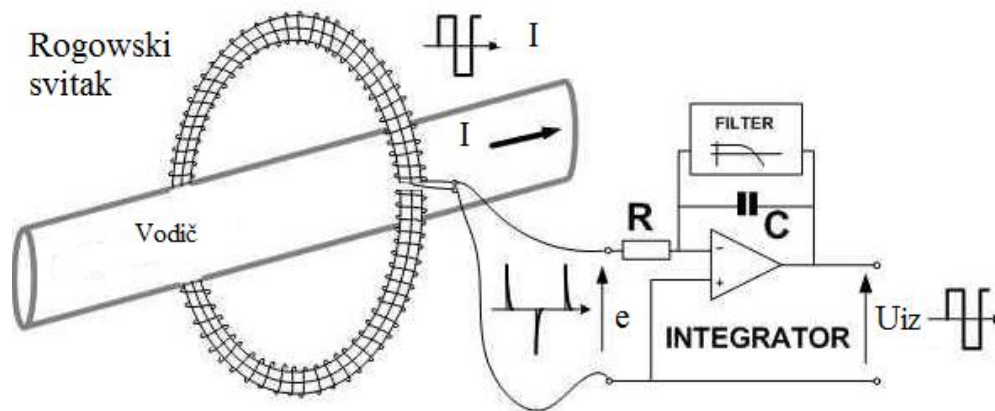
Ukupni tok dobije se integriranjem prema izrazu (2-8).[1]

$$\phi = \int_{r1}^{r2} \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r2}{r1}\right) \quad (2-8)$$

Struja koja teče mjerenim vodičem je vremenski promjenjiva što rezultira promjenjivim tokom kroz torus. I ako sada izraz (2-8) za ukupni tok (ϕ) uvrstimo u izraz Lentzovog pravila (2-3) dobijemo izraz za napon koji se inducira na krajevima svitka (2-9).[1]

$$e(t) = -\frac{N \cdot \mu \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r2}{r1}\right) \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad (2-9)$$

Na taj način možemo promatrati oblik signala struje (slika 2.1.).[5]



Slika 2.1. Rogovskijev svitak princip rada.[5]

2.2. Izvedbe uređaja

Postoji više vrsta izvedbi Rogovskijevog svitaka kao što su jednoslojni ili višeslojni Rogovskijevi svitci, kruti ili savitljivi.[2]

Neke od vrsti Rogovskijevih svitaka [2]:

- Savitljivi Rogovskijev svitak sa integratorom
- H-svitak s kompenzacijskim obručom i potencijetrom
- Rogovskijev svitak načinjen od više svitaka spojenih u seriju
- Rogovskijev svitak načinjen od više svitaka na tiskanim pločicama
- Rogovskijev svitak načinjen na jednoj tiskanoj pločici
- Rogovskijev svitak načinjen na dvije tiskane pločice

2.2.1. Savitljivi Rogovskijev svitak sa integratorom

Rogovskijev svitak je jednoliko i gusto namotan svitak na savitljivoj ne magnetskoj jezgri (od plastike, gume ili kože) nepromjenjiva presjeka. Površina presjeka svitka je najčešće kružnog

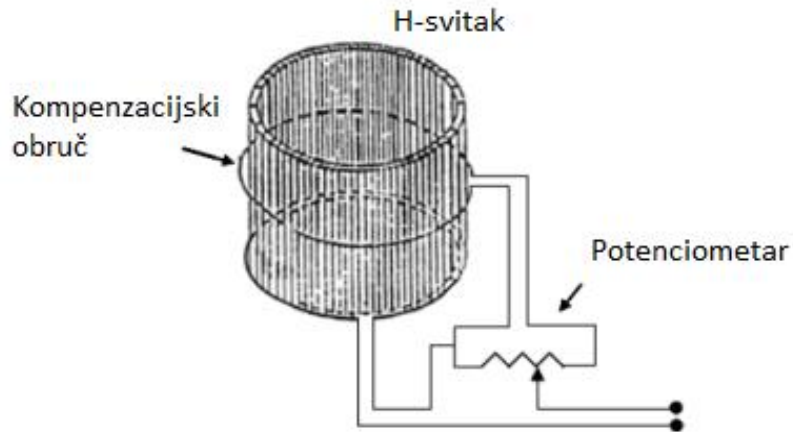
oblika. U većini slučajeva se namata jednoslojno jer je manja nesigurnost utvrđivanja presjeka svitka u odnosu na višeslojne svitke. Krajevi Rogowskijevog svitka moraju biti upleteni jedan do drugog. Jedan kraj Rogowskijevog svitka se provlači kroz sredinu svitka do drugog kraja svitka da bi se poništili utjecaji vanjskih magnetskih polja. Ne uplitanjem krajeva svitka dobili bi petlju velike površine koja bi obuhvaćala susjedna magnetska polja vodiča kroz kojih protječe struja time bi dobili netočne rezultate mjerenja struje kroz željeni vodič (slika 2.2.1.).[2]



Slika 2.2.1. Rogowskijev svitak model FQ-RCTA03.[2]

2.2.2. H-svitak s kompenzacijskim obručom i potencijetrom

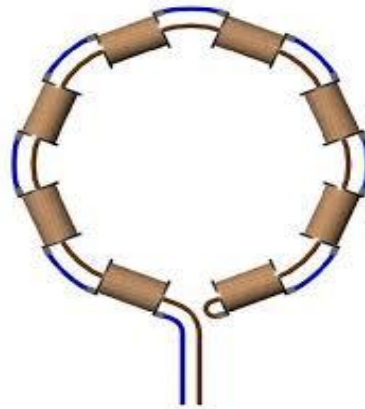
H-svitak napravljen je u toroidalnom obliku i sastoji se od tisuću zavoja koji su smješteni na izolacijskom materijalu. H-svitkom se mogu mjeriti naponi do 10 kilovolti i struje do 200 ampera. H-svitak je zaštićen od utjecaja susjednih magnetskih polja preko kompenzacijskog obruča i potencijetra (slika 2.2.2.).[2]



Slika 2.2.2. H-svitak sa kompenzacijskim obručom i potenciometrom.[2]

2.2.3. Rogovskijev svitak načinjen od više svitaka spojenih u seriju

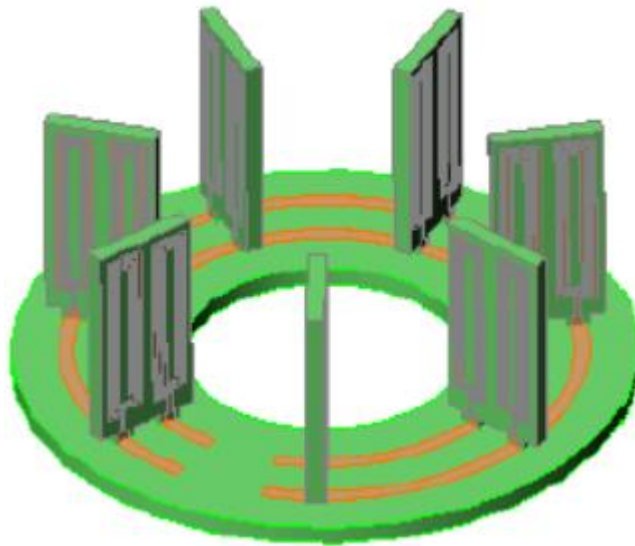
Rogovskijev svitak je napravljen od više svitaka koji su povezani u seriju. Svaki pojedini svitak može imati više slojeva namotane žice kako bi se osigurao dovoljno dobar izlazni napon. Svitci spojeni u seriju mogu se načiniti u obliku toroida. U usporedbi sa klasičnim Rogovskijevim svitcima Rogovskijevi svitci načinjeni od više svitaka spojenih u seriju su manjih dimenzija što je pogodno za mjerenje na mjestima gdje ima malo prostora (slika 2.2.3.).[2]



Slika 2.2.3. Rogovskijev svitak načinjen od više svitaka spojenih u seriju.[2]

2.2.4. Rogowskijev svitak načinjen od više svitaka na tiskanim pločicama

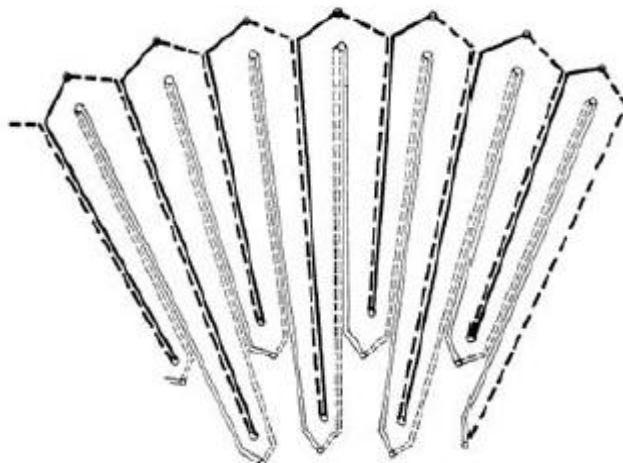
Rogowskijev svitak je načinjen od više svitaka na tiskanim pločicama koji su povezani u seriju na pločicu kružnog oblika. Sve veća uporaba ove izvedbe Rogowskijevog svitka je rezultat veće točnosti, manje osjetljivosti na poziciju vodiča kroz kojeg mjerimo struju, bolja neosjetljivost na susjedna magnetska polja i niži troškovi proizvodnje (slika 2.2.4.).[2]



Slika 2.2.4. Rogowskijev svitak načinjen od više svitaka na tiskanim pločicama.[2]

