

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Simon Žabkar

**Razvoj analognega vezja naprave za merjenje  
tokovnih udarov**

Diplomsko delo

Mentor: prof. dr. Andrej Žemva, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2015

## ZAHVALA

Zahvala gre sodelavcem Oddelka elektronike, podjetja Iskra Zaščite, d.o.o., s katerimi sem sodeloval v času razvoja produkta.

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Andreju Žemvi za podporo ter mentorstvo.

Zahvaljujem se tudi družini za moralno podporo, vzpodbudne besede v času pisanja diplomskega dela, še posebej Klavdiji.

## **POVZETEK**

V diplomskem delu je opisan razvoj naprednega števca tokovnih udarov ProSECIII, katerega glavna funkcija je zabeležiti čas ter izmeriti amplitudo udara. Naprava se uporablja v kombinaciji s prenapetostnimi zaščitami. Njena vloga je zagotoviti kontrolo nad električnimi pojavi, ki se dotikajo prenapetostnih zaščit. Sem spadajo predvsem prenapetosti, katerih energija se na zaščitnih napravah sprošča v obliki udarnih tokov. Začetni del diplomskega dela se dotika prenapetostnih zaščit ter potrebe po izdelavi naprednega števca. Po določitvi vseh smiselnih funkcij naprave sledi raziskovalni del; v le tem se je določil princip, po katerem se bo izvajala meritev. Izbiri indirektnega načina merjenja tokovnega udara sledi razvoj analognega vezja, katerega vloga je shraniti temensko vrednost. Ker je temenska vrednost napetosti izhoda analognega vezja proporcionalna amplitudi tokovnega udara, lahko s preračunom enostavno dobimo le to informacijo. Za preračun poskrbi program, vpisan v mikrokontroler, ki po pretvorbi izpiše vrednost amplitude na LCD zaslon.

Osnovni namen izdelane naprave je opazovanje prenapetostnih pojavov v sistemu in s tem pravočasno zaznavanje preobremenjenosti trenutno instaliranih prenapetostnih zaščit.

Ključne besede: prenapetosti, ProSECIII, števec tokovnih udarov, merjenje amplitude tokovnega udara, principi meritev toka

## **ABSTRACT**

This thesis describes the development of the device which observes transients on surge protection devices. The device, which is named ProSECIII (Surge Event Counter), measures current amplitude and stores it in a memory with time and date stamp. It also has many features like LCD for history reading, wireless communication, remote contacts etc. The thesis describes research and development of analogue part of a circuit, which is based on Rogowski principle for current measurement. After design and implementation phase, the tests procedures follow. There is also a chapter about shielding the device to be immune to electromagnetic interference.

The main feature of this device is providing information about transients which passes SPDs and SPD status.

Keywords: overvoltage, ProSECIII, surge protection counter, transient amplitude measurement, current measurement principles

## VSEBINA

1. UVOD .....	1
2. DOLOČITEV SPECIFIKACIJ TER FUNKCIJ NAPRAVE ProSECIII .....	5
3. IZBIRA NAČINA MERJENJA AMPLITUDE TOKOVNEGA UDARA.....	8
3.1 DIREKTNO MERJENJE EL. TOKA - UPOROVNO .....	8
3.2 INDIREKTNO MERJENJE EL. TOKA .....	9
3.2.1 Tokovni transformator .....	9
3.2.2 Hallov senzor .....	10
3.2.3 Tuljava Rogowski.....	12
3.3 PRIMERJALNA TABELA .....	13
4. NAČRTOVANJE ANALOGNEGA DELA .....	14
4.1 SENZOR TER PRILAGODITVENO VEZJE .....	14
4.2 INTEGRATOR.....	16
4.2.1 Pasivni integrator .....	16
4.2.2 Aktivni integrator .....	18
4.3 USMERNIK.....	21
4.4 DETEKTOR VRŠNE VREDNOSTI.....	22
4.5 PREKINITVENO VEZJE .....	24
5. NAPAJALNI DEL ANALOGNEGA TER DIGITALNEGA DELA VEZJA .....	25
5.1 IZBIRA NAPETOSTNIH NIVOJEV .....	25
5.2 CHARGE PUMP .....	25
5.3 STEP UP PRETVORNIK.....	26
5.4 FUNKCIJA »POWER DOWN«.....	27
6. EMC MERITVE .....	28
6.1 SPLOŠNO O EMI/EMC.....	28
6.2 PLAN MERITEV .....	29

