

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Leon Zalar

TULJAVA ROGOWSKI V IZVEDBI TISKANEGA VEZJA

DIPLOMSKO DELO VISOKOŠOLSKEGA STROKOVNEGA ŠTUDIJA

Mentor: izr. prof. dr. Peter Zajec, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2016

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, izr. prof. dr. Petru Zajcu, ki me je usmerjal pri nastajanju diplomskega dela, mi nesebično pomagal in svetoval.

Še posebej se zahvaljujem sodelavcu Miomirju Todoroviču iz podjetja Elgoline za nasvete in pomoč, prav tako pa tudi celotnemu Elgoline kolektivu, ki je sodeloval pri izdelavi tiskanih vezij ter direktorju Iztoku Gorniku, ki mi je omogočil, da sem vezji izdelal.

Posebna zahvala gre tudi moji družini, ki mi je omogočila študij, me moralno podpirala in mi omogočala nemoteno delo.

KAZALO VSEBINE

KAZALO SLIK	II
KAZALO TABEL	III
SEZNAM SIMBOLOV IN KRATIC.....	V
UPORABLJENI SIMBOLI	V
UPORABLJENE KRATICE	VI
POVZETEK.....	VII
ABSTRACT	VII
1 UVOD	1
2 WALTER ROGOWSKI	3
3 TULJAVA ROGOWSKI	4
3.1 ZGRADBA IN TEORETIČNO OZADJE.....	4
3.2 ZGORNJA FREKVENČNA MEJA TULJAVE ROGOWSKI	7
3.3 IZVEDBE TULJAVE ROGOWSKI	7
4 ZASNOVA TULJAVE ROGOWSKI NA TISKANEM VEZJU	11
4.1 SPLOŠNO O TISKANIH VEZJIH	12
4.2 TEHNOLOŠKE OMEJITVE	13
4.3 NAČRTOVANJE VEZJA	18
4.4 OBDELAVA PODATKOV S PROGRAMOM CAM 350	19
4.5 TEHNIČNI PODATKI VEZJA.....	22
5 INTEGRATOR.....	24
5.1 INTEGRATOR Z OPERACIJSKIM OJAČEVALNIKOM.....	27
6 MERJENJE KONSTANTE K	28
6.1 SCHEMA MERILNEGA INTEGRATORJA.....	29
6.2 MERITEV Z MOJIM MERILNIKOM	31
7 ZAKLJUČEK	33
8 LITERATURA	34

Kazalo slik

Slika 1: Walter Rogowski [1]	3
Slika 2: Univerza RWTH Aachen [2]	3
Slika 3: Tuljava Rogowski [3]	4
Slika 4: Navitje tuljave Rogowski [5].....	6
Slika 5: Shema tuljave Rogowski [4].....	6
Slika 6: Ekvivalentno vezje tuljave Rogowski [5].....	7
Slika 7: Časovni diagram tuljave Rogowski [5]	7
Slika 8: Fleksibilna tuljava Rogowski z integratorjem [5]	8
Slika 9: Tuljava Rogowski iz več med seboj povezanimi tuljavami [5]	8
Slika 10: Tuljava Rogowski okrog izvoda na mobilni RTP (razdelilni transformacijski postaji) [5].....	9
Slika 11: Aplikacija tuljave Rogowski za motorne zaščite [5].....	9
Slika 12: Aplikacija za energetske meritve [5].....	9
Slika 13: Tuljava Rogowski izvedena na dvostranskem tiskanem vezju [6].....	10
Slika 14: Izvedba na dveh tiskanih vezjih [5]	10
Slika 15: Več tuljav na tiskanih vezjih povezanih v celoto [5]	11
Slika 16: TV brez elementov (levo) in TV opremljen z elementi (desno) [9]	12
Slika 17: Sestava standardnega 4-slojnega vezja.....	13
Slika 18: 3D struktura 4-slojnega vezja [11]	13
Slika 19: Prikaz spodjedanja vezi pri jedkanju [11]	14
Slika 20: Primeri "acid trapov" [12]	15
Slika 21: Prikaz pokovinjene izvrtine, zalite z zaščitnim lakom ob prerezu plošče [13] .	16
Slika 22: Prikaz 4-stranskega vezja s prevezavami kot v našem primeru [14].....	16
Slika 23: Pokovinjena izvrtina z bakrenim obročkom.....	17
Slika 24: Primeri vrtanja: center izvrtine (levo) in zamaknjeno izvrtane izvrtine (sredina in desno).....	18
Slika 25: Prvi sklop izvrtin in povezav - oranžne so na zgornji strani, modre pa na spodnji strani	19
Slika 26: Izgled programa po koncu panelizacije, pripravljenega na proizvodnjo	20
Slika 27: Delovni nalog s postopki ter navedenim ustreznim materialom za izdelavo	22
Slika 28: Vezje z zamaknjenimi notranjimi in zunanji izvrtinami	22
Slika 29: Vezje z zamaknjenimi notranjimi izvrtinami	23

Slika 30: Osnovna shema integratorja	24
Slika 31: Shema integratorja z uporom R_F	26
Slika 32: Karakteristika integratorja [16].....	27
Slika 33: Tok vodnika - pomerjeno z ref. merilnikom toka (Ch 1 - moder), izhodna napetost tuljave Rogowski (Ch 2 - rdeč).....	29
Slika 34: Vezje za meritev toka preko moje tuljave Rogowski in integratorja	30
Slika 35: Tiskano vezje integratorja brez elementov (levo) in z elementi (desno) pred izdelavo	30
Slika 36: Moja naprava za merjenje s tuljavo Rogowski in integratorjem	31

Kazalo tabel

Tabela 1: Tabela karakteristik tuljav Rogowski	23
Tabela 2: Tabela meritev izvedenih z mojo napravo za merjenje	31

SEZNAM SIMBOLOV IN KRATIC

Uporabljeni simboli

i_1	merjeni tok
α	fazni kot
L_S	dodatna induktivnost pri visokih frekvencah
u_l	inducirana napetost
K	konstanta tuljave
R	upor
C	kondenzator
μ_0	permeabilnost zraka
n	število ovojev na dolžisnko enoto oboda
S	preseki tuljave
N_2	število ovojev tuljave
r	polmer kroga
d	dolžina vezi
D	debelina vezja
l_{SR}	srednja dolžina vezja
π	matematična konstanta (vrednost 3,1416)
r_{SR}	srednji polmer vezja
u_{VH}	vhodna napetost integratorja
u_{IZH}	izhodna napetost integratorja

f	frekvenca toka merjenega vodnika
i_1	amplituda toka merjenega vodnika
A	ojačanje
dB	decibel
ω	krožna frekvenca = $2 \cdot \pi \cdot f$
j	imaginarna enota
τ	časovna konstanta
$i_{(IZR)}$	izračunan tok na merjenem vodniku
u_{VH}/i_1	razmerje vhodne napetosti integratorja in toka na vodniku
u_{IZ}/i_1	razmerje izhodne napetosti integratorja in toka na vodniku

Uporabljene kratice

RTP	razdelilna transformatorska postaja
TV	tiskano vezje
SR	slew rate

POVZETEK

Diplomsko delo opisuje tuljavo Rogowski in njeno uporabo v elektrotehniki. Tuljava Rogowski je izdelana na tiskanem vezju. Z izvedbo na štiri plastnem vezju sem dosegel, da je bila gostota navitja na dolžinsko enoto pri vnaprej določenih dimenzijah čim večja, istočasno pa je bila izvedena tudi povratna vez na notranjih slojih vezja. S tem sem se izognil kompleksnemu združevanju več tiskanih vezij in tudi dosegel kompaktnejšo izdelavo, s prigraditvijo integratorja pa zagotovil izhodni signal, ki je premo sorazmeren merjenemu toku. Glede na to, da sem se omejil na izdelavo tuljave Rogowski in prigradnjo integratorja, menim, da bi se s podrobnejšo nadaljnjo raziskavo lahko izboljšala občutljivost in točnost, saj so izmerjene vrednosti z mojo napravo odstopale od izmerjenih preko kontrolnih tokovnih klešč.

Ključne besede: izmenični tok, tuljava Rogowski, tiskano vezje, integrator, operacijski ojačevalnik, frekvenca.

ABSTRACT

The thesis describes a Rogowski coil and its use in electrical engineering. Rogowski coil described here is constructed on a printed circuit board. By using the four layer PCB, I achieved optimal number of windings for physical dimensions determined by the design, where return line is routed through a middle layer of the PCB. With this construction I avoided any complicated assembly with multiple PCBs. With introduction of the integrator, I have ensured that output signal corresponds to measured current. Given that this thesis is restricted on construction and manufacturing of the Rogowski coil and integrator circuit, and the fact that values I obtained with this construction differ from values obtained by using calibrated commercial current sensing probe, I think that with further development, sensitivity and accuracy can be increased.

Key words: alternating current, Rogowski coil, printed circuit board, integrator, operational amplifier, frequency.

1 UVOD

Električni tok je usmerjeno gibanje nosilcev električnega naboja po mediju, pa naj bo to kovina, tekočina ali drug električni prevodnik. Definiran je kot količina naboja, ki v danem časovnem intervalu preteče skozi dani presek. S tehnološkim razvojem je tudi njegovo merjenje iz dneva v dan pomembnejše. Na izbiro imamo veliko merilnikov toka, ki pa imajo svoje prednosti in slabosti.

Tuljava Rogowski ima prednosti v zanemarljivih toplotnih izgubah, kar nam omogoča višje napetostne nivoje na strani detekcijskega tokokroga. Omogoča nam lebdeče merjenje toka v visokonapetostnih tokokrogih, odlikuje pa jo tudi poljubna pozicija merjenega vodnika, saj z njenim spreminjanjem ne vplivamo na rezultate. Tuljava Rogowski deluje na podlagi Faradayevega zakona indukcije v zaprti mirujoči zanki, kjer število ovojev N tvori zanko, v kateri se spreminja magnetni pretok ϕ , katerega tvori električni tok, ki ga merimo. Ustvarja se inducirana napetost, ki je sorazmerna spremembi toka. Tuljava se uporablja predvsem za merjenje izmeničnega električnega toka. Isti merilnik lahko uporabimo pri merjenju toka med razponom od nekaj amperov A, pa do nekaj 100 kA ter s frekvenčnim razponom med nekaj Hz do nekaj MHz. Ima pa tudi slabo lastnost, kjer lahko pride do opaznih odstopanj pri majhnih premerih vodnika. V tem primeru je rešitev, da tokovodnik objamemo dvakrat. Pomembna pa je tudi zagotovitev čim bolj enakomernega preseka ovojev in števila ovojev na dolžinsko enoto oboda, ki jo je enostavno zagotoviti z izvedbo na tiskanem vezju.

Vedno več električnih aplikacij temelji na uporabi tiskanih vezij. Z njihovim razvojem pa so se odprle tudi možnosti različnih tehnološko zahtevnih izvedb. Zaradi zagotovitve enakomernosti ovojev, možnosti izvedbe povratne zanke po notranjih slojih in robustnosti so postala tudi zanimiva alternativa za izvedbo tuljave Rogowski. Pomembno vlogo pa igra tudi cena, ki je ob velikem številu ponudnikov tiskanih vezij kot tudi materiala za izdelavo, postala ugodnejša.