2.2.5. Rogowskijev svitak načinjen na jednoj tiskanoj pločici

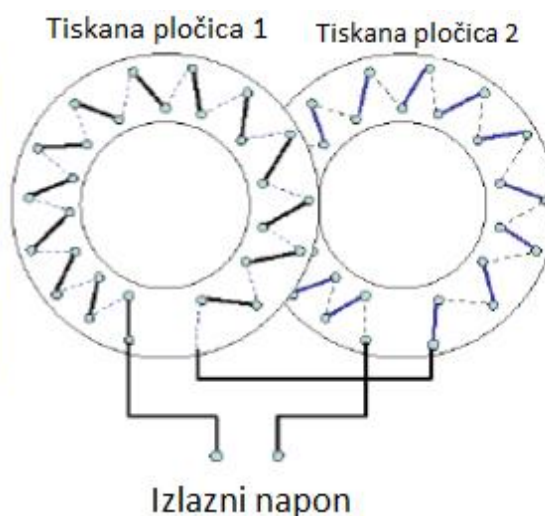
Svitak je načinjen od dva svitka koji su smješteni na jednoj tiskanoj pločici u suprotnim smjerovima kako bi se poništi utjecaj susjednih magnetskih polja (slika 2.2.5.).[2]



Slika 2.2.5. Rogovskijev svitak načinjen na jednoj tiskanoj pločici.[2]

2.2.6. Rogovskijev svitak načinjen na dvije tiskane pločice

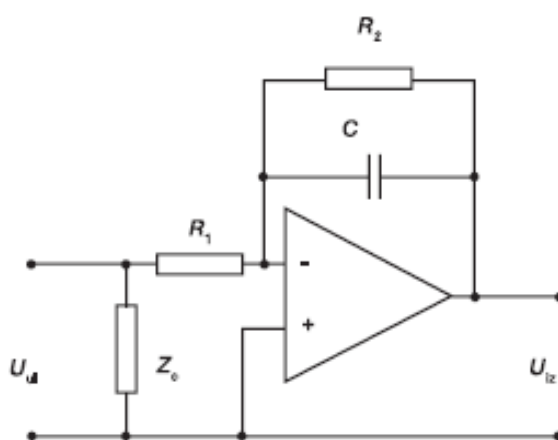
Svitak je načinjen na dvije tiskane pločice koje su međusobno spojene. Svaka pločica je premazana izolirajućim materijalom. Svitci su smješteni u suprotnim smjerovima kako bi se smanjio utjecaj susjednih magnetskih polja. Izlazni napon kod ovakvih izvedbi Rogovskijevih svitaka je manji od izlaznog napona Rogovskijevih svitaka koji su načinjeni od žice namotane na ne magnetsku jezgru. Međutim ovakva izvedba Rogovskijevog svitka na tiskanoj pločici omogućava precizniju izradu svitka što rezultira većom točnošću i manjom osjetljivošću na susjedna magnetska polja (slika 2.2.6.).[2]



Slika 2.2.6. Rogowskijev svitak načinjen na dvije tiskane pločice.[2]

2.3. Integracija napona

Integracija napona pri mjerenjima sa Rogowskijevim svitkom se najčešće izvodi aktivnim elektroničkim integratorima, a u novije vrijeme sve se više koriste integratori za digitalnu obradu signala osim nekih specijalnih laboratorijskih mjerenja gdje su potrebni pasivni integratori induciranog napona. Pri mjerenju malih struja osim integracije induciranog napona potrebno je pojačati inducirani napon da bi se uspješno moglo odraditi mjerenje (slika 2.3.).[3]



Slika 2.3. Osnovni sklop za integraciju.[1]

2.4. Mjerni opseg

2.4.1. Strujni mjerni opseg

Rogowskijevim svitkom mogu se mjeriti trenutne vrijednosti struje, strujni impulsi strmine do 109 A/s i izmjenične struje od nekoliko stotina ampera do nekoliko stotina kilo ampera. Ta prednost proizlazi iz toga što međuinuktiviteta između Rogowskijevog svitka i vodiča ne ovisi o iznosu mjerene struje pa je karakteristika skoro linearna.[3]

Ograničavajući faktori [3]:

- Dinamički opseg integratora

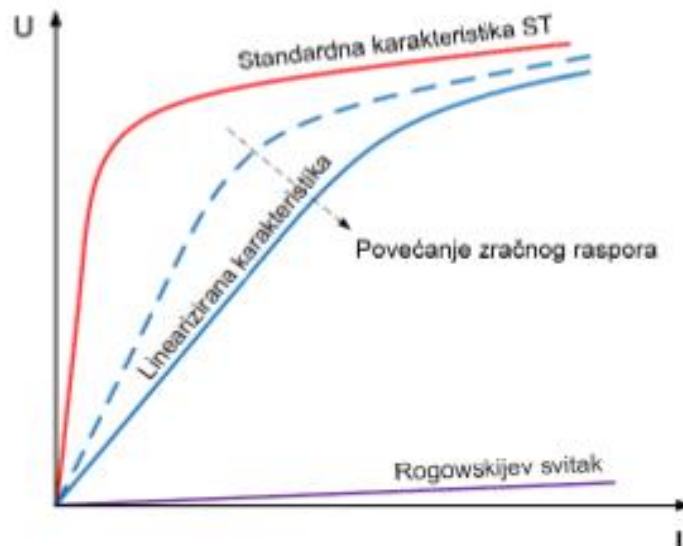
- Dielektrična čvrstoća izolacije namota

2.4.2. Frekvencijski mjerni opseg

Rogovskijevim svitkom mogu se mjeriti struje od 0,1 Hz do 16 MHz. Pri mjerenju struja visokih frekvencija potrebno je upotrijebiti specijalne vrste svitaka i integratora. Opseg frekvencija Rogovskijevog svitka izrađenog za mjerenje pogonskih struja je u rasponu od nekoliko herca do nekoliko stotina kilo herca.[3]

2.5. Naponsko-strujna karakteristika

U usporedbi sa klasičnim strujnim mjernim transformatorima sa magnetskom jezgrom koji imaju nelinearnu naponsko-strujnu karakteristiku zbog zaostalog remanentnog magnetizma i zbog toga što im magnetska jezgra može doći u zasićenje Rogovskijev svitak je izrađen na ne magnetskoj jezgri koja ne može doći u zasićenje. Njegov međuinduktivitet između svitka i vodiča kroz koji teče struja koju mjerimo ne ovisi o mjerenoj struji pa dobijemo linearnu karakteristiku u cijelom mjerenom području (slika 2.5.).[3]



Slika 2.5. Naponsko-strujne karakteristike strujnog transformatora i Rogovskijevog svitka.[3]

2.6. Značajke uređaja

Prednost Rogovskijevog svitka je u tome što nema feromagnetsku jezgru odnosno linearna ovisnost između struje i induciranog napona. Iz te ovisnosti proizlaze dobre karakteristike kao što su širok mjerni opseg kao i frekvencijski opseg. Rogovskijev svitak je sklop malih dimenzija i vrlo jednostavan sklop.[1]

Prednosti Rogovskijevog svitka (di/dt pretvarača) pred strujnim mjernim pretvaračima sa feromagnetskom jezgrom [1]:

- Jednostavnost izvedbe
- Male dimenzije
- Mala masa
- Niska cijena
- Jednostavna ugradnja
- Linearni fazni odziv
- Niska potrošnja samog uređaja
- Mogućnost mjerenja vrlo visokih struja
- Niski temperaturni pomak

3. STRUJNA KLIJEŠTA

3.1. Princip rada

Rad strujnih kliješta se zasniva po načelu strujnog transformatora ili Hallovo osjetnika. Pri mjerenju izmjeničnih vrijednosti struje po načelu strujnog transformatora princip rada strujnih kliješta zasniva se na principu magnetske indukcije. Prolazak izmjenične struje kroz mjereni vodič stvara promjenjivo magnetsko polje oko vodiča koje je razmjerno prolasku jakosti izmjenične struje. Strujni transformator koji se nalazi u strujnim kliještima transformira jakost mjerene struje pogodnu za očitavanje.[6]

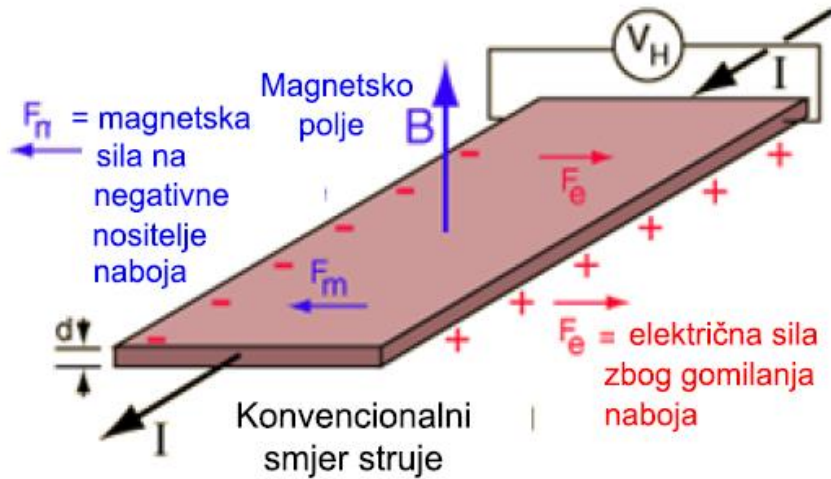
Pri mjerenju istosmjerne vrijednosti struje oko vodiča se ne stvara promjenjivo magnetsko polje te jakost mjerene struje kroz vodič se ne može mjeriti na principu strujnog transformatora. Istosmjerna struja se mjeri na načelu rada Hallovo osjetnika. Prolaskom istosmjerne struje kroz mjereni vodič se stvara magnetsko polje koje je razmjerno jakosti struje kroz mjereni vodič. Hallov napon razmjernan je umnošku struje kroz osjetnik i na nju okomitog magnetskog polja. Pri mjerenju izmjeničnih vrijednosti struje potrebno je dodati sklopove za pretvorbu signala u digitalne oblike zbog daljnje obrade signala.[1,6]

3.1.1. Princip rada Hallovo osjetnika

Načelo rada Hallovo osjetnika se bazira na Lorentzovom pravilu koje govori da magnetsko polje (B) djeluje na nosioce naboja ako se u njegovom polju nalazi vodljiva pločica debljine (d) kroz koju protječe struja (I), prema izrazu (3-1).[1]

$$F_m = -q \cdot V_d \times B \quad (3-1)$$

Na naboj djeluje Lorentzova sila koja je okomita na smjer struje i magnetskog polja. Struja uzrokuje nakupljanje naboja naboja na jednom rubnom dijelu pločice što rezultira javljanjem napona na rubovima pločice koji se naziva Hallov napon (slika 3.1.1.) i određuje se prema izrazu (3-2).[1]



Slika 3.1.1. Načelo rada Hallovog osjetnika.[4]

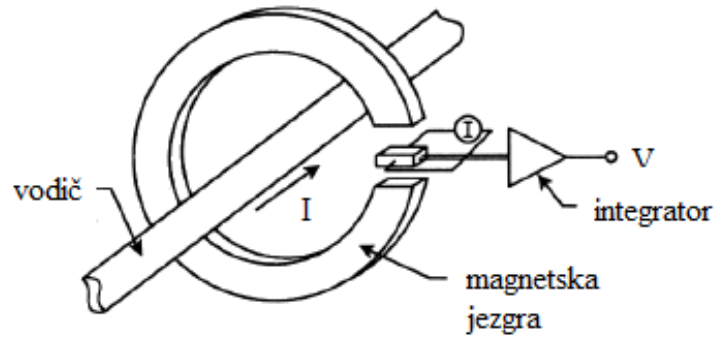
$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} \quad (3-2)$$

Pri čemu je [4]:

- I- jakost struje kroz pločicu
- B- jakost magnetskog polja
- n- gustoća nositelja naboja
- e- elementarni naboj
- d- debljina vodljive pločice

3.2. Izvedba uređaja sa Hallovim osjetnikom

Hallov osjetnik se izrađuje od poluvodičkih elemenata (iridij, iridij-arsen, antimon itd.) malih je dimenzija i najčešće je izrađen kao zaliven termootporni kvadar. Hallov osjetnik se ugrađuje u zračni raspor jezgre strujnih kliješta koji je spojen sa integratorom (pojačivačem signala) radi daljnje obrade signala (slika 3.2.).[1]



Slika 3.2. Hallov osjetnik smješten u zračnom rasporu magnetske jezgre kliješta.[7]

3.3. Značajke Hallovog osjetnika smještenog u strujnim kliještima

Hallov osjetnik ima sposobnost mjerenja istosmjernih i izmjeničnih vrijednosti struja, te struja složenih valovitih oblika. Pogodni su za mjerenje izrazito velikih struja, a da pri tome ne stvaraju gubitke u strujnom krugu čiju struju mjere. Otporni su na prekostrujna opterećenja te se vrlo često primjenjuju u praksi.[7]

Prednosti Hallovog osjetnika [1,4,7]:

- Male dimenzije
- Galvanska izolacija izlaza
- Cijena
- Mala potrošnja
- Mala masa
- Za izmjeničnu i istosmjernu struju
- Jednostavnost izvedbe
- Jednostavna ugradnja

Nedostaci Hallovog osjetnika [7]:

- Slaba linearnost

- Vrijeme odziva
- Ovisnost preciznosti mjerenja o temperaturi
- Visokofrekvencijski gubici zbog vrtložnih struja

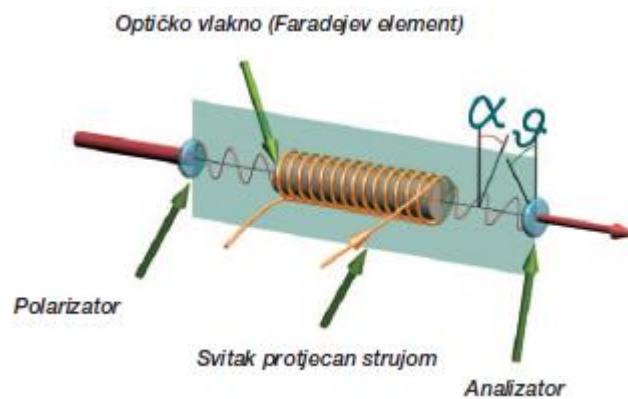
3.4. Strujni mjerni opseg Hallovog osjetnika smještenog u strujnim kliještima

Nazivne struje Hallovog osjetnika su u granicama od nekoliko ampera do 10 kA. Hallov osjetnik je izveden tako da može izdržati kratkotrajne impulse struje koji su 5-10 puta veći od najveće mjerljive vrijednosti struje. Mjerna pogreška Hallovog osjetnika je u vrijednostima od $\pm 3\%$ koja je uzrokovana zbog [7]:

- Magnetskog pomaka
- Greške usred pojačanja i nelinearnosti
- Pomaka Hallovog elementa
- Šuma
- Opadanja amplitude i faznog pomaka kada se dostigne granica frekvencijskog opsega

4. STRUJNO OPTIČKI MJERNI PRETVARAČ

Rad strujni optički pretvarači su uređaji koji svoj rad zasnivaju na zakretanju kuta polarizacije svjetlosti kada polarizirana svjetlost prolazi kroz magnetsko polje koje je okomito na smjer širenja svjetlosti. Takav efekt naziva se Faraday-ev efekt (slika 4.).[1]



Slika 4. Faraday-ev efekt.[1]

4.1. Princip rada

Pomoću svjetlovodnog kabela se dovodi svjetlost u kristal kroz polarizator, a odvodi se u elektronički uređaj za mjerenje promjene intenziteta svjetlosti preko svjetlovoda kroz analizator. Promjena jakosti svjetla je posljedica zakreta polarizacijske osi kroz analizator. Zbog magnetskog polja mjerenog vodiča se zakreće polarizirana svjetlost što se očituje promjenom intenziteta svjetlosti kroz svjetlovod u elektroničkom mjerачu izlaznog intenziteta prema izrazu (4-1).[1]

$$I_{iz} = I_{ul} \cdot \cos^2(\vartheta - \alpha) \quad (4-1)$$

Gdje je [1]:

- I_{iz} - izlazni intenzitet svjetlosti
- I_{ul} - ulazni intenzitet svjetlosti
- α - kut zakreta polarizacijske ravnine zbog djelovanja magnetskog polja

- θ - kut zakreta polarizacijske ravnine analizatora prema ravnini polarizatora

Kut zakreta polarizacijske ravnine koji nastaje zbog djelovanja magnetskog polja mjenog vodiča (α) se izražava preko formule (4-2).[1]

$$\alpha = C \cdot l \cdot H \quad (4-2)$$

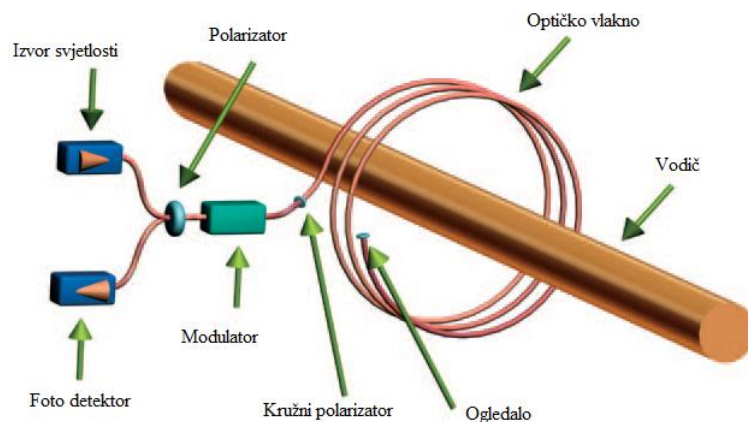
Pri čemu je [1]:

- C- Verdetova konstanta optičkog materijala
- l- efektivna duljina svjetlosne zrake
- H- magnetsko polje svitka protjecano mjenom strujom

4.2. Izvedbe uređaja

4.2.1. Strujno optički pretvarač sa optičkim vlaknom

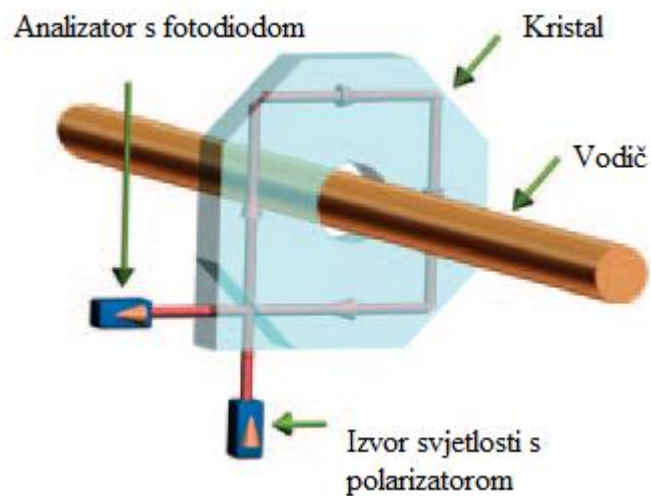
Izvor svjetlosti prolazi kroz modulator i kružni polarizator preko polarizatora svjetlosti. Koja nakon toga ide kroz optičko vlakno koje je napravljeno od više zavoja i odbija se od ogledalo koje je spojeno na kraju optičkog vlakna i vraća se preko optičkog vlakna do detektora izlazne svjetlosti kroz modulator (slika 4.2.1.).[1]



Slika 4.2.1. Strujno-optički pretvarač sa optičkim vlaknom.[4]