V diplomskem delu je podan opis delovanja in postopek izdelave merilnika izmeničnega električnega toka z uporabo tuljave Rogowski.

Osredotočil sem se na izdelavo ter se soočil s problemi načrtovanja le-te. Ob tem so se pojavili tudi konstruktorski problemi, ki sem jih razčlenil in poiskal ustrezne rešitve.

Cilj naloge je izdelava dveh tuljav Rogowski na tiskanem vezju, dograditev integratorja ter primerjava izmerjenih vrednosti med seboj in z vrednostmi tokovnih klešč.

2 WALTER ROGOWSKI

Tuljava Rogowski se imenuje po Walterju Rogowskem, ki jo je iznašel skupaj z W. Seinhousnom okrog leta 1912. Rogowski je bil nemški fizik, Poljskega rodu, ki je premostil vrzel med teoretično fiziko in uporabno tehnologijo na številnih področjih elektronike.



Slika 1: Walter Rogowski [1]

Leta 1900 je pričel s svojim študijem [1] na Univerzi RWTH Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen), sedaj največji tehniški univerzi v Nemčiji, ki je bila ustanovljena leta 1870. Trenutno jo obiskuje več kot 40.000 študentov, vpisanih v 130 študijskih programov. Pod takratnim vodstvom univerze, Arnolda Sommerfelda, je diplomiral in nato nadaljeval študij na tehniški univerzi v Danzigu, kjer je bil asistent, specializiran za visokonapetostno tehnologijo, telekomunikacije in električno fiziko.

Po prvi svetovni vojni se je vrnil v Aachen ter postal profesor za teoretično elektrotehnologijo in direktor Inštituta za elektrotehnologijo, ki ni imelo svoje zgradbe. Z glavnim asistentom sta načrtovala izgradnjo inštituta, ki je bil pozneje poimenovan Rogowski – Institut der RWTH Aachen v čast Walterju Rogowskemu.

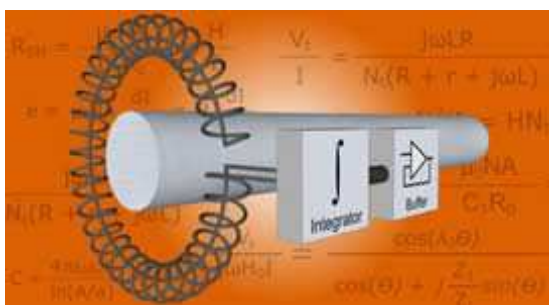


Slika 2: Univerza RWTH Aachen [2]

3 TULJAVA ROGOWSKI

3.1 Zgradba in teoretično ozadje

Tuljava Rogowski [3] je naprava za merjenje izmeničnega električnega toka ter še posebej visokofrekvenčnih tokovnih impulzov. Sodi v skupino zračnih tuljav, ki vsebuje N_2 enakomerno porazdeljenih ovojev, nameščenih na toroidnem nosilnem telesu ($\mu_R = 1$).



Slika 3: Tuljava Rogowski [3]

Navitje tuljave je navito s tanko žico v obliki spirale, ki se začne na eni strani nosilnega telesa, na drugem koncu pa se obrne in je skozi center navite spirale speljana na začetni konec nosilnega telesa. Ker sta začetek in konec navitja na istem koncu tuljave, lahko tuljavo enostavno razpremo in objamemo tokovodnik, katerega tok želimo izmeriti.

Merjeni tok [17] povzroča v svoji okolici magnetno poljsko jakost tj. magnetni pretok, ki se sklepa skozi posamezne ovoje tuljave Rogowski. Če predpostavimo, da se tokovodnik nahaja v središču toroidno oblikovane tuljave Rogowski (slika 4), velja, da se v posameznem ovoju inducira napetost po enačbi (3.1)

$$u_I(t) = - \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.1)$$

ker pa imamo več ovojev tuljave Rogowski, je inducirana napetost za število ovojev N_2 – krat večja (3.2)

$$u_I(t) = - N_2 \frac{d\phi}{dt}. \quad (3.2)$$

Magnetni pretok ϕ skozi zanko se spreminja, če se spreminja povprečni presek ovoja S ali gostota magnetnega polja B . Magnetni pretok skozi zanko se torej ob konstantnem povprečnem preseku ovoja S spreminja zaradi spremembe gostote magnetnega polja B (3.3)

$$\phi = B \cdot S. \quad (3.3)$$

S povprečni presek ovoja

Magnetno polje B je posledica električnega toka i_1 merjenega vodnika. Ker je tuljava Rogowski zračna tuljava in ne vsebuje jedra, v enačbi (3.4) nastopa le permeabilnost zraka μ_0 .

$$B = \mu_0 n i_1 \quad (3.4)$$

n število ovojev na dolžinsko enoto oboda

μ_0 permeabilnost zraka $1,257 \cdot 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$

Z upoštevanjem, da se spreminja vrednost toka v vodniku, katerega objamemo s tuljavo Rogowski, dobimo enačbo (3.5) za inducirano napetost tuljave

$$u_I(t) = - N_1 \mu_0 n S \frac{di_1}{dt}. \quad (3.5)$$

Negativni predznak je, ker inducirana napetost požene po tuljavi električni tok, katerega magnetno polje nasprotuje magnetnem polju merjenega vodnika.

Ob predpostavki, da je r polmer kroga, pa se izraz za inducirano napetost preoblikuje v enačbo (3.6)

$$u_I(t) = - N_1 \frac{N_2 S \mu_0}{2\pi r} \frac{di_1}{dt}. \quad (3.6)$$

N_2 celotno število ovojev tuljave Rogowski

Inducirana napetost $u_I(t)$, ki je sorazmerna s hitrostjo spremembe toka, je definirana s (3.7)

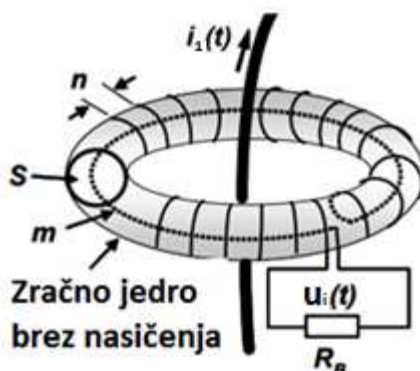
$$u_I(t) = - K \frac{di_1(t)}{dt}. \quad (3.7)$$

Pri merjenju toka na določenem vodniku [5] moramo poskrbeti, da pozicija merjenega vodnika, ki ga oklepa tuljava, ne vpliva na izhodni signal. Potrebno je doseči, da je vrednost konstante K , konstantna za vsakršno lego merjenega vodnika v tuljavi.

To lahko zagotovimo:

- da poskrbimo, da je presek navitja S tuljave čim bolj enakomeren;

- da je povratna žica, ki se vrača skozi tuljavo (na sliki označena z m) čim bolj sredinsko nameščena;
- da je število ovojev na dolžinsko enoto oboda n čim bolj enakomerno po celotnem obodu tuljave.

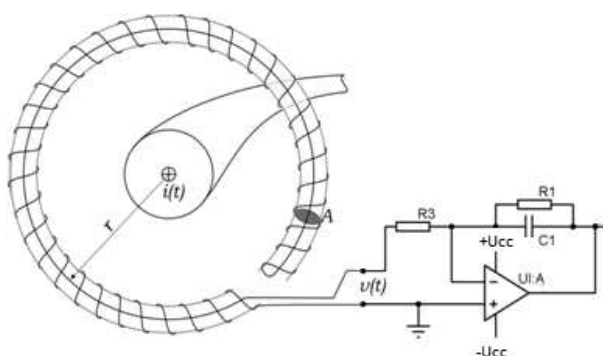


Slika 4: Navitje tuljave Rogowski [5]

Konstanta tuljave Rogowski K ima enako enoto kot induktivnost in je definirana s (3.8)

$$K = N_1 \cdot \mu_0 \cdot n \cdot S. \quad (3.8)$$

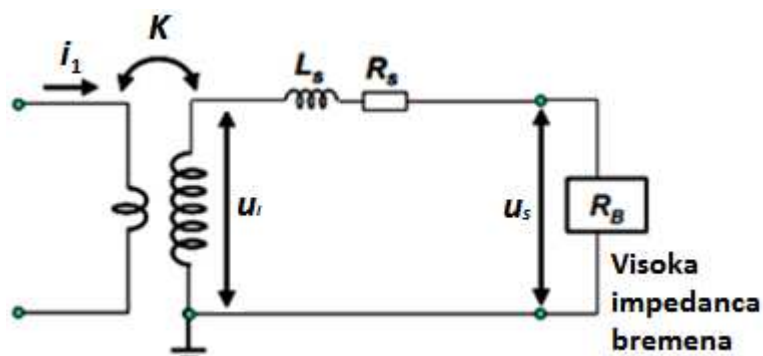
Vplivi sosednjih vodnikov, po katerih tečejo visoki tokovi, so lahko moteči, zato te nezaželene vplive preprečimo z dizajniranjem navitja tuljave ki je navita tako, da je njen konec speljan skozi sredico tuljave nazaj na njen začetek. Tako se prepreči vpliv elektromagnetnih polj, ki se nahajajo izven območja našega navitja tuljave.



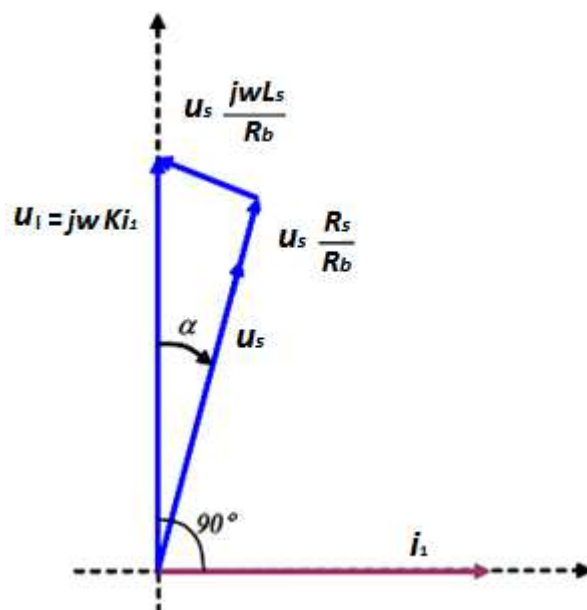
Slika 5: Shema tuljave Rogowski [4]

3.2 Zgornja frekvenčna meja tuljave Rogowski

Slika 6 prikazuje nadomestno vezje tuljave Rogowski pri visoko frekvenčnem delovanju. Fazni kot idealnega merilnika med merjenim tokom i_1 in sekundarno napetostjo u_l je 90° . Premik α od 90° povzroči induktivnost tuljave L_s in upornost R_s , kar se lepo vidi na časovnem diagramu na sliki 7, kjer je u_l inducirana napetost tuljave.