4.2.2. Strujno optički pretvarač u obliku prstena

Strujno- optički pretvarači su često izrađeni u obliku prstena od kristala. Njihov rad se zasniva na refleksiji tako da svjetlost obiđe mjereni vodič na što manjoj udaljenosti. Takva izvedba strujno- optičkog pretvarača povećava točnost mjerenja, smanjuje utjecaj susjednih magnetskih polja i smanjenje geometrijskih odstupanja toplinskih širenja (slika 4.2.2.).[1]



Slika 4.2.2. Strujno-optički pretvarač u obliku prstena.[4]

Polarizacijske ravnine si međusobno zakrenute za 45° pa se struja određuje po sljedećem izrazu (4-3).[1]

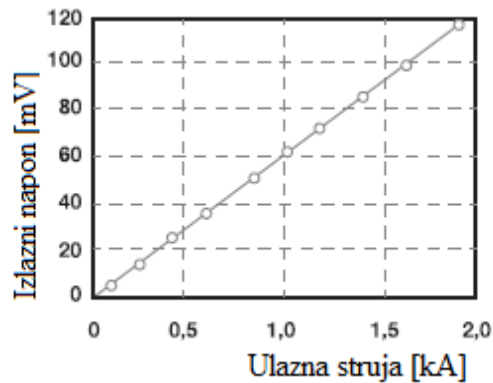
$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(2C \cdot I(t))] \quad (4-3)$$

Gdje je [1]:

- I - intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator
- I_m - početni intenzitet svjetlosti
- C - Verdetova konstanta optičkog materijala

4.3. Značajke strujno optičkog mjernog pretvarača

Najvažnije obilježje koje opisuje strujno optički mjerni pretvornik je linearna ovisnost ulazne veličine (struje) o izlaznoj veličini (naponu), (slika 4.3.).[1]



Slika 4.3. Ulazno izlazna karakteristika.[1]

Prednosti strujno optičkih mjernih pretvarača u usporedbi sa strujnim transformatorima sa magnetskom jezgrom [1, 4]:

- Linearnost
- Male dimenzije
- Mala masa
- Velika osjetljivost na promjene
- Ne proizvode elektromagnetske smetnje
- Nema opasnosti od eksplozije
- Široki spektralni pojas

Nedostaci strujno optičkih pretvarača [4]:

- Relativno visoka cijena
- Samo za nova postrojenja

5. ANALIZA MJERENJA SA STRUJNIM KLIJEŠTIMA I ROGOWSKIJEVIM SVITKOM

5.1. Uvod u mjerenje

Mjerenje se odvijalo u zgradi Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku uz nadzor mentora. Cilj mjerenja je analiza ponašanja uređaja za mjerenje struje bez prekidanja strujnog kruga pri različitim iznosima i oblicima struje i pri različitim iznosima frekvencija. Mjerenja su izvršena sa dva takva uređaja: strujna kliješta (slika 5.1.1.), Rogowskijev svitak (slika 5.1.2.).



Slika 5.1.1. Strujna kliješta - Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE



Slika 5.1.2. Rogovskijev svitak - CHAOVIN ARNOUX A100

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

Tablica 1. Karakteristike strujnih kliješta - Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE. [8,9]

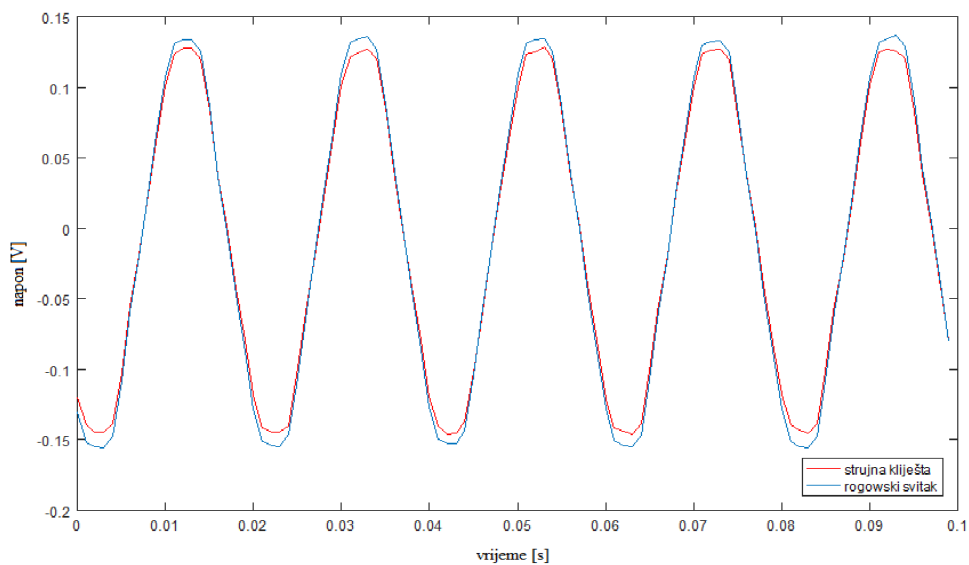
Karakteristike:	Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE:
Strujni opseg	10 mV/A, 100 mV/A
Frekvencijski opseg	istosmjerni signal do 100 kHz
Maksimalna ulazna struja	100 A vršno, 70 A efektivno
Radna temperatura	0 °C - +50 °C, +32 - +122 F
Maksimalni promjer mjenog vodiča	11.8 mm
Maksimalni napon mjenog vodiča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

Tablica 2. Karakteristike Rogovskijevog svitka – CHAOVIN ARNOUX A100. [10,11]

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			

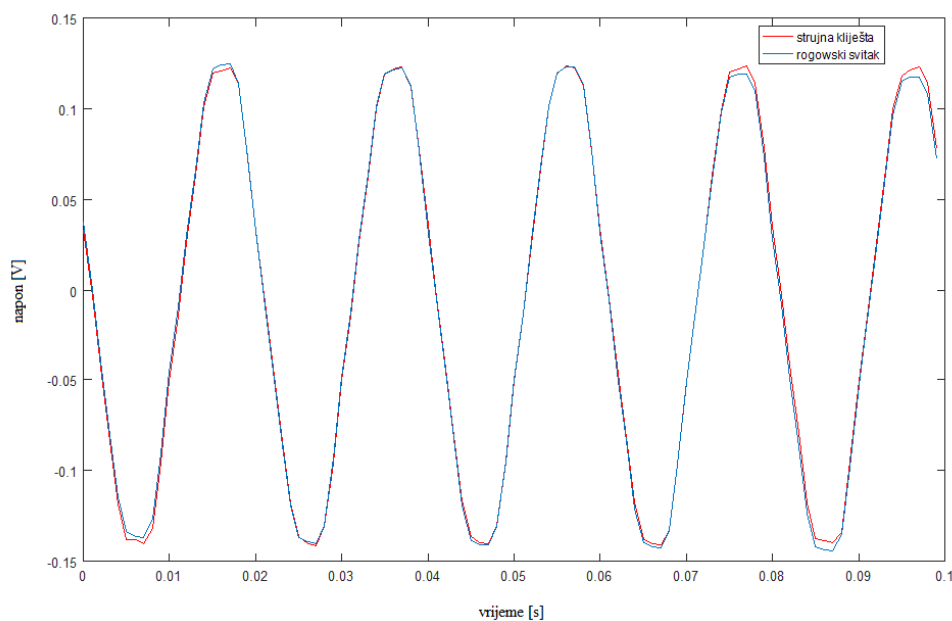
5.3. Mjerenja sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE) i Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100)

Mjerenje 1: Mjereni sinusni signal efektivne vrijednosti struje 1 A , frekvencije 50 Hz. Mjereni vodič dodiruje senzor Rogovskijevog svitka. U ovom slučaju strujna kliješta i Rogovskijev svitak mjere približno jednako, (slika 5.3.1.).



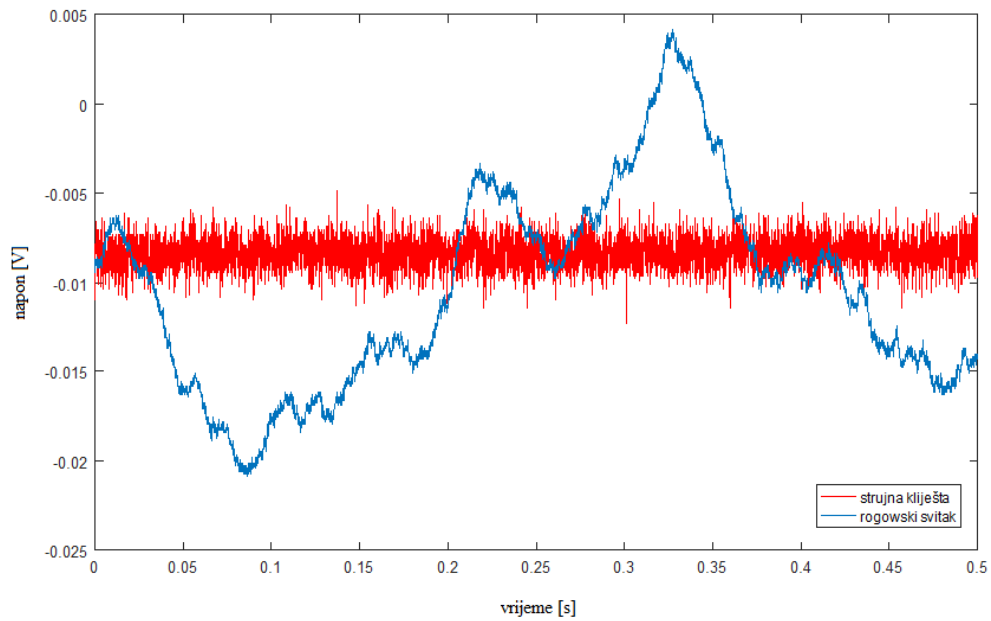
Slika 5.3.1. Sinusni signal izmjeren sa strujnim klijestima i Rogovskijevim svitkom kada mjereni vodič dodiruje senzor Rogovskijevog svitka

Mjerenje 2: Mjereni sinusni signal efektivne vrijednosti struje 1 A, frekvencije 50 Hz. Mjereni vodič je u središtu Rogovskijevog senzora. U ovom slučaju strujna klijesta i Rogovskijev svitak mjere jednako uz još manje pogreške, (slika 5.3.2.).



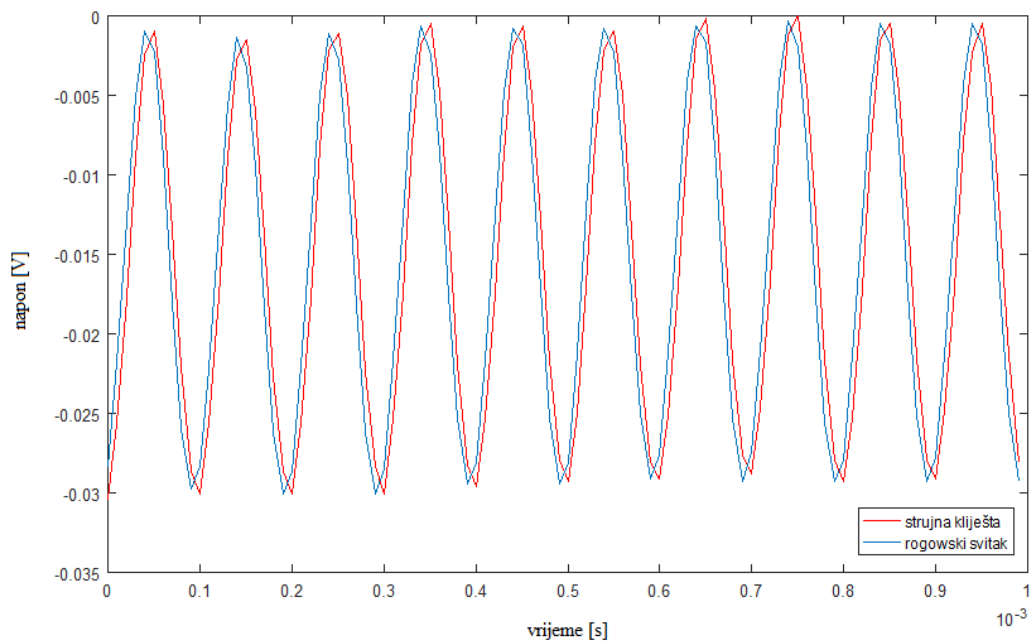
Slika 5.3.2. Sinusni signal izmjeren sa strujnim klijestima i Rogovskijevim svitkom kada je mjereni vodič u središtu senzora Rogovskijevog svitka.

Mjerenje 3: Mjereni sinusni signal efektivne vrijednosti struje 0 A, frekvencije 50 Hz pri ulaznom naponu od 0 V. Vidljivo je iz dobivenog signala da se javljaju šumovi kod Rogovskijevog svitka pri niskim frekvencijama, (slika 5.3.3.).



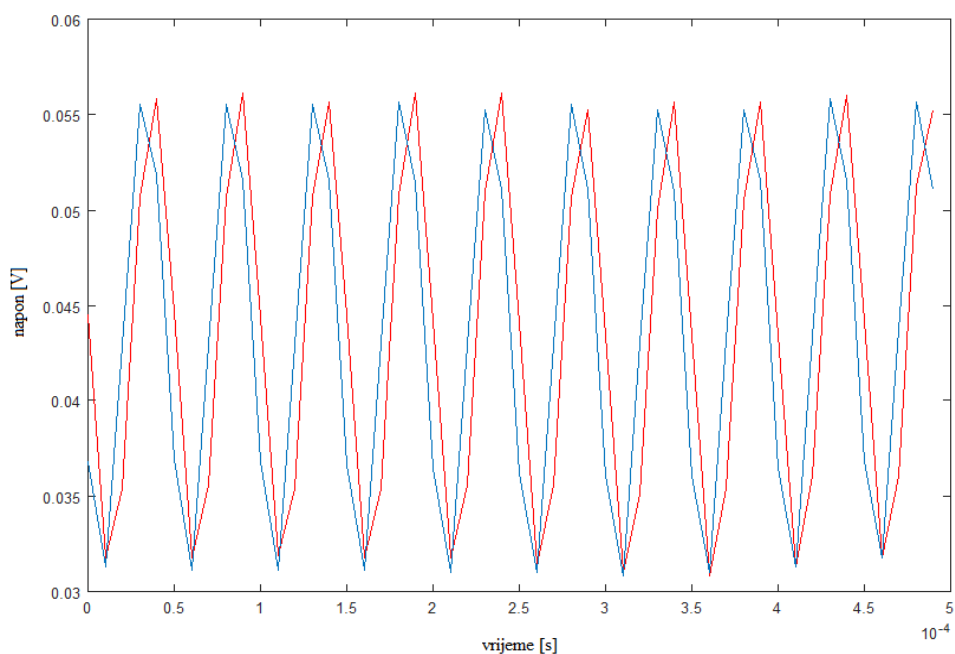
Slika 5.3.3. Šumovi

Mjerenje 4: Mjereni sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 10 kHz. U ovom slučaju strujna kliješta i Rogovskijev svitak mjere približno jednako, (slika 5.3.4.).



Slika 5.3.4. Sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, 10 kHz

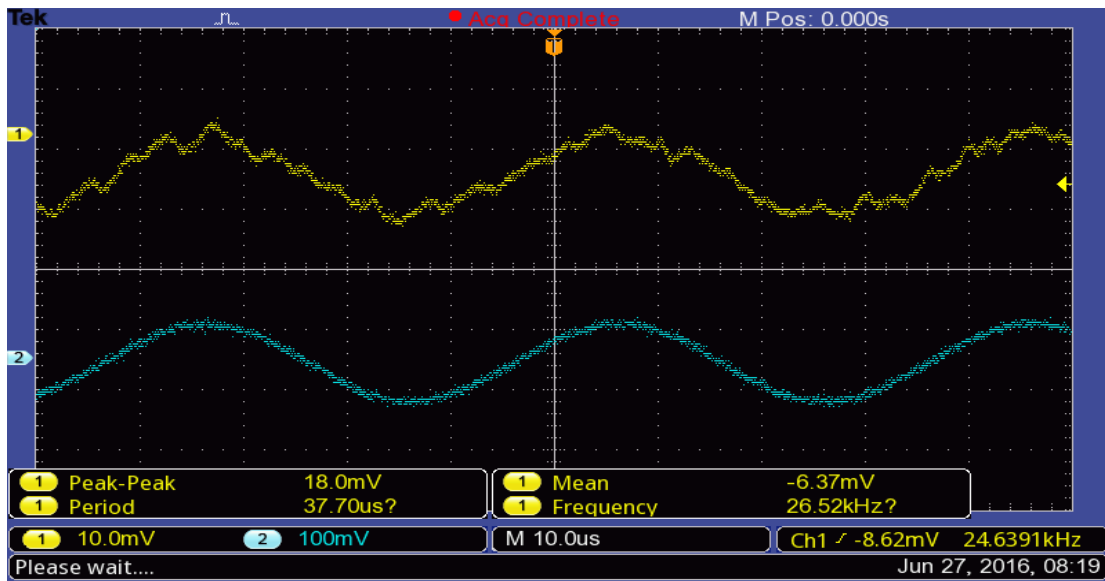
Mjerenje 5: Mjereni sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 20 kHz. U ovom slučaju strujna kliješta i Rogovskijev svitak mjere približno jednako, (slika 5.3.5.).



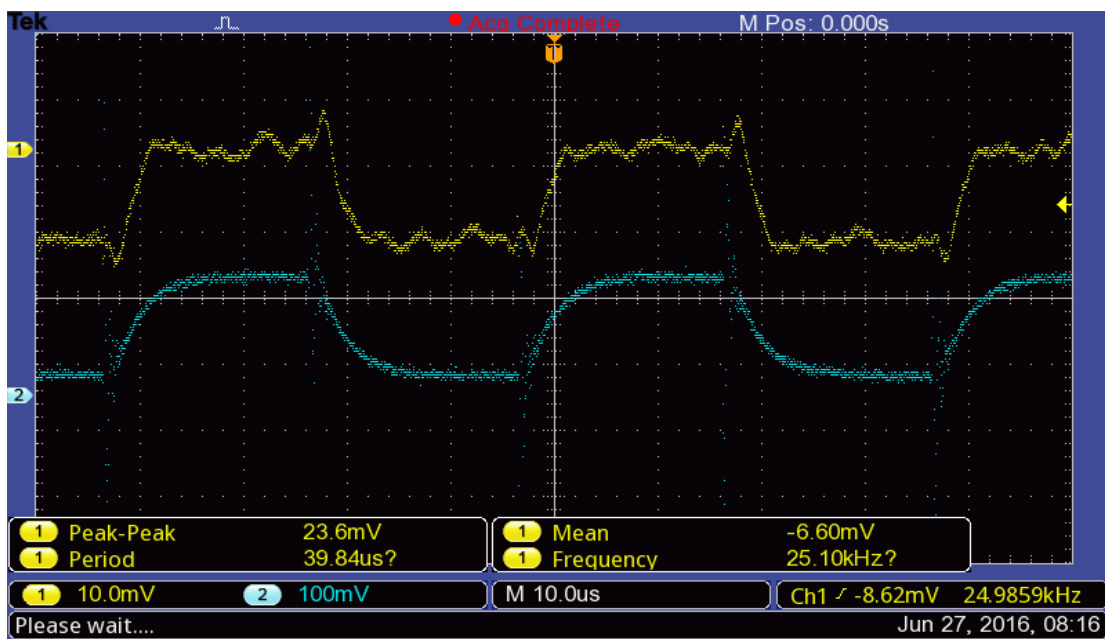
Slika 5.3.5. Sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, 20 kHz

U narednim slučajevima pri mjerenju struja visokih frekvencija vidljivo je da dolazi do izobličenja signala posebno kod pravokutnog signala. Najviše izobličenje se javlja kod strujnih kliješta.