Slika 6: Ekvivalentno vezje tuljave Rogowski [5]



Slika 7: Časovni diagram tuljave Rogowski [5]

3.3 Izvedbe tuljave Rogowski

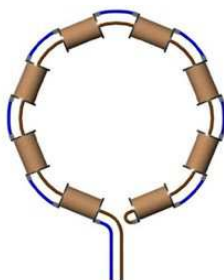
Poznamo več različnih izvedb tuljave Rogowski [5], ki so prirejene merjenju tokovnega območja, oziroma načinu namestitve na/okoli tokovodnik.

Fleksibilna tuljava Rogowski (slika 8) se namesti brez prekinitve tokovodnika. Vsebuje navitje, ki je prikazano na sliki 5. Je enostavna za uporabo, vendar ni tako natančna. Natančnost se lahko izboljša s pozicioniranjem primarnega vodnika čim bolj v center.



Slika 8: Fleksibilna tuljava Rogowski z integratorjem [5]

V primeru s slike 9, je tuljava Rogowski sestavljena iz več tuljav, ki so med seboj zaporedno povezane v verigo. Uporablja se v aplikacijah, kjer je prostor omejen. Induktivnost med napravo in zunanjim tokokrogom ni nič in je večja kot v izvedbah z neprekinjenim navijanjem. Več tuljavic ko vežemo v verigo, manjši je vpliv zunanjega elektromagnetnega polja.



Slika 9: Tuljava Rogowski iz več med seboj povezanimi tuljavami [5]

Slika 10 prikazuje uporabo tuljave Rogowski na mobilni RTP - razdelilni transformatorski postaji. Teža in velikost sta zaradi mobilnosti zelo pomembna faktorja. Pridružuje pa se jim tudi občutljivost na tresljaje, zato je to idealna rešitev na področju teh aplikacij.



Slika 10: Tuljava Rogowski okrog izvoda na mobilni RTP (razdelilni transformacijski postaji) [5]

Nadtokovna zaščita motorja na sliki 11 je izvedena s tuljavo Rogowski in je veliko cenejša in kompaktnejša od zaščite na osnovi tokovnih transformatorjev. Tudi odkrivanje napak je hitrejše in predvsem lažje jo je namestiti. Nadzorno vezje zaščite zagotavlja standardne funkcije, kot so detekcija izpada faze, preobremenitve in zaznava tokovne nesimetrije.



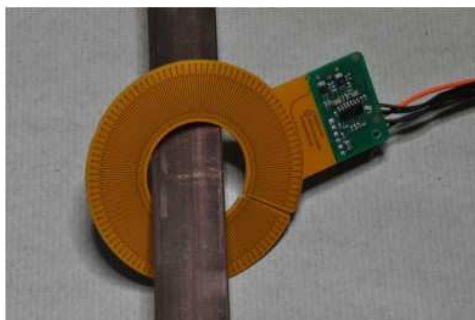
Slika 11: Aplikacija tuljave Rogowski za motorne zaščite [5]

Fleksibilne tuljave Rogowski, (slika 12) se uporabljajo v raznih aplikacijah za meritve energije. Največkrat jih srečamo v raznih supermarketih, šolah, televizijskih studiih, podatkovnih centrih in podobno.



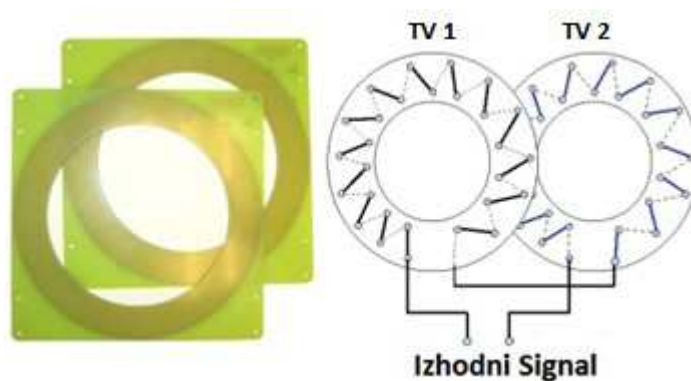
Slika 12: Aplikacija za energetske meritve [5]

Tuljava Rogowski je lahko izvedena tudi na tiskanem vezju (TV), ki mu dodamo integrator, če želimo dobiti informacijo o trenutni vrednosti merjenega toka. Več o integratorju je predstavljeno v poglavju 5. Izvedba je glede na ostale izvedenke precej ugodna, saj so se cene z naraščanjem števila ponudnikov tiskanih vezij občutno zmanjšale. Poznamo pa več izvedb na tiskanih vezjih. Na sliki 13 je prikazana izvedba na dvostranskem vezju.



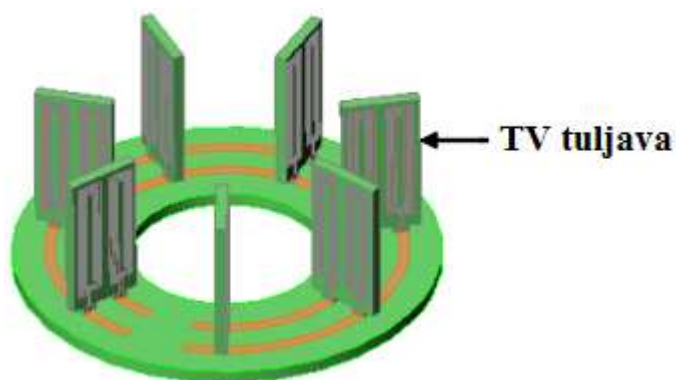
Slika 13: Tuljava Rogowski izvedena na dvostranskem tiskanem vezju [6]

Slika 14 prikazuje dve dvostranski tiskanini, ki sta med seboj povezani in tako tvorita tuljavo Rogowski. Tako sta lahko obe zanki izdelani kot navitje. Ta dizajn omogoča natančno izdelavo tuljave, posledica pa je večja natančnost meritve in boljša odpornost na zunanja magnetna polja.



Slika 14: Izvedba na dveh tiskanih vezjih [5]

Več tuljav izvedenih na tiskaninah (slika 15) in nato povezanih v krog nam omogoča večjo imunost na zunanja polja in hkrati tudi manjšo odvisnost točnosti meritev od lege merjenega vodnika. Tem prednostim se pridružujejo tudi nižji stroški izdelave, saj so enostavna vezja cenovno ugodna, ker je cena pogosto podana na kvadratni meter TV. Na tolikšnem območju pa lahko naročimo veliko manjših tuljav. Pritrditev pa lahko izdelamo sami.



Slika 15: Več tuljav na tiskanih vezjih povezanih v celoto [5]

Omenil sem kar nekaj izvedenk tuljave Rogowski, pri svojem delu pa sem se omejil na izdelavo na tiskanem vezju, ki sem ga dizajniral, pri čemer sem poizkusil čim bolj izkoristiti omejen prostor ter se približati čim boljšemu prostorskemu izkoristku in zagotoviti čim več ovojev tuljave. Pri tem pa je cilj ohraniti nizko ceno izdelave.

Izdelal sem dve TV s tuljavo Rogowski, da bi dosegel čim večjo gostoto navitja na dolžinsko enoto. To sem zagotovil z različno postavitvijo ter številom ovojev. Meritve sem izvedel z obema in primerjal rezultate. Glede na to, da sem pričakoval malce razlike med njunima konstantama, sem opazil tudi različne vrednosti izmerjenih tokov pri meritvah.

4 ZASNOVA TULJAVE ROGOWSKI NA TISKANEM VEZJU

Pri zasnovi vezja bi izpostavil dva kriterija, ki me omejujeta. Prvi je zagotovitev čim večjega števila ovojev, ker pa sem omejen s prostorom, je treba narediti vezice čim ožje. Drugi kriterij pa so majhne pokovinjene skozi izvrtine, ki povezujejo vezi na zgornji in spodnji strani plošče in s tem tvorijo ovoje tuljave. Na izhod iz tuljave sem priključil integrator, s pomočjo katerega sem lahko spremljal potek napetosti na osciloskopu. Izhodna napetost integratorja je v fazi s kontrolno napetostjo tokovnih klešč, ki sem jih uporabil za nastavitev amplitude toka.

Izdelal sem štiristransko vezje, ki na zunanjih slojih vsebuje tuljavo, po notranjih slojih pa poteka povratna vez. Moj izziv je bil namestiti na ustrezno tiskano vezje čim več ovojev, nato pa izmeriti potek napetosti in toka.

4.1 Splošno o tiskanih vezjih

Tiskano vezje [7] je tako imenovana shema povezav, ki je izvedena na izolacijskem materialu. Sestavljena je iz povezav med kontakti (angl. pad), na katere prispajkamo različne elemente. Kontakti so prekriti s spajkalno kritino - spajko, odvisno od zahtev. Najpogosteje se uporablja HAL SN100C (ne vsebuje svinca), kemično zlato, kemično srebro ali pa galvansko zlato. S tem zaščitimo baker pred korozijo, ga naredimo odpornejšega in izboljšamo prevodne lastnosti. Pri večslojnih vezjih imamo tudi pokovinjene skozijske izvrtine (angl. via), ki skrbijo za povezavo med bakrenimi sloji tiskanega vezja.



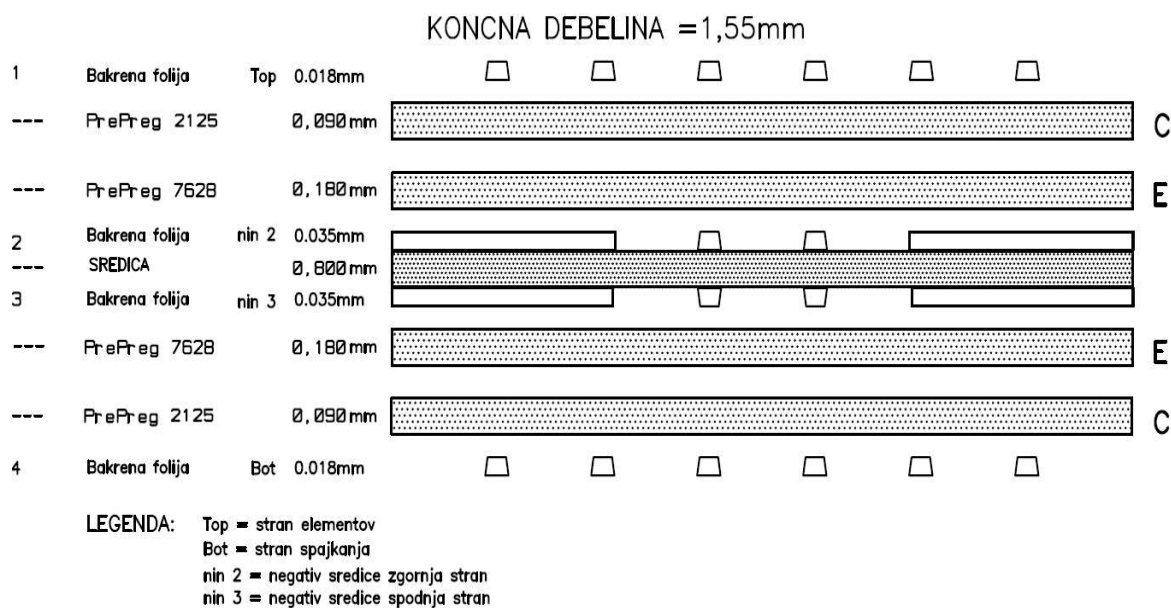
Slika 16: TV brez elementov (levo) in TV opremljen z elementi (desno) [9]

Ostala površina bakra je navadno prekrita z zaščitnim lakom, ki zaščiti površino bakra pred negativnimi vplivi delovnega okolja (ozračja), naredi vezje bolj estetsko ter poskrbi za lažjo berljivost tiska, če ga plošča vsebuje.