Mjerenje 6: Mjereni sinusni signal (slika 5.3.6.) i pravokutni signal (slika 5.3.7.) efektivne vrijednosti struje 86.2 mA, frekvencije 25 kHz, (Rogowskijev svitak plavi signal strujna kliješta žuti signal).

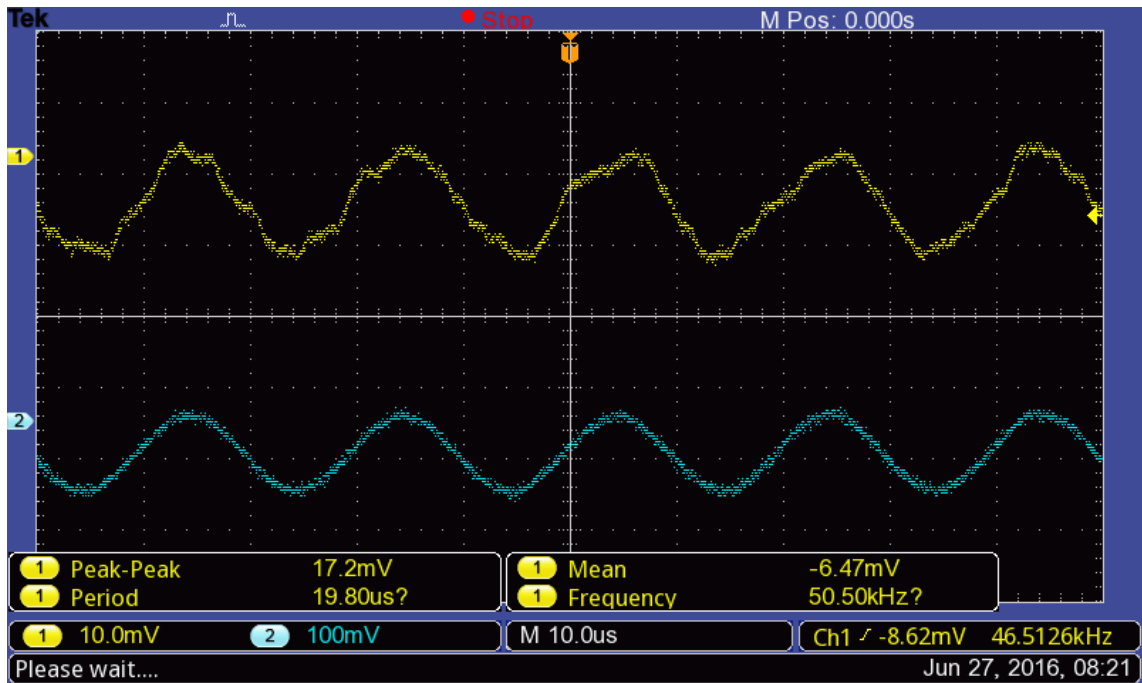


Slika 5.3.6. Sinusni signal

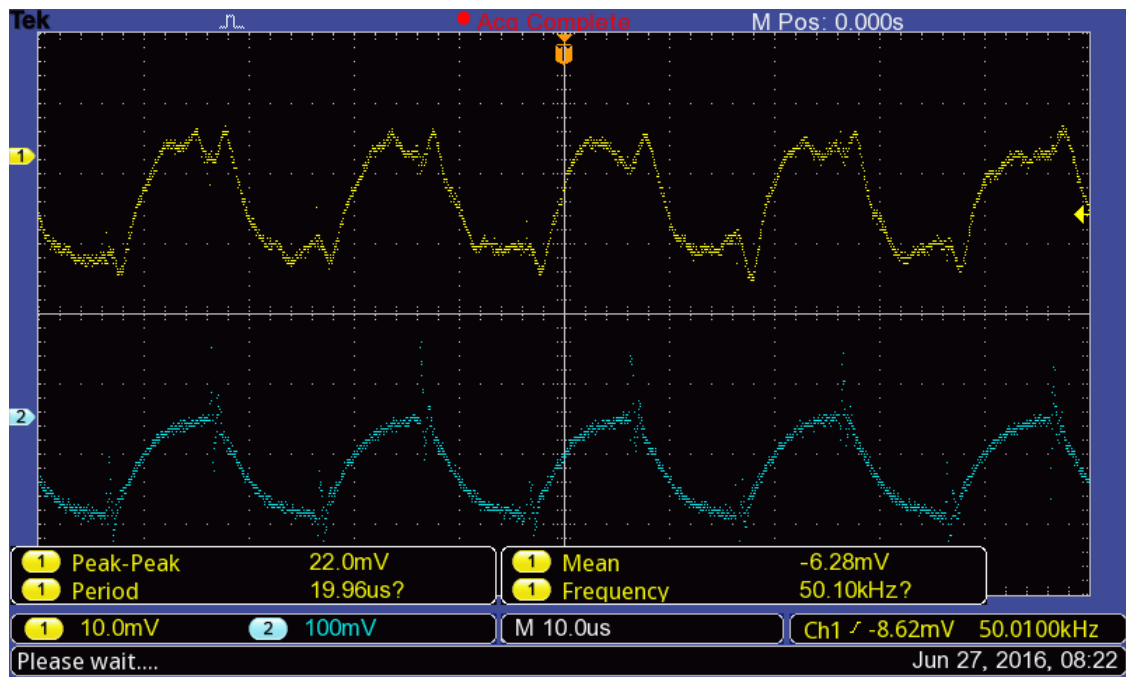


Slika 5.3.7. Pravokutni signal

Mjereni sinusni signal (slika 5.3.8.) i pravokutni signal (slika 5.3.9.) efektivne vrijednosti struje 86.2 mA, frekvencije 50 kHz, (Rogowskijev svitak plavi signal strujna kliješta žuti signal).

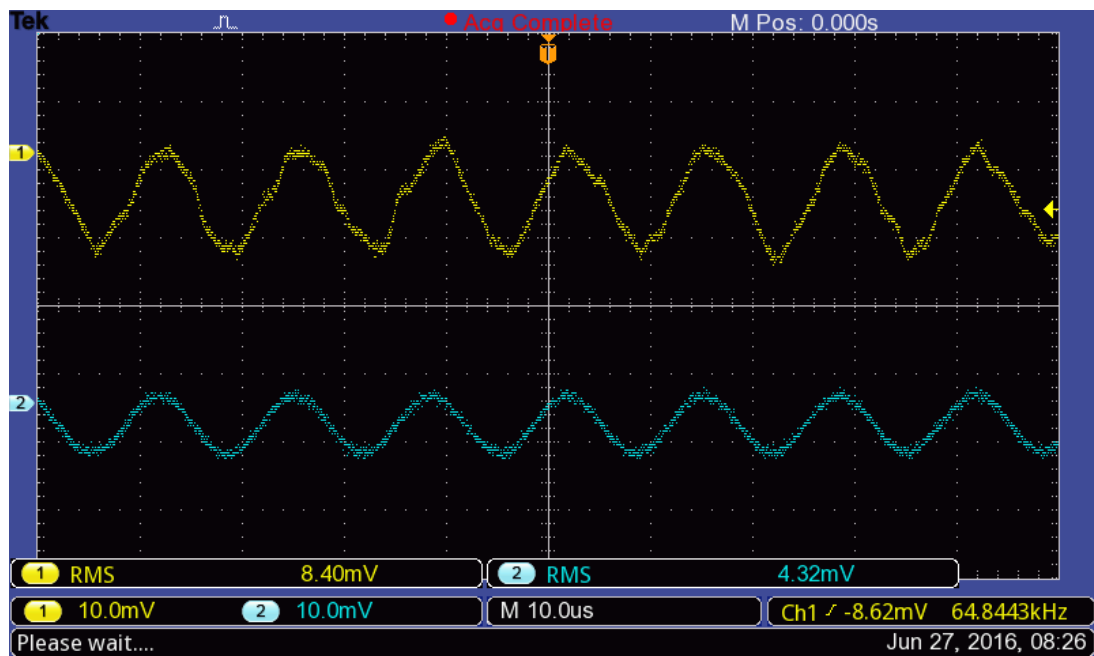


Slika 5.3.8. Sinusni signal

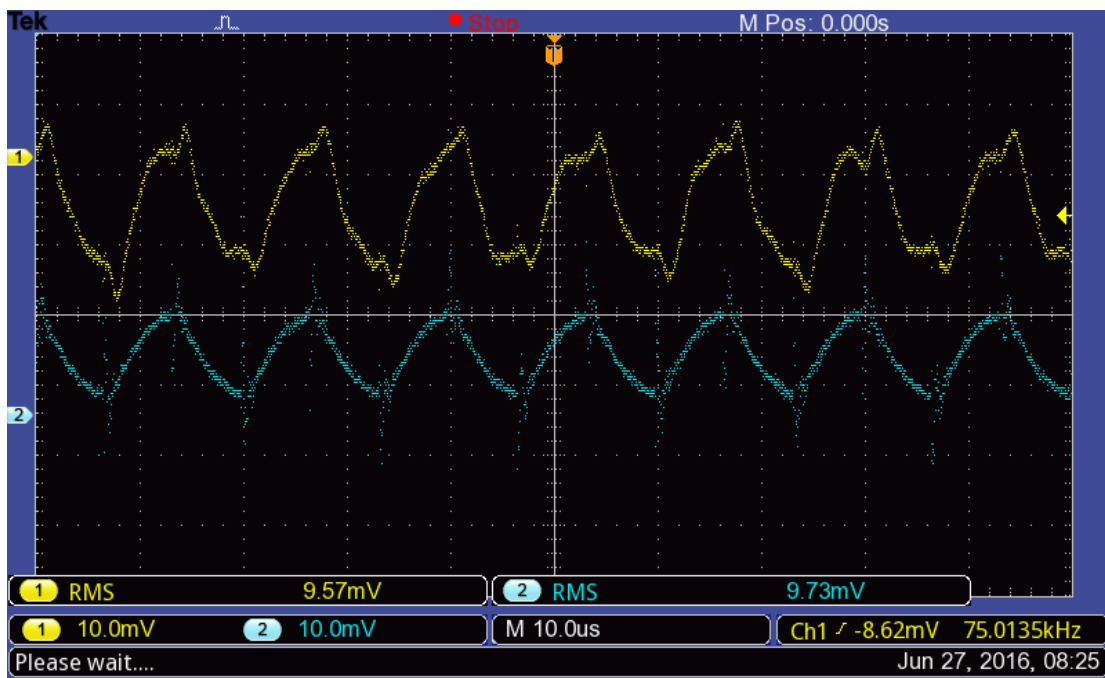


Slika 5.3.9. Pravokutni signal

Mjereni sinusni signal (slika 5.3.10.) i pravokutni signal (slika 5.3.11.) efektivne vrijednosti struje 86.2 mA, frekvencije 75 kHz, (Rogowskijev svitak plavi signal, strujna kliješta žuti signal).

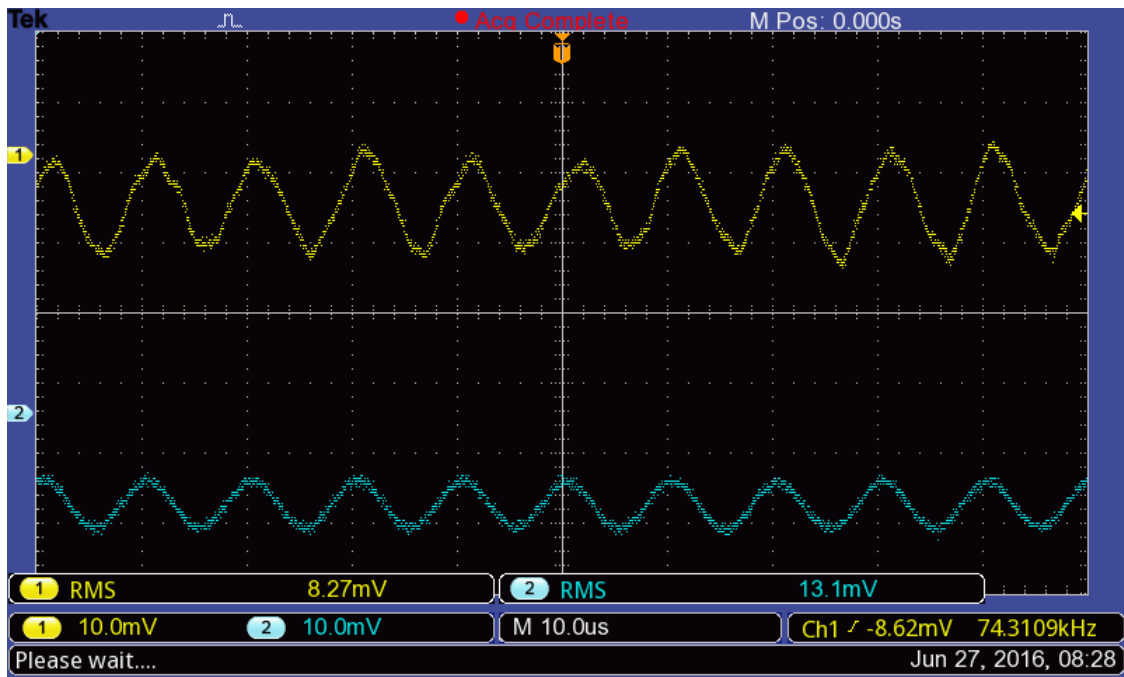


Slika 5.3.10. Sinusni signal

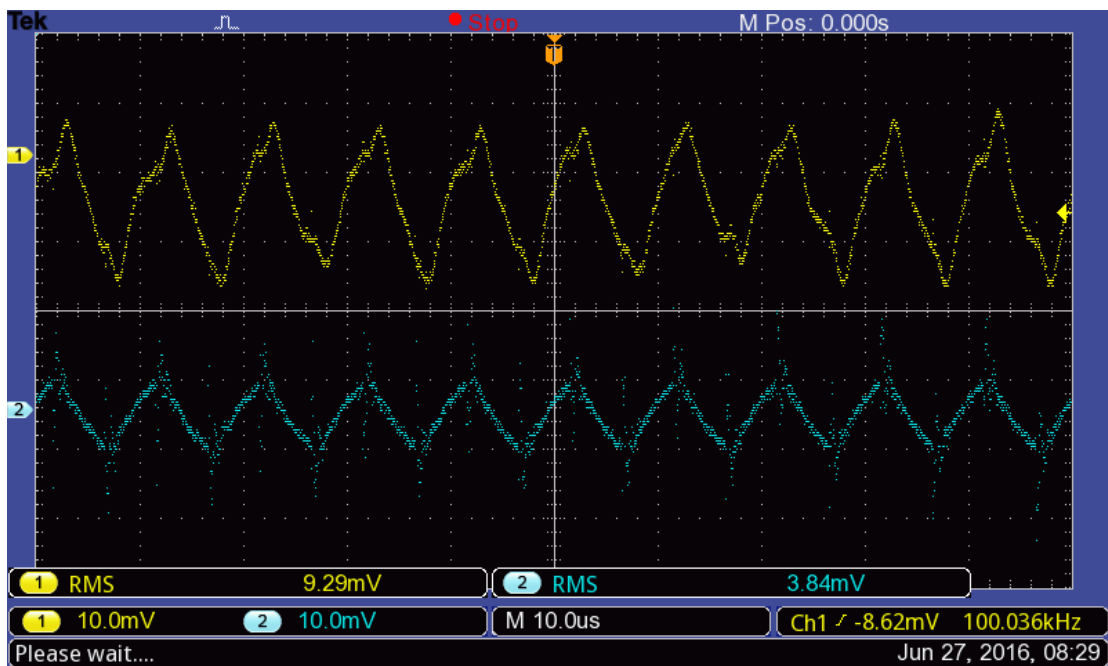


Slika 5.3.11. Pravokutni signal

Mjereni sinusni signal (slika 5.3.12.) i pravokutni signal (slika 5.3.13.) efektivne vrijednosti struje 86.2 mA, frekvencije 100 kHz, (Rogowskijev svitak plavi signal strujna kliješta žuti signal).



Slika 5.3.12. Sinusni signal



Slika 5.3.13. Pravokutni signal

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

Prije samog početka mjerenja postavljeni su strujni opsezi strujnih kliješta i Rogovskijevog svitka na opseg 100 mV/A.

Mjerenje 1:

U mjerenju 1 se strujnim kliještima i Rogovskijevim svitkom mjerio sinusni signal efektivne vrijednosti struje od 1 A i frekvencije 50 Hz, gdje je vodič kroz kojeg se mjeri struja dodirivao senzor Rogovskijevog svitka. Maksimalna vrijednost efektivne vrijednosti struje od 1 A je za korijen iz dva puta veća i iznosi 1.41 A prema izrazu(5-1). Prema tome vrijednost amplitude izlaznog signala napona treba iznositi 141 mV. Iz dobivenog oblika signala koji je prikazan preko programa vidljivo je da se amplituda dobivenog signala izlaznog napona strujnih kliješta nalazi između 135-145 mV, a amplituda signala izlaznog napona dobivena Rogovskijevim svitkom nalazi između 140-155 mV. Iz tih dobivenih signala vidljivo je da je signal izlaznog napona dobiven sa strujnim kliještima točniji i manjih odstupanja nego dobiveni signal izlaznog napona Rogovskijevog svitka.

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

Mjerenje 2:

U mjerenju 2 mjereno je isti sinusni signal kao i u prethodnom mjerenju 1 pri drugačijem položaju mjenjenog vodiča. Vodič se nalazi u središtu Rogovskijevog senzora (ne dodiruje senzor Rogovskijevog svitka). Mjerenje je izvršeno da bih se vidio utjecaj položaja mjenjenog vodiča na izlazni signal napona Rogovskijevog svitka kada vodič dodiruje senzor svitka i kada je u središtu (ne dodiruje senzor svitka). Iz dobivenih oblika signala vidljivo je da se signal izlaznog napona Rogovskijevog svitka u većini poklapa sa signalom izlaznog napona strujnih kliješta što u prvom mjerenju nije slučaj. Iz toga zaključujemo da položaj vodiča unutar senzora Rogovskijevog svitka ima utjecaj na njegovu točnost mjerenja struje kroz mjenjeni vodič.

Mjerenje 3:

U mjeranju 3 mjereno je sinusni signal efektivne vrijednosti struje približno 0 A i frekvencije 50 Hz. Mjerenje je izvršeno da bih se vidio utjecaj vrlo malih struja na oblik izlaznog signala napona strujnih kliješta i Rogowskijevog svitka. Iz dobivenih oblika signala vidljivo je da se javljaju oscilacije signala (šumovi) i kod strujnih kliješta i kod Rogowskijevog svitka, ali puno više kod izlaznog signala napona Rogowskijevog svitka. Zaključujemo da Rogowskijev svitak nije dobar izbor pri mjeranju malih struja, bolji izbor su strujna kliješta jer imaju puno manje oscilacije signala izlaznog napona.