Tisk označuje imena in pozicijo elementov in razne informacije kot so: časovna koda, UL številka, logotip, postavitev elementov pri spajkanju...

Poznamo tudi nekatere izvedbe zaščitnega laka, kjer zaradi hlajenja navadno stranka zahteva čim boljše odvajanje toplote.

Pri večslojnih vezjih imamo še sredice, ki navadno služijo za izvedbo povezav zaradi prostorske stiske na zunanjih straneh. Te sredice potem "zlepimo" s prepregom, ki je sestavljen iz vlaken in smole v trdem stanju. Pri določenih temperaturnih pogojih in pritisku v preši dobi funkcijo t.i. "lepila".



Slika 17: Sestava standardnega 4-slojnega vezja



Slika 18: 3D struktura 4-slojnega vezja [11]

4.2 Tehnološke omejitve

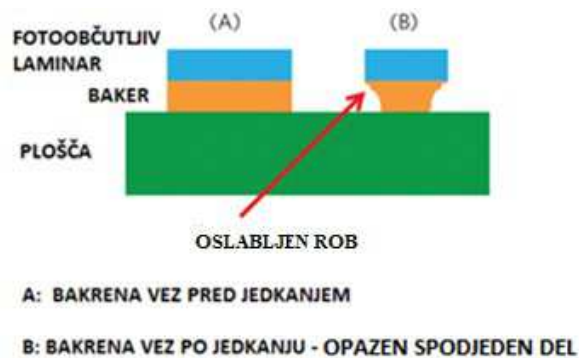
Za izvedbo tuljave Rogowski na tiskanem vezju je potrebno dobro poznavanje proizvodnje tiskanih vezij in njenih omejitev. Pri dimenzioniranju smo ujeti med dva mejnika: večji izkoristek prostora ter tehnološke zmožnosti proizvodnje. Največji problem se pojavi pri velikosti vezic in pa pokovinjjenih skozijskih izvrtinah.

- **Izbira debeline in širine vezi**

Da bi dosegli čim boljši izkoristek vezja, je potrebno širino vezi zmanjšati na minimum in tako izvesti čim več ovojev tuljave, ki pa morajo biti simetrični. Pri tanjšanju vezi smo omejeni s pojavom "spodjedanja".

Spodjedeni del se nam ustvari pri jedkanju plošče, kjer odstranjujemo odvečen baker iz celotne bakrene plošče in po tem procesu dobimo vezi, oz. zahtevano obliko tiskanega vezja na površini.

Največji problem spodjedanja je, da večja kot je debelina bakrene folije, večje je področje izpod foto – občutljivega laka (slednji definira širino vezice), ki se pri jedkanju spodje. Paziti pa je potrebno tudi na pravilne mešanice tekočine v napravi za jedkanje in hitrost potovanja tiskanega vezja skozi njo.



Slika 19: Prikaz spodjedanja vezi pri jedkanju [11]

S spodjedanjem pride do občutnega stanjšanja bakrenega sloja, v skrajnem primeru pa je vprašljiv tudi obstanek vezi. Z nadaljnjimi termičnimi procesi kot je spajkanje, lahko pride do razpok in s tem do prekinitve električnega stika.

Izbral sem širino vezi okrog 150 μm , ki je že na meji kritičnega spodjedanja. Da pa bi se izognil tem težavam, sem povečal bakrene sloje in s tem razširil bakrene vezi. Pomembno je, da pri razširitvi povečamo baker približno toliko, kolikor bodo izbočene bakrene vezi na posameznih slojih. Se pravi, v našem primeru imamo na zgornji in spodnji strani vezja (angl. top in bottom) končno debelino bakra nekje okrog 35 μm , tako da moramo ves baker na vezju za enak iznos tudi razširiti. Pomembno je, da ohranimo zadostno razdaljo med vezmi in ostalimi elementi, saj drugače pride do neželenih stikov.

Ne smemo pa pozabiti tudi na "acid trap". To je funkcija v programu, ki nam popravi vse majhne prostorčke med vezjo - padom, ali pa pri vezeh, ki so pod ostrim kotom. Če tega ne storimo, se nam tanek las fotoobčutljivega laminarja iz nezapolnjenega prostora zasuka čez vez, ki jo pozneje spodje. Problem v teh malih predelih, predvsem v prvem in drugem primeru na sliki 20 je, da se jedkalo ujame v te prostore in tako se zgodi, da se vezje v tem predelu preveč spodje, kar pripelje do pretankih vezi ali celo prekinitve el. stika.



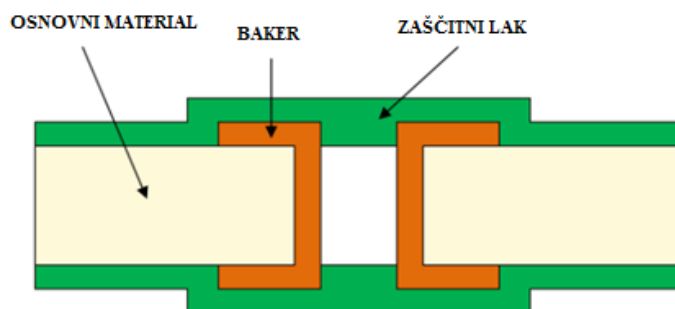
Slika 20: Primeri "acid trapov" [12]

Pri takšnih vezjih je še posebej pomemben postopek optičnega pregledovanja površine, ki ga imenujemo AOI – avtomatična optična kontrola (angl. automatic optical inspection). Pri tem postopku naprava primerja vzorec bakra iz programa z vzorcem bakra na plošči, tako nam zazna vsakršna odstopanja. Ob prikazu na plošči pa približa in poveča vse napake oz. odstopanja od programskega vzorca. Takšen pregled vezja je obvezen pri sredicah, saj pozneje ni več možno videti napak, ker so zalite s prepregom in prekrite z bakreno folijo. Napake je možno odkriti le še z električnim testom, ki nam javi morebitne nedovoljene stike ali prekinitve povezav.

Posebno previdnost je treba posvetiti tudi rokovanju s ploščami, še zlasti, preden je izveden nanos zaščitnega laka na vezje, saj se vezi hitro poškodujejo. Do takšnih poškodb pa lahko pride v mojem primeru zelo hitro, glede na majhno širino vezi.

- **Izbira in izvedba pokovljenih izvrtin**

Pokovinjene izvrtine nam služijo za povezavo zgornje in spodnje strani (top - bottom) ter tudi vmesnih slojev. Ker pa morajo biti pokovinjene, je treba posvetiti pozornost kar nekaj detajlom.

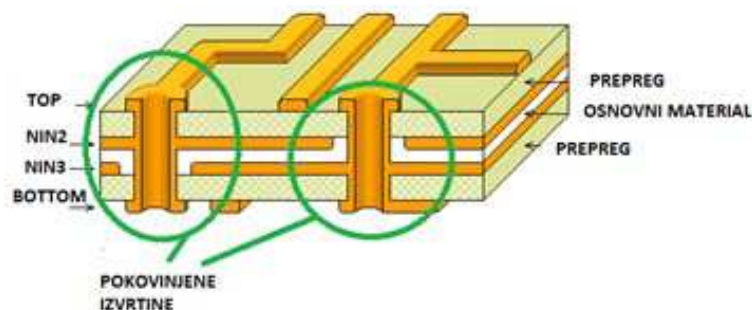


Slika 21: Prikaz pokovinjene izvrtine, zalite z zaščitnim lakom ob prerezu plošče [13]

Pri pokovinjenih izvrtinah moramo paziti, da ne izberemo pretankih, saj moramo upoštevati, da se mora z večanjem debeline plošče, večati tudi premer izvrtin. Ob uporabi izvrtin s premajhnim svetlim presekom, se pojavi problem že pri vrtanju, saj se lahko svedri lomijo. Posledica tega so izvrtine z nečistimi robovi ali pa ostanek zlomljenega ostanka svedra v izvrtinah. V mojem primeru sem uporabil pokovinjene izvrtine premera 0,15 mm, kar je nek minimum glede na to, da sem izbral končno debelino plošče 1,00 mm. Pri standardnih debelinah 1,55 mm bi se ta minimum že zvišal na 0,2 mm. Tako sem prilagodil debelino plošče na 1,00 mm ravno zaradi debeline izvrtin, ker tehnološko gledano z zmanjšanjem letih pridobimo večje število ovojev na enakem območju prostora TV.

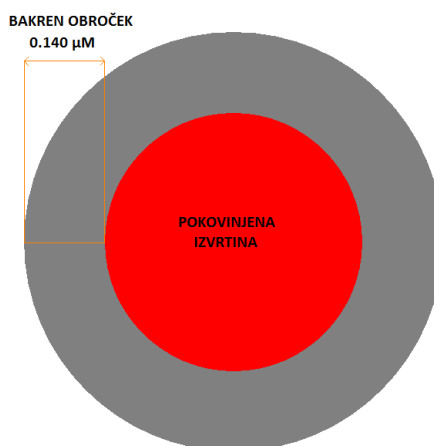
Pri naših pokovinjenih izvrtinah bo sloj bakra, s katerim bo prevlečena, debel nekje okrog 25 do 30 μm . Glede na to, da se baker galvanjsko nanese na notranjo površino izvrtine, je potrebno vanjo prej nanesti grafit. Da se nam premer izvrtin s tem ne zmanjša, je treba premer izvrtine namensko povečati nekje za 0,1 mm, da vse te prevleke kompenziramo.

Pri prevezavah je pomemben tudi obroček bakra na spodnji ter zgornji strani, oziroma na vseh plasteh, za katere želimo, da so električno povezane.



Slika 22: Prikaz 4-stranskega vezja s prevezavami kot v našem primeru [14]

Kot je razvidno iz slike 23 je treba izdelati bakren obroček okrog pokovinjene izvrtine, da nam obdrži baker na stenah le-teh. Če tega obročka nimamo, je zelo velika verjetnost, da se nam bo baker na stenah luščil in odpadal proč ter tako povzročil prekinitve.



Slika 23: Pokovinjena izvrtina z bakrenim obročkom

Problem nastane tudi pri majhnih izvrtinah in debelih ploščah, ker se v prevezavah nahaja zrak. Ko ploščo pomočimo v galvansko kopel, ta ostane ujet v izvrtinah, tako se te ne pokovinjijo med obema bakrenima obročkoma. Zato je potrebno upoštevati, da se najmanjše premere izvrtin prilagodi debelini plošče.

Poleg tega nam pri pokovinjenju izvrtin delajo probleme tudi razni delci umazanije v izvrtinah. Zaradi tega imamo posebno napravo, imenovano plazma, v kateri se dogaja proces izgorevanja (v našem primeru izgorevanja ostankov vlaken od preprega), ki ga kontroliramo z zmesjo plinov: kisik, dušik in freon. S pravilno mešanico zagotovimo, da izgorevajo le prej omenjeni ostanki, ostala površina plošče pa ostane nepoškodovana. Vanjo damo navadno 4 plastna vezja ali več, ker pridejo pri spajanju sredic ostanki od preprega ali kakšne druge nečistoče v luknjah. Zaradi tega je potreben tudi električni test, ko so plošče končane, saj z optično kontrolo takšnih električnih prekinitvev v stenah izvrtin ne moremo opaziti.

Pomembno za pokovinjene izvrtine je, da so izvrtane čim bolj v centru, saj se ob zamiku lukenj prekine bakren obroček, s tem pa se tudi pokovinjenje na tej strani izvrtin ne prime. Lep primer vidimo na sliki 24. Na mojem vezju so bile izvrtane izvrtine s strojem, ki ima kamero, da pred vrtnanjem najde tarče na plošči in določi točno pozicijo plošče na vrtnalni mizi. Prilagodi pa se tudi program vrtnanja glede na skrčke in raztezke, ki jim je podvržena plošča

zaradi termičnih postopkov. Vrtanje brez kamere bi povzročilo netočno pozicijo izvrtin in s tem slabo pokovljenje, v najslabšem primeru pa tudi prekinitev električnega stika.



Slika 24: Primeri vrtanja: center izvrtine (levo) in zamaknjeno izvrtane izvrtine (sredina in desno)

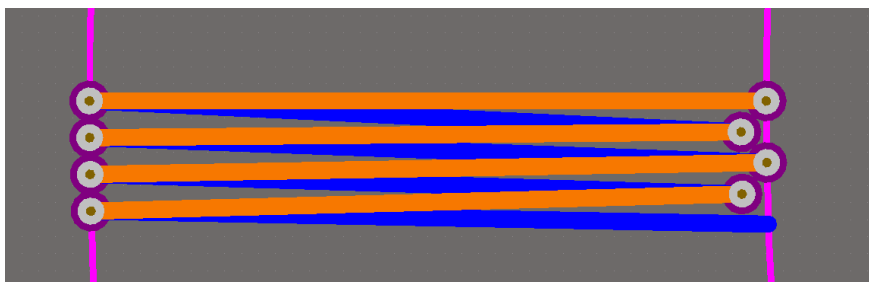
4.3 Načrtovanje vezja

Vežje sem načrtoval v programu Altium designer.

Najprej sem določil zunanje in notranje mere, ki omejujejo vežje. Nato sem postavil dve točki v isto linijo, in sicer eno ob robu zunanjega dela vežja in eno ob notranjem robu. Ti točki sta pokovljeni izvrtini, ki sta veliki 0,15 mm.

Sledila je kopija izvrtin v medpomnilnik, da se ohranijo, ker sem prvotne zavrtel za določen kot. Določi se ga tako, da po rotaciji dobimo dovolj prostora med izvrtinami. Zatem sem prilepil kopijo izvrtin iz medpomnilnika in dobil štiri točke, dve prvotni in dve rotirani z malo radialno zamaknjeno notranjo izvrtino. Le-ta se premakne za določeno razdaljo, ki jo določimo po vizualnem pregledu, da še vedno vsebuje dovolj izolacije, da ne pride do stika z obročkom sosednje izvrtine tekom proizvodnje. Na tak način sem dobil vzorec, ki sem mu dodal še povezave med pokovljenimi izvrtinami.

Izvrtine sem potem povezal z vezicami in določil njihovo širino, ki je bila 150 μm . To sem naredil na zgornji strani vežja (angl. top). Na enak način je bilo potrebno dodati še vezi na spodnji strani vežja (angl. bottom). Tako sem pokovinjene izvrtine povezal med seboj in ustvaril štiri povezave na zgornji in štiri na spodnji strani tiskanine.



Slika 25: Prvi sklop izvrtin in povezav - oranžne so na zgornji strani, modre pa na spodnji strani

Ta sklop sem nato s funkcijo rotiranja postopoma kopiral do konca prve četrtine našega kroga. Tako je nastal drugi sklop. Multiplikacijo drugega sklopa sem še trikrat ponovil in jo ustrezno zavrtel. Na desnem predelu našega vezja sem potem odstranil nekaj vezic in izvrtin ter tako dobil prostor za dva kontakta, kjer se tuljava začne in zaključí. Speljati sem moral le še povratno vez, ki poteka skozi notranja sloja štiri stranskega vezja, torej po drugem in tretjem sloju sredice. Vez sem peljal po sredini vezja od zaključka tuljave pa do začetka, kjer sem jo priključil na drugi kontakt – skladno s sliko 3 in opisom v poglavju 3.1. Potek izdelave vezja je bil zaključen. Zagotoviti sem moral le še priključna kontakta, kjer ne bo zaščitnega laka. To je pomembno zaradi poznejšega spajkanja na vezje.

Sledi še izvoz zasnove v izhodno "gerber" datoteko.

4.4 Obdelava podatkov s programom CAM 350

Po izvozu "gerberjev" iz dizajnerskega programa, sem jih uvozil v program CAM350. Najprej sem preveril, če se podatki po plasteh v programu nalogajo in nato razširil bakrene sloje. Navadno se jih razširi za toliko, kolikor bo končna debelina bakra. V mojem primeru je to 35 μm . Tolikšne povečave ne moremo uporabiti vedno, ker nam izolacija preprosto tega ne dopušča in s tem tvegamo neželene električne stike.

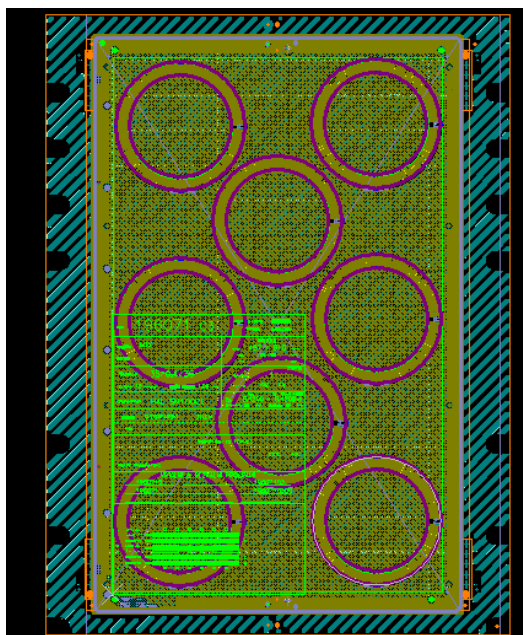
Preveriti je potrebno tudi razdalje med vezmi in obročki pokovinjenih izvrtin ter se prepričati, če je dovolj bakrenega obročka pri pokovinjenih izvrtinah.

Temu sledi še funkcija "acid trap", ki sem jo že prej opisal v poglavju 4.2, z namenom, da se v bakrenih zapolnijo čisto mali prostorčki.

Urediti je potrebno še obrez plošč in pripravljeni smo na panelizacijo, s katero se zloži več vezij na standardni panel, ki je v tem primeru 358 x 562 mm. Poskušal sem čim bolj izkoristiti

prostor in nato dodal še polnilo v sredice in v zunanji plasti. To pa zato, da se v galvanski kopeli baker enakomerno nanaša in ne zažge vezi.

Potem sem izvozil še programe za vse stroje v proizvodnji. V tem programu se generira tudi tehnološki list, na katerem se označijo razne posebnosti, kot tudi sestavo za štiri in več – plastna vezja. Služi pa tudi kot kontrolni list, na katerem preverimo postopke iz delovnega naloga ter tako zmanjšamo možnost napak tehnologa skozi procese v proizvodnji.



Slika 26: Izgled programa po koncu panelizacije, pripravljenega na proizvodnjo

Sledi delovni nalog na sliki 27, na katerem so v potrebnem zaporedju navedeni postopki z opombami.

10



74684

C3

ident 196071	MIX	naročilo 0
196068,196069		
Naziv: 196071 MIX		Partner: =====
Lansirano 1 df 1 mf 1	KOS	Prejemnik:
Zacetek: 3.4.2016		Kup.nar.:
Opomba:		Datum nar.:
		Posiljanje:
		Rok:
		Naroceno:
		Teden: KOS

tehnologija

tip: A	format	površina
stiskanje:	DF	0,2788 m ²
verificirano		
tehnolog: ZALAR LEON	Cu efektivno	12,80 dm ²
kontr.predpis: ML4 D=1,00MM CU FOIL=12µ!	Au efektivno	0,00 dm ²
tehnični opis:	Kem Au efekt	0,00 dm ²
	ponovitev:	1
Opomba DN: AM 150! PAZI, IZOLACIJA LE 70µ!	montaza:	1

kosovnica za razpisano količino delovnega naloga

ident	naziv	EM	količina	sledljivost
196068	ROGOWSKI_VER1	KOS	4,00	
196069	ROGOWSKI_VER2	KOS	4,00	

delovni postopki

DC	Šif. op.	Naziv	Norma (h / l kos)	Dobri			Slabi			datum podpis
				DF	MF	TIV	DF	MF	TIV	
59	FOTO	Fototisk	0,01							
62	JEDK	Jedkanje (jedkanje, stripanje)	0,01							
64	AOI	Optično testiranje - AOI	0,00							
74	OKS	Črnenje/oksidacija	0,00							
75	STIV	Siskanje večplastnih tiskanih verzij - GLEJ TEHNOLOŠKI!	0,02							
52	VRT	Vrtanje CCD: 196071	0,01							
76	POLP	Poširanje in plazmiranje plošč	0,02							
58	1MET	Poširanje, grafitni nanos	0,01							
60	CU10	Bakrenje 10 µ	0,03							
Sarte: _____			Meritev nanosa CU v µ:	_____						
59	FOTO	Fototisk - AM150!	0,01							
63	OCK	Očna kontrola pred drugo metalizacijo	0,00							
60	1MET	Bakrenje in nanos Sn	0,03							
Sarte: _____			Meritev nanosa CU v µ:	_____						
62	JEDK	Jedkanje (jedkanje, stripanje) PAZI MAJHNA IZOLACIJA!	0,01							
63	OCK	Očna kontrola pred nanosom FSK	0,00							
64	AOI	Optično testiranje - AOI - OBVEZNO!	0,00							