Mjerenje 4:

U mjeranju 4 mjereno je sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 10 kHz. Iz dobivenog izlaznog oblika signala napona vidljivo je da je amplituda napona 15 mV, kako je strujni opseg strujnih kliješta i Rogowskijevog svitka postavljen na 100 mV/A tada amplituda maksimalne vrijednosti struje iznosi 150 mA, a iz toga slijedi da mjerena struja ima efektivnu vrijednost struje za korijen iz dva puta manju od maksimalne vrijednosti struje i iznosi 106 mA što je približno točno stvarnoj mjerenoj struji koju mjerimo kroz vodič.

Mjerenje 5:

U mjeranju 5 mjereno je sinusni signal efektivne vrijednosti struje 100 mA, frekvencije 20 kHz. Dobiveni oblik izlaznog signala amplitude napona strujnih kliješta i Rogowskijevog svitka iznosi 13 mV, kako su strujni opsezi strujnih kliješta i Rogowskijevog svitka postavljeni na 100 mV/A tada iz toga možemo odrediti maksimalnu vrijednost mjerene struje koja iznosi 130 mA te iz nje efektivnu vrijednost struje koja je za korijen iz dva puta manja od maksimalne vrijednosti i iznosi 91.9 mA. Kako stvarana struja kroz mjereni vodič iznosi 100 mA vidljivo je kao i u prethodnom mjeranju pri frekvenciji 10 kHz da sa povećanjem frekvencija mjerene struje točnost mjerenja strujnih kliješta i Rogowskijevog svitka opada.

Mjerenja 6-9 izvršena su na osciloskopu (Tektronix, TBS 1072B-EDU Digital oscilloscope).

Mjerenje 6-9:

U mjeranju 6-9 sniman je sinusni i pravokutni oblik efektivne vrijednosti struje 93.2 mA pri frekvencijama 25, 50, 75, 100 kHz. U prvom mjeranju (sinusni signal) pri frekvenciji 25 kHz vidljivo je iz izlaznog signala napona strujnih kliješta da je amplituda izlaznog signala 9 mV

kako je strujni opseg kliješta postavljen na 100 mV/A maksimalna vrijednost struje tada iznosi 90 mA, a efektivna vrijednost struje za korijen iz dva puta manje te iznosi 63,6 mA. Kako je stvarna struja kroz vodič je efektivne vrijednosti 93,2 mA vidljivo je da se javlja pogreška pri mjerenju strujnim kliještima. Pri mjerenju struje pravokutnog oblika, frekvencije 25 kHz amplituda izlaznog signala napona strujnih kliješta iznosi 11,8 mV što je jednako efektivnom naponu izlaznog signala ($U_{maksimalno} = U_{efektivno}$). Efektivna vrijednost struje tada iznosi 118 mA, što je veće od stvarane efektivne vrijednosti struje koja iznosi 93,2 mA.

U drugom mjerenju pri frekvenciji 50 kHz dolazi do većeg izobličenja signala, a najizraženije je kod pravokutnog signala. Izlazni signal strujnih kliješta sinusnog oblika ima amplitudu napona 8,6 mV što je manje nego u prvom mjerenju pri frekvenciji 25 kHz kada je ona iznosila 9 mV. Kod pravokutnog signala također dolazi do smanjenja amplitude izlaznog signala napona i iznosi 11 mV što je manje nego u prvom mjerenju. Efektivna vrijednost struje pri sinusnom signalu iznosi 60 mA a pri pravokutnom signalu iznosi 110 mA.

U zadnja dva mjerenja pri frekvencijama 75 i 100 kHz dolazi do najizraženijeg izobličenja sinusnog i pravokutnog signala. Povećanjem frekvencije mjerene struje amplitude sinusnog i pravokutnog izlaznog signala se sve više smanjuju i to dovodi do sve veće pogreške pri očitavanju vrijednosti zadane mjerene struje kroz vodič.

Kako je frekvencijski radni opseg Rogowskijevog svitka od 10 Hz do 20 kHz nemoguće je izmjeriti točnu vrijednost struje pri frekvencijama višim od 20 kHz, jer se javljaju jako velike oscilacije signala, a još više su izražene pri pravokutnom obliku signala struje.

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu su opisani principi rada uređaja koji mjere struju, a da ne moramo prekinuti strujni krug jer vrlo često nismo u mogućnosti prekidati strujni krug da bih izmjerili struju kroz neki vodič. Neki od tih uređaja su strujna kliješta, Rogovskijev svitak i strujno optički pretvarači. Strujno optički pretvarači rjeđe su korišteni uređaji zbog relativno visoke cijene i zbog toga što se ugrađuju samo u nova postrojenja.

U zadnjem dijelu završnog rada su obavljena mjerenja sa strujnim kliještima (Tektronix A622 AC/DC CURRENT PROBE) i Rogovskijevim svitkom (CHAOVIN ARNOUX A100).

Mjerenja su izvršena radi utvrđivanja ponašanja strujnih kliješta i Rogovskijevog svitka pri strujama malih i velikih iznosa frekvencija te pri različitim položajima mjernog vodiča.

Prednosti strujnih kliješta: mala masa, male dimenzije, niska cijena, jednostavnost izvedbe, galvanska izolacija. Nedostaci: slaba linearnost, vrijeme odziva oscilacije signala pri visokim frekvencijama.

Prednosti Rogovskijevog svitka: mala masa, niska cijena, jednostavnost izvedbe, mjerenje velikih struja, linearnost. Nedostaci : vrijeme odziva , slaba otpornost na utjecaj susjednih magnetskih polja, oscilacije signala pri niskim frekvencijama.

U prvom mjerenju je ispitivan različit položaj mjerenog vodiča istog iznosa struje i frekvencije u Rogovskijevom svitku kada je vodič dodirivao svitak i kada je bio u središtu svitka iz dobivenih oblika signala utvrđeno je da položaj vodiča utječe na točnost rezultata Rogovskijevog svitka tj.točnost mu se povećava što je mjereni vodič bliže središtu svitka.

Pri mjerenju struja do 20 kHz točnost Rogovskijevog svitka i strujnih kliješta je približno bila ista. Na frekvencijama višim od 20 kHz počele su se pojavljivati oscilacije signala strujnih kliješta, a najviše kod Rogovskijevog svitka jer mu je frekvencijski radni opseg do 20 kHz. U mjerenjima od 75 do 100 kHz izobličenje signala ja najizraženije i dovodi do najveće pogreške pri očitavanju vrijednosti izlaznog signala, posebno kod pravokutnog oblika signala strujnih kliješta.

7. LITERATURA

- [1] Bičanić, K., Kuzle, I., Tomiša, T., Nekonvencionalni mjerni pretvarači, *Energija*, god. 55 (2006), br. 3., str. 328-351, hrcak.srce.hr/file/7441
- [2] Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying, http://www.pes-psrc.org/Reports/Practical%20Aspects%20of%20Rogowski%20Coil%20Applications%20to%20Relaying_Final.pdf
- [3] Poboljšanje relejne zaštite sn mreža primjenom rogowskijevog mjernog pretvornika, <http://www.ho-cired.hr/3savjetovanje/SO3-14.pdf>
- [4] Osjetnici električne struje, https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJE-10w.pdf
- [5] <http://www.instructables.com/id/Make-a-Rogowski-coil/>
- [6] <http://www.electrotechnik.net/2009/09/how-does-dc-clampmeter-work.html>
- [7] Halovi strujni senzori, Mirko Božović, II ciklus (master studij), Elektrotehnički fakultet Istočno Sarajevo, INFOTEH-JAHORINA Vol. 13, March 2014, <http://infotech.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2014/radovi/STS/STS-2.pdf>
- [8] <http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/A621-A622-Current-Probes-Datasheet-60W150813.pdf>
- [9] https://www.rapidonline.com/pdf/1171297_an_en_01.pdf
- [10] Flexibility for measuring intensity, http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00TFY13_7.PDF
- [11] current clamps catalogue, <http://www.meter.hu/uploaded/lakatfogo%20adapterek.pdf>

SAŽETAK

Vrlo često u praksi potrebno je izmjeriti struju kroz nekakav vodič , ali nismo u mogućnosti izmjeriti struju zbog toga što bi se morao prekinuti strujni krug.

Taj problem je riješen izradom uređaja koji mjere struju kroz vodič, a da strujni krug ne moramo prekinuti.

Neki od tih uređaja su: Rogovskijev svitak, strujna kliješta, strujno optički pretvarači.

Prednosti takvih uređaja u usporedbi sa ostalim uređajima sa feritnom jezgrom su: male dimenzije, jeftinija izvedba, veliki frekvencijski i mjerni opseg, veća točnost.

ABSTRACT

Very often in practice it is necessary to measure the current through a conductor, but we are unable to measure the current because we would have to break the circuit.

This problem is solved by creating a device that can measure current through the conductor, without breaking the circle/stopping the current through the circle.

Some of these devices are: Rogowski coil, current clamps, current optical converters.

The advantages of such devices compared to other devices with a ferrite core are: small size, less expensive version, a large frequency and measurement range, greater accuracy.

ŽIVOTOPIS

Igor Šubarić, rođen 4. Travnja 1994. godine u Sremskoj Mitrovici. Osnovnu školu od prvog do četvrtog razreda pohađam u mjestu Ivanovo, a zatim od petog do osmog razreda pohađam u mjestu Viljevo te ju završavam 2009. godine. Poslije toga upisujem srednju Stručnu školu u Valpovu, smjer elektrotehničar. 2013. godine završavam srednju školu i stječem zvanje elektrotehničar s temom maturalnog rada (Sklop za ispitivanje dioda i tranzistora). 2013. godine upisujem se na Elektrotehnički fakultet u Osijeku smjer elektroenergetika, stručni studij.

Vlastoručni potpis : _____