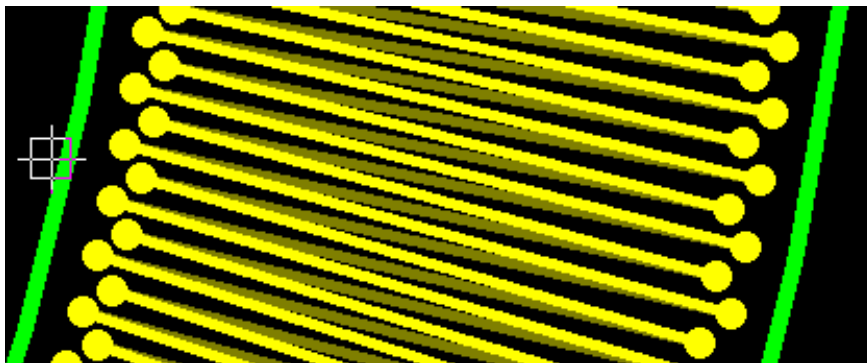
ELGOLINE d.o.o.		Tiskano: 11.04.2016 22:32					
68	STOP Predobdelava plošč in nanos fotospajkalne kritine ŠTOP LAK	0,00					
71	LFHA HAL SN100CL	0,00					
65	OČK Očna kontrola po nanosu Hal-a ali Hal-a	0,00					
72	TEST Električno testiranje -> samo pomei, če je stik med padoma!	0,00					
55	OBRD Obrezovanje NA PRIZMO: 196091FCCD	0,00					
73	ODP Odprema ROHS CONFORM - Prinesi Leono Zalarju!	0,00					
spremljanje							
	testi	vzorci	dobri	datum	podpis		
vzorčni pregled							
laboratorijski test							
merilni protokol							

Slika 27: Delovni nalog s postopki ter navedenim ustreznim materialom za izdelavo

4.5 Tehnični podatki vezja

- Vezje št. 1

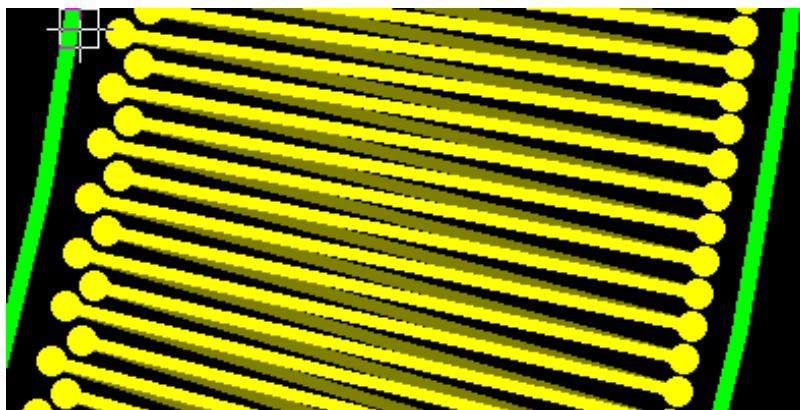
Pri vezju št. 1 sem naredil pokovinjene izvrtine zamaknjene po notranjem in zunanjem obodu.



Slika 28: Vezje z zamaknjenimi notranjimi in zunanji izvrtinami

- Vezje št. 2

Pri vezju št. 2 pa so pokovinjene izvrtine zamaknjene le po notranjem obodu.



Slika 29: Vežje z zamaknjenimi notranjimi izvrtinami

Tabela 1: Tabela karakteristik tuljav Rogowski

	vezje št. 1	vezje št.2
Število ovojev: N_1	1	1
Število ovojev tuljave: N_2	711	712
Dolžina vezi: d [mm]	9,63	9,83
Debelina vezja: D [mm]	1,0	1,0
Srednja dolžina vezja: l_{SR} [mm]	358,3	358,3
Presek ovoja: S [mm ²]	9,63	9,83
Konstanta tuljave: K [nH]	24,02	24,55

Srednjo dolžino vezja sem izračunal s (4.9)

$$l_{SR} = 2 \cdot \pi \cdot r_{SR} . \quad (4.9)$$

Presek tuljav Rogowski sem določil s (4.10)

$$S = d \cdot D . \quad (4.10)$$

Za izračun konstante K vezij pa sem preoblikoval (3.8), tako sem dobil (4.11)

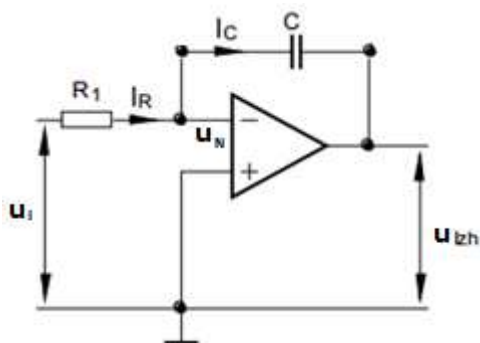
$$K = N_1 \mu_0 \frac{N_2 S}{l_{SR}} . \quad (4.11)$$

N_2 celotno število ovojev tuljave Rogowski

Konstanti tuljav Rogowski sta prišli malce drugačni, kar sem tudi pričakoval. Temu je botrovalo različno število ovojev, presek ovoja in dolžina vezi.

5 INTEGRATOR

Skladno s podano teorijo v poglavju 3, sem na izhod tuljave Rogowski dodal integrator, saj je napetost tuljave potrebno še integrirati, če hočemo dobiti informacijo o trenutni vrednosti merjenega toka vodnika.



Slika 30: Osnovna shema integratorja

Pri integratorju na sliki 30 je izhod integratorja povezan preko kondenzatorja C , na invertirajoči (-) vhod. To povzroči, da sta tokova I_R in I_C enaka. Izračuna pa se ju

$$I_R = \frac{u_I - u_N}{R_1} \quad (5.12)$$

$$I_C = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{d(u_N - u_{IZH})}{dt}. \quad (5.13)$$

Ker pa je napetost na neinvertirajočem (-) vhodu enaka 0, potem sledi

$$I_R = \frac{u_I}{R_1} \quad (5.14)$$

$$I_C = -C \frac{du_{IZH}}{dt}. \quad (5.15)$$

Tokova se nato enači in pridemo do enačbe

$$\frac{u_I}{R_1} = -C \frac{du_{IZH}}{dt} \quad (5.16)$$

$$du_{IZH} = -\frac{1}{R_1 C} u_I dt. \quad (5.17)$$

Če integriramo obe strani, se nam izraz preoblikuje v (5.18). Pri tem se upošteva da je u_I identična u_{VH} .

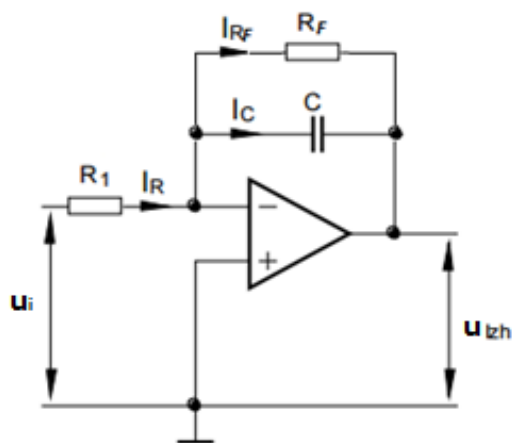
Torej integrator je komponenta, katere izhodni signal je časovni integral vhodnega signala, kar nam opisuje enačba (5.18). Izhodna napetost u_{IZH} je za 90° premaknjena od vhodne u_{VH}

$$u_{IZH} = -\frac{1}{R_1 C} \int u_{VH} dt. \quad (5.18)$$

Enačba (5.19) nam določa vhodno napetost integratorja u_{VH} , ki pa je v našem primeru enaka inducirani napetosti tuljave u_I

$$u_I = u_{VH} = -K \frac{di_1}{dt}. \quad (5.19)$$

Integrator nam zagotovi, da je njegov izhodni signal proporcionalen toku, ki ga merimo s tuljavo Rogowski.



Slika 31: Shema integratorja z uporom R_F

Shemo integratorja realiziranega z operacijskim ojačevalnikom prikazuje slika 31.

Če si predstavljamo upor R_1 kot impedanco Z_1 , kondenzator C in upor R_F pa kot impedanco Z_2 , potem velja razmerje po enačbi (5.22)

$$Z_1 = R_1 \quad (5.20)$$

$$Z_2 = \frac{R_F \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_F + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_F}{1 + j\omega C R_F} \quad (5.21)$$

$$\frac{U_{izh}}{U_{vh}} = - \frac{Z_F}{Z_1} \quad (5.22)$$

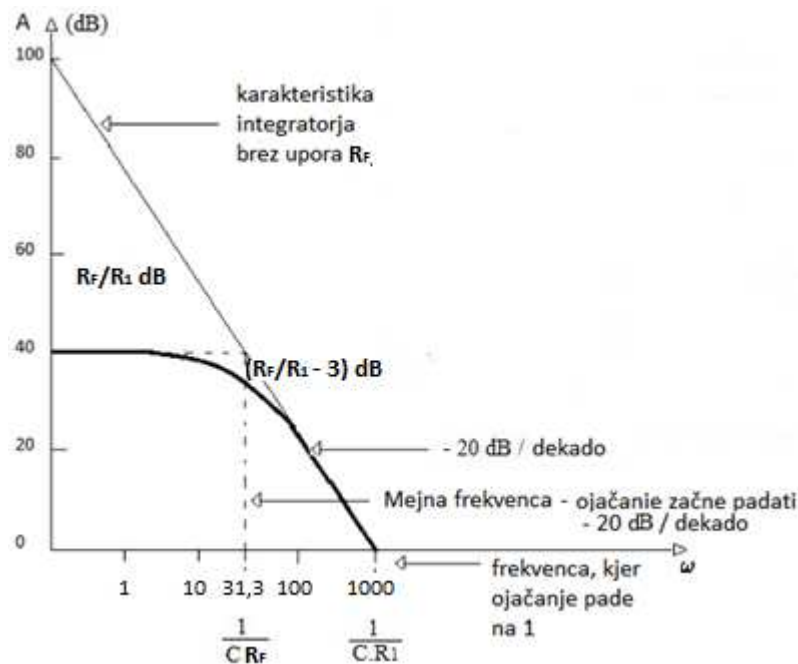
Dobimo enačbo (5.23), kjer desni del za enačajem predstavlja zapis člena 1. reda

$$\frac{U_{IZH}}{U_{VH}} = - \frac{R_F}{R_1} \frac{1}{1 + 2\pi f C R_F} \quad (5.23)$$

Enačba (5.24) pa predstavlja ojačenje integratorja A

$$A(f) = - \frac{R_F}{R_1} \frac{1}{1 + 2\pi f C R_F} \quad (5.24)$$

Z uporom R_1 in kondenzatorjem C spreminjamo časovno konstanto integratorja. V bistvu je časovna konstanta τ definirana kot $R_1 C$. Vrednost $1 / R_1 C$ je t.i. mejna frekvenca pri kateri ojačenje teoretično pade na 1. Dodani upor R_F , ki je vzporedno vezan k C , nam služi za zmanjšanje ojačenja pod mejno frekvenco ($1 / R_F C$), pri kateri prične ojačenje padati s strmino - 20 dB / dekada.



Slika 32: Karakteristika integratorja [16]

5.1 Integrator z operacijskim ojačevalnikom

Integrator sem realiziral z operacijskim ojačevalnikom AD8599. Glede na njegove specifikacije sem priredil napravo za merjenje določene amplitude in frekvence toka.

Nazivna napetost operacijskega ojačevalnika je ∓ 15 V, tako da sem uporabil simetrično napajalno napetost $u = \mp 12$ V.

Najprej je potrebno izračunati časovno konstanto $R_F C$, preko katere sem določil upor R_F in kondenzator C , z enačbo (5.26). Za spodnjo mejo sem vzel frekvenco 5 Hz. Enačba je izražena iz prvotne (5.25), ki določa mejno frekvenco, kjer začne ojačenje pospešeno padati, to je 20 dB / dekada. Upor R_1 sem določil že na začetku in sicer na 10 k Ω .

$$2\pi f = \frac{1}{R_F C} \quad (5.25)$$

$$R_F C = \frac{1}{2\pi f} \quad (5.26)$$

$$R_F C = 31,9 \text{ ms}$$

Nato pa je potrebno še določiti komponenti R_F in C .

$$R_F = 300 \text{ k}\Omega$$

$$C = 100 \text{ nF}$$

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ sem določil na začetku

Preko ojačenja A in pa izhodne napetosti lahko izračunamo vhodno napetost u_{vH} (5.28) z obračanjem enačbe (5.27)

$$A = \frac{u_{iZH}}{u_{vH}} \quad (5.27)$$

$$u_{vH} = \frac{u_{iZH}}{A} \quad (5.28)$$

Potrebno je še izračunati amplitudo toka po enačbi (5.30), ki jo dobimo iz enačbe (5.29)

$$u_{vH} = K \frac{di_1}{dt} = K \cdot j \cdot \omega \cdot i_1 \quad (5.29)$$

$$i_1 = \frac{u_{vH}}{K 2\pi f} \quad (5.30)$$

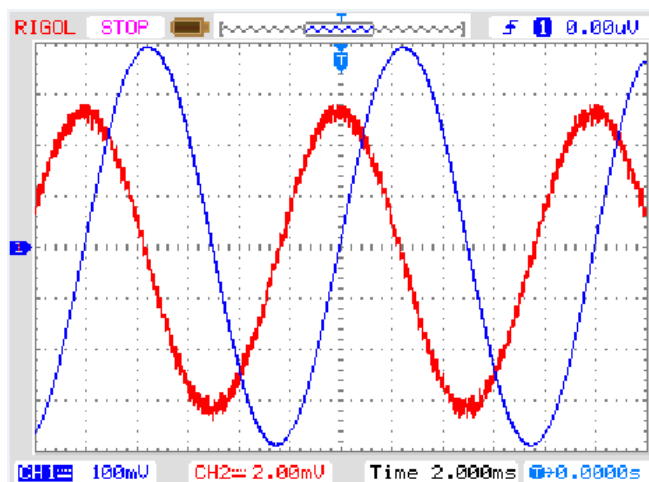
Pri operacijskem ojačevalniku je pomemben podatek tudi "slew rate" SR (enačba (5.31)), ki označuje maksimalen porast izhodne napetosti operacijskega ojačevalnika – in je le poenostavljeno merilo za podajanje zgornje frekvenčne meje operacijskega ojačevalnika. Če torej ne želimo dodatnih popačenj oblike izhodne napetosti, mora njen odvod biti vedno manjši od $SR = 14 \text{ V} / \mu\text{s}$ (kolikor znaša SR izbranega operacijskega ojačevalnika). Slednja omejitev mi posredno omejuje tudi časovni porast merjenega toka, ki ga ob izbrani časovni konstanti integratorja in konstrukcijski konstanti tuljave lahko izmerim

$$SR = \left. \frac{du_{iZH}}{dt} \right|_{\max} = \frac{d\left(-\frac{1}{CR_1} \int u_{vH} dt\right)}{dt} = -\frac{1}{CR_1} K \left. \frac{di_1}{dt} \right|_{\max} \quad (5.31)$$

6 MERJENJE KONSTANTE K

Okrog vodnika, po katerem teče tok 400 A pri frekvenci 100 Hz, sem dal tuljavo Rogowski št. 2. Priključil sem jo preko sonde na osciloskop. Zraven sem vodnik objel še s tokovnimi kleščami, ki sem jih koristil kot referenčni merilnik toka v vodniku. Tokovne klešče so imele

občutljivost 1000 A / V, tako da je bila glede na razdelke in periodo (slika 33) tok 400 A in frekvenco 100 Hz.



Slika 33: Tok vodnika - pomerjeno z ref. merilnikom toka (Ch 1 - moder), izhodna napetost tuljave Rogowski (Ch 2 - rdeč)

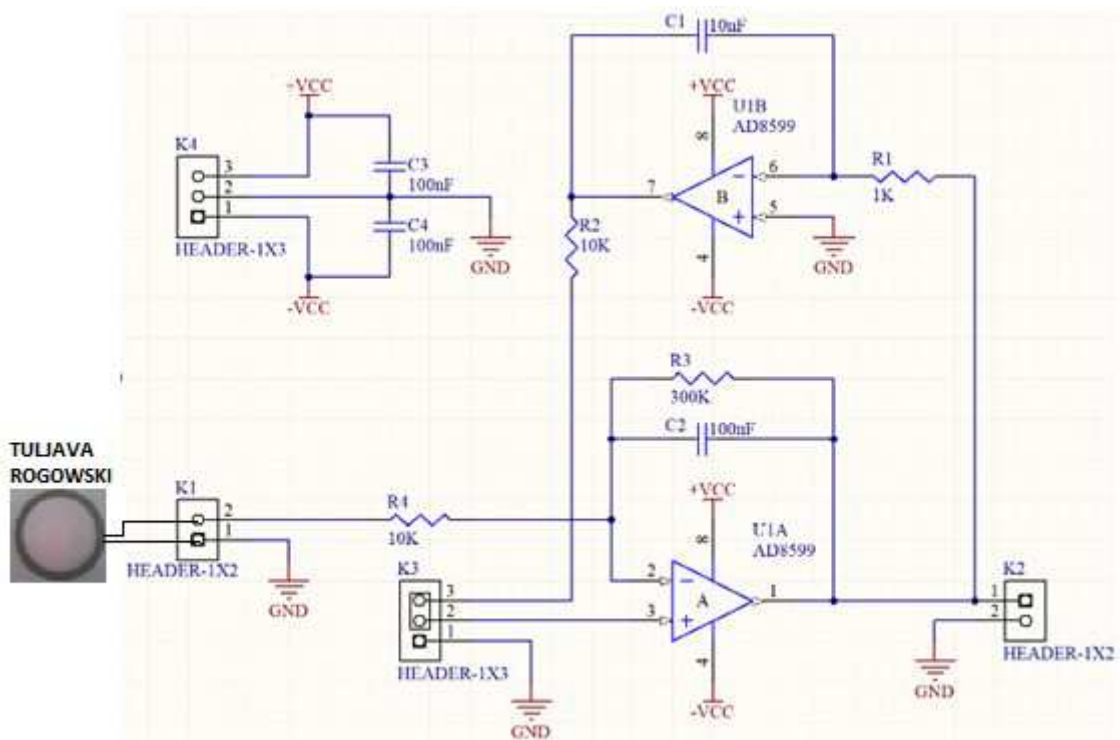
Preko izmerjene napetosti iz tuljave sem lahko določil konstanto K izdelane tuljave Rogowski, ki je po izračunu z malce obrnjeno enačbo (5.30), torej z enačbo (5.32), prišla do vrednosti 26,9 nH. Po teoretičnih izračunih pa je njena vrednost znašala 24,55 nH.

$$K = \frac{u_{vH}}{2\pi f i_1} \quad (5.32)$$

Ponovil sem enak postopek še za tuljavo Rogowski št. 1, kjer sem dobil $K = 26,6$ nH, po teoretičnih izračunih pa je znašala 24,02 nH.

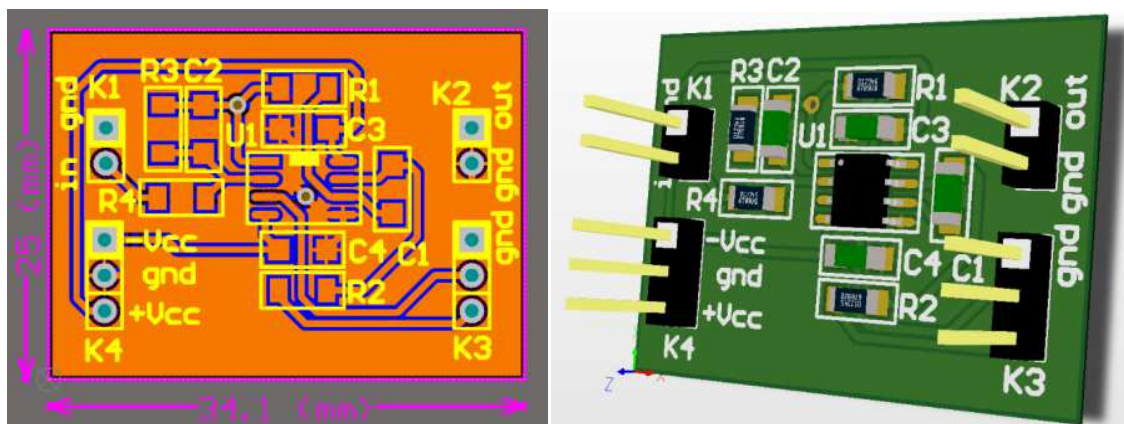
6.1 Shema merilnega integratorja

Za meritev sem uporabil vezje na sliki 34. Izvedeno je s povratno vezavo še enega integratorja, ki sem ga uporabil zaradi problema "lezenja". To je premikanje napetosti na izhodu v + ali v – nasičenje po y – osi na osciloskopu. S tem povratnim integratorjem sem dosegel, da sem na izhodu dobil izhodni signal, ki je v fazi s signalom iz tokovnih klešč. Da pa sta bila signala v fazi, je bilo treba pravilno izbrati časovno konstanto R_3C_2 .

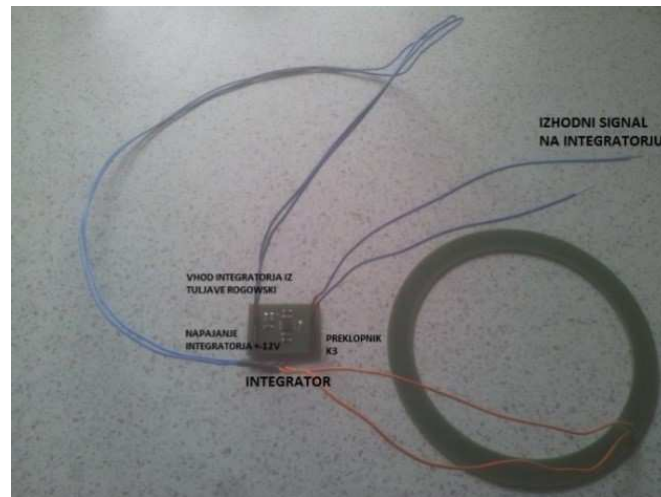


Slika 34: Vezje za meritev toka preko moje tuljave Rogowski in integratorja

Vezje integratorja sem se odločil realizirati na tiskanem vezju, ki ga prikazuje slika 35.



Slika 35: Tiskano vezje integratorja brez elementov (levo) in z elementi (desno) pred izdelavo



Slika 36: Moja naprava za merjenje s tuljavo Rogowski in integratorjem

Po izdelavi vezja in pritrdjevanju elementov nanj, sem priključil na vhod integratorja še svojo tuljavo Rogowski in tako je moj izdelek pripravljen na meritev, kot vidimo na sliki 36.

6.2 Meritev z mojim merilnikom

Tabela 2: Tabela meritev izvedenih z mojo napravo za merjenje

		K_1	K_1	K_1	K_1	K_1	K_2	K_2	K_2	K_2	K_2
f	i_1	u_{VH}	u_{IZH}	$i_{(IZR)}$	u_{VH}/i_1	u_{IZH}/i_1	u_{VH}	u_{IZH}	$i_{(IZR)}$	u_{VH}/i_1	u_{IZH}/i_1
[Hz]	[A]	[mV]	[mV]	[A]	[μ V/A]	[μ V/A]	[mV]	[mV]	[A]	[μ V/A]	[μ V/A]
100	240	4,4	5,8	263,4	18,3	24,2	4,5	6	266,4	20,0	26,0
200	160	5,5	4	164,6	34,4	25	5,7	4,1	168,7	36,3	26,1
300	115	6,0	2,9	119,7	52,2	25,2	6,5	3,1	128,3	57,5	27,4
400	90	6,2	2,25	92,8	68,9	25,3	6,75	2,5	99,9	76,7	28,4
500	75	6,4	1,85	76,6	87,7	25,3	7,15	2,1	84,6	99,3	29,2
600	62	6,5	1,6	64,9	104,8	25,8	7,2	1,8	71,0	118,0	29,5
700	53	6,8	1,35	58,2	128,3	25,5	7,1	1,6	60,0	134,0	30,2
800	46	6,2	1,2	46,4	132,0	25,6	7,1	1,5	52,5	154,3	32,6
900	42	6,2	1,1	41,2	148,0	26,2	7,0	1,4	46,0	166,6	33,3
1000	38	6,1	1,0	36,5	160,5	26,3	6,75	1,2	40,0	182,4	32,4

Meritve sem opravljal z obema tuljavama. S tuljavo št. 1 so označeni stolpci pod K_1 , s tuljavo št. 2 pa pod K_2 .

f	frekvenca toka merjenega vodnika
i_1	amplituda toka merjenega vodnika
u_{VH}	vhodna napetost integratorja, oz. izhodna napetost tuljave Rogowski
u_{IZH}	izhodna napetost integratorja
$i_{(IZR)}$	izračunan tok na merjenem vodniku po enačbi (5.30)
u_{VH}/i_1	razmerje vhodne napetosti integratorja in toka na vodniku
u_{IZH}/i_1	razmerje izhodne napetosti integratorja in toka na vodniku

Za meritve sem uporabil izmenični tok med 37 A in 240 A, pri razponu frekvence od 100 Hz pa do 1000 Hz. Na začetku sem s pomočjo tokovnih klešč na osciloskopu nastavil tok na 240 A in frekvenco na 100 Hz, potem pa sem po korakih povečeval le frekvenco do 1000 Hz, tok pa je padal do vrednosti 37 A. Tok je tekel čez vodnik, ki sem ga objel s tuljavo Rogowski in jo priključil na vhod integratorja. Poleg tuljave Rogowski sem vodnik objel tudi s tokovnimi kleščami. Meritev sem opravljal na osciloskopu, na katerega sem priključil na kanal ena signal iz tokovnih klešč, ki mi je neposredno prikazoval amplitudo toka, na kanal dva pa sem priključil izhod integratorja.

Na začetku meritev sem imel problem, ker nisem imel v fazi obeh signalov. To se mi je zgodilo, ker nisem pravilno izračunal časovne konstante. Napravo sem dimenzioniral za veliko večje frekvence in s tem premaknil mejno frekvenco daleč naprej po x – osi, tako da moja naprava ni bila dimenzionirana za meritve, ki sem jih opravljal. Po ponovnem izračunu časovne konstante sem dobil signala v fazi, torej sem pravilno določil časovno konstanto.

V tabeli 2 sem vpisal rezultate meritev. Opravil sem jih 10 in opazil odstopanja med merjenim tokom preko kontrolnih tokovnih klešč in izračunom le - tega preko napetosti, ki sem jo dobil iz tuljave Rogowski. Glede na to, da je bil izhodni signal tako iz tuljave kot tudi iz integratorja malce popačen, sem odstopanja tudi pričakoval, zaradi točnosti pri odčitavanju.

7 ZAKLJUČEK

Izdelal sem dve vezji tuljave Rogowski na štiri plastnem tiskanem vezju. Izdelal sem dve z namenom, da dosežem čim boljši izkoristek razporeditve ovojev v dveh različnih izvedbah. Uspešno sem izkoristil prostor za izvedbo tuljav pri podanih dimenzijah ter izbral postopke, s katerimi sem iztisknil maksimum toleranc za povezave in pokovinjene izvrtine na tiskanih vezjih. Tuljava št. 2 je imela en ovoj več, zato je že pri teoretičnem izračunu prišla njena konstanta malce večja kot pri tuljavi št. 1. Tudi pri merjenju konstante je bila ta malce večja, kar sem nekako tudi pričakoval. Presenečen sem bil pri primerjavi rezultatov med njenima meritvama. Pri izračunu toka iz izhoda tuljave Rogowski, sem dobil večji približek vrednosti realnega toka na merjenem vodniku s tuljavo št. 1. Pri 100 Hz sta bili pri obeh izračunani vrednosti močno zgrešeni, vendar se je pri naslednjih meritvah vrednost zelo približala realni.

Pri dimenzioniranju integratorja sem opazil, kako zelo je pomembna časovna konstanta, saj sem na začetku z napačno izbiro dobil signala toka merjenega vodnika iz tokovnih klešč in izhodnega signala iz integratorja fazno premaknjena. Ob ponovnem izračunu časovne konstante, prirejenem za naše meritve, sem zagotovil signala v fazi.

Uspelo mi je izdelati tuljavo Rogowski na TV in ji dograditi integrator, kar je bil cilj moje diplomske naloge. Menim, da bi lahko z nadaljnjimi podrobnimi raziskavami kakovost signalov na osciloskopu in s tem tudi rezultate meritev izboljšal.

8 LITERATURA

- [1] Wikipedia, „Walter Rogowski,“ [Elektronski]. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Walter_Rogowski. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [2] Wikipedia, „Rogowski-Institut der RWTH Aachen,“ [Elektronski]. Dosegljivo: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9f/Aachen_Rogowskiinstitut.jpg/220px-Aachen_Rogowskiinstitut.jpg. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [3] „What is a Rogowski coil,“ [Elektronski]. Available: <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>. [Poskus dostopa 25. 3. 2016].
- [4] „Wikipedia Rogowski coil,“ [Elektronski]. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [5] L. A. Kojovic at al., „Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying,“ 09. 2010, [Elektronski]. Dosegljivo: http://www.pes-psrc.org/Reports/Practical%20Aspects%20of%20Rogowski%20Coil%20Applications%20to%20Relaying_Final.pdf. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [6] H. Green in L. Buzzard, „Get Involved with Low Cost Rogowski Coil Current Sensor Development. RevA,“ 04. 2015, [Elektronski]. Dosegljivo: <https://electronicsknowhowblog.files.wordpress.com/2015/04/get-involved-with-low-cost-rogowski-coil-current-sensor-development-revb.pdf>. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [7] Aleš Moljk, „Tiskana vezja,“ Elgoline: Podskrajnik, Slovenija, dnevnik pripravništva, 2007.
- [8] „How Do Rogowski Coils Work?,“ 04. 2015, [Elektronski]. Dosegljivo: <http://homepage.ntlworld.com/rocoil/principle.htm>. [Dostopano 25. 3. 2016].
- [9] „raspberrypcbs07.jpg,“ [Elektronski]. Dosegljivo: <https://wlan-si.net/media/files/2012/08/11/raspberrypcbs07.jpg>. [dostopano 09. 4. 2016].
- [10] [Qualification](#) and Performance Specification for High Density Interconnect (HDI) Layers or Boards, A standard developed by IPC, ANSI / IPC – 6016, 1999.

- [11] „Passive Components Aren't Really So Passive (Part 3): Printed Circuit Boards,“ 19. 7. 2013, Maxim integrated [Elektronski]. Dosegljivo: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5800>. [Dostopano 09. 4. 2016].
- [12] „Are traces exiting a pad at an angle bad?,“ 19. 7. 2013, Electrical engineering [Elektronski]. Dosegljivo: <http://electronics.stackexchange.com/questions/76416/are-traces-exiting-a-pad-at-an-angle-bad> . [Dostopano 09. 4. 2016].
- [13] N. Lengyel. „Soldermask on via-holes in case of chemical Nickel-Gold surface finish,“ 14. 6. 2012, Eurocircuits Printed circuit blog [Elektronski]. Dosegljivo: <http://www.eurocircuits.com/blog/39-via>. [Dostopano 09. 4. 2016].
- [14] „Q&A for PCB service,“ 20. 3. 2016, Elecrow [Elektronski]. Dosegljivo: http://www.elecrow.com/wiki/index.php?title=Q%26A_for_PCB_service. [Dostopano 09. 4. 2016].
- [15] I. Pavlič. „Operacijski ojačevalnik“ 11. 2009, Spletna stran za elektroniko [Elektronski]. Dosegljivo: <http://users.volja.net/ipavlic/Operacijski%20oja%E8evalnik.pdf>. [Dostopano 23. 4. 2016].
- [16] Wikipedia , „OP amp integrator,“ [Elektronski]. Dosegljivo: https://en.wikipedia.org/wiki/Op_amp_integrator. [Dostopano 23. 4. 2016].
- [17] P. Zajec. „PREDAVANJE_5_Rogowski2.pdf“ 23. 06. 2006, Fakulteta ta elektrotehniko [Elektronski]. Dosegljivo: http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/UNIVSS/meri_pret/PREDAVANJE_5_Rogowski2.pdf. [Dostopano 10. 5. 2016].
- [18] „OP – Amp Integrator Circuit,“ 21. 10. 2015, Youtube [Elektronski]. Dosegljivo: <https://www.youtube.com/watch?v=GVEIk0B3ky0>. [Dostopano 28. 5. 2016].
- [19] „Op Amp Circuits: Analog Computers from operational amplifiers,“ 2. 2. 2016, Youtube [Elektronski]. Dosegljivo: https://www.youtube.com/watch?v=_o4ScgRZtNI. [Dostopano 28. 5. 2016].