6.3	FILTRI IN ŠČITENJE NAPAVALNEGA DELA VEZJA .....	30
6.3.1	Zaščita naprave pred prenapetostmi na AC liniji .....	30
6.3.2	Zaščita naprave pred »konduktivnimi« motnjami .....	31
6.4	ŠČITENJE VEZJA PRED ELEKTROMAGNETNIM POLJEM .....	35
6.4.1	Faradayeva kletka .....	35
7.	MERITVE PARAMETROV NAPRAVE .....	37
7.1	MERITEV TOČNOSTI .....	37
7.2	TEST ENAKOSTI SENZORJEV .....	40
8.	KOMUNIKACIJA NAPRAVE .....	41
8.1	»REMOTE CONTACT« KOMUNIKACIJA .....	41
8.2	NAPREDNA KOMUNIKACIJA .....	41
9.	NADGRADNJA NAPRAVE .....	42
10.	ZAKLJUČEK .....	43
11.	LITERATURA .....	44

## SEZNAM SLIK

Slika 1: Prikaz vzrokov nastalih škod .....	1
Slika 2: Primer tokovnega razelektritvenega udara oblike $8/20\mu\text{s}$ .....	2
Slika 3: Primerjava karakteristik varistorskega odvodnika ter Zener diode.....	3
Slika 4: Način direktnega merjenja el. toka z merilnim uporom.....	8
Slika 5: Način indirektnega merjenja el. toka s tokovnim transformatorjem.....	10
Slika 6: Način indirektnega merjenja el. toka s Hallovim senzorjem .....	11
Slika 7: Način indirektnega merjenja el. toka s tuljavo Rogowski.....	12
Slika 8: Prototip senzorja.....	14
Slika 9: Izhod senzorja brez dodatne induktivnosti .....	16
Slika 10: Izhod senzorja z dodatno serijsko induktivnostjo .....	16
Slika 11: RC pasivni integrator .....	16
Slika 12: Izhod integratorja - uporovno breme $1\text{k}\Omega$ .....	17
Slika 13: Izhod integratorja - kapacitivno breme $100\text{nF}$ .....	17
Slika 14: Primer izbire ojačevalnika s prenizkim "slew rate" .....	19
Slika 15: Shema aktivnega integratorja .....	20
Slika 16: Polnovalni usmernik.....	22
Slika 17: Detektor vršne vrednosti .....	22
Slika 18: Detektor vršne vrednosti - izvedba z Mosfet tranzistorjem.....	24
Slika 19: Poenostavljeno delovanje napetostnega inverterja.....	26
Slika 20: Poenostavljeno delovanje "step up" pretvornika.....	26
Slika 21: AC del napajanja naprave ProSECIII.....	30
Slika 22: Prenos "common mode" tipa motenj na porabnik.....	31
Slika 23: Prenos "differential mode" tipa motenj na porabnik .....	31
Slika 24: Delovanje CM dušilke.....	32
Slika 25: Ščitenje vezja pred diferenčnimi motnjami.....	33
Slika 26: Spreminanje impedance kondenzatorja s frekvenco .....	34
Slika 27: Zgornji del ščita naprave ProSECIII .....	36
Slika 28: Testno okolje ProSECIII .....	38
Slika 29: ProSECIII izven kovinske omare.....	38
Slika 30: Naprava ProSECIII .....	43

## SEZNAM TABEL

Tabela 1: Primerjava metod merjenja el. toka glede na njihove lastnosti .....	13
Tabela 2: Testni plan naprave ProSECIII.....	29
Tabela 3: Vpliv EM polja na pogrešek merilnega rezultata naprave ProSECIII (odmik 10 cm) .....	38
Tabela 4: Vpliv EM polja na pogrešek merilnega rezultata ProSECIII (odmik 5 cm) .....	39
Tabela 5: Del testa prikazuje odstopanja različnih senzorjev.....	40

## SEZNAM ENAČB

Enačba (1): Odvisnost inducirane napetosti od parametrov tuljave ter čas. poteka toka .....	12
Enačba (2): Medsebojna odvisnost napetosti integratorja .....	20
Enačba (3): Lastna resonančna frekvenca kondenzatorja.....	33



## SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

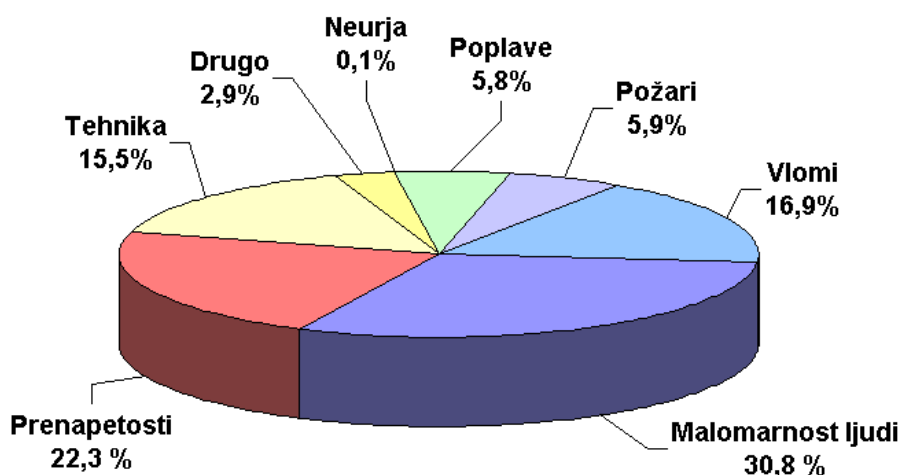
TVS	Transient voltage supressor	Dioda za omejevanje prenapetosti
PSRR	Power supply rejection ratio	Imunost ojačevalnika na motnje napajanja
ProSECI	Surge event counter	Detektor tokovnih udarov
PD	Peak detector	Detektor vršne vrednosti
A/D	Analog/Digital	Analogno/Digitalni
ESR	Equivalent series resistance	Ekvivalentna serijska upornost
AC	Alternating current	Izmenična napetost/tok
DC	Direct current	Enosmerna napetost /tok
EM	Electromagnetic	Elekromagnetni
EMI	Electromagnetic interference	Elektromagnetna interferenca
EMC	Electromagnetic compatibility	Elektromagnetna združljivost
CM	Common mode	Skupni način
DM	Differential mode	Diferenčni način
GDT	Gas discharge tube	Plinski odvodnik
L	Inductance	Induktivnost
C	Capacitance	Kapacitivnost

## 1. UVOD

Naprava ProSECIII je merilnik amplitude tokovnih udarov z dodatnimi funkcijami. Da bi razumeli namembnost naprave, je najprej potrebno nekaj besed nameniti okolju oz. aplikaciji, kateri je le-ta namenjena.

Naprava se uporablja skupaj s prenapetostnimi zaščitami oz. SPD-ji (angl.: surge protection devices). Z besedo prenapetost opisujemo povišanje napetostnega potenciala med dvema točkama do mere, pri kateri je možna nevarnost poškodbe oziroma uničenje izolacije na električnih napravah ali sistemih.

Po statistikah zavarovalnic so prenapetosti drugi največji povzročitelj nastalih škod.



Slika 1: Prikaz vzrokov nastalih škod

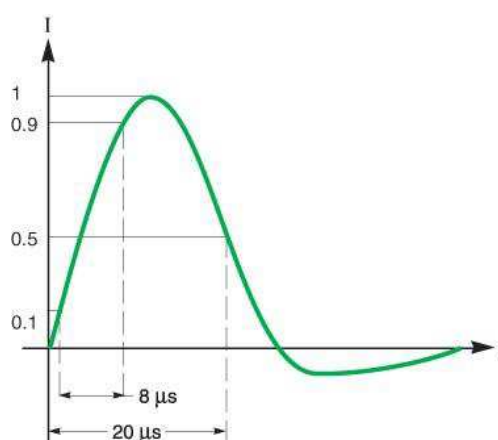
Atmosferski razelektritveni tok oz. strela v svoji okolici ustvarja neželene vplive. Običajno se ogroženost širi v prostor v oddaljenosti 1,5 km od udara. Za širjenje prenapetostnih vplivov ni nujna galvanska povezava, ampak se-le ti po prostoru širijo tudi brez direktne povezave s krajem atmosferske razelektritve.

Atmosferske razelektritve se v okolico prenašajo na tri osnovne načine:

- **galvansko** z direktno razelektritvijo v zgradbo ali njeno napeljavo;
- z indirektno razelektritvijo v neposredno bližino zgradbe ali njene napeljave preko **magnetne indukcije**;
- **kapacitiven prenos** ob indirektni razelektritvi v neposredno bližino zgradbe ali njene napeljave.

Za atmosferski razelektritveni val je značilna oblika električnega toka v obliki udarnega toka z visoko vršno vrednostjo, amplitude nekaj kA do 200 kA.

Strelo po standardu opišemo z dvema oblikama udara. Oblika s časovnim potekom 10/350  $\mu$ s predstavlja direktni udar strele, medtem ko oblika 8/20  $\mu$ s predstavlja indirektni udar strele. Prva številka oblike udara predstavlja dvižni čas toka (od 10-90 % temenske vrednosti), druga številka pa predstavlja čas, v katerem tok pade na 50 % temenske vrednosti. Nenadna sprememba toka na začetku tokovnega udara povzroči močna magnetna polja, zaradi katerih se inducirajo visoke napetosti, ki predstavljajo nevarnost električnim porabnikom. Zaradi tega je poleg vršne vrednosti udara zelo pomembna tudi strmina naraščanja atmosferskega razelektritvenega toka [1].



Slika 2: Primer tokovnega razelektritvenega udara oblike 8/20 $\mu$ s

Z SPD-ji ščitimo električne porabnike pred prenapetostmi, ki so lahko posledica direktnega ali indirektnega udara strele. Prenapetosti povzročajo tudi stikalni manevri, delovanje varovalk, naključne povezave različnih energetskih sistemov, zemeljski stiki, elektrostatične razelektritve.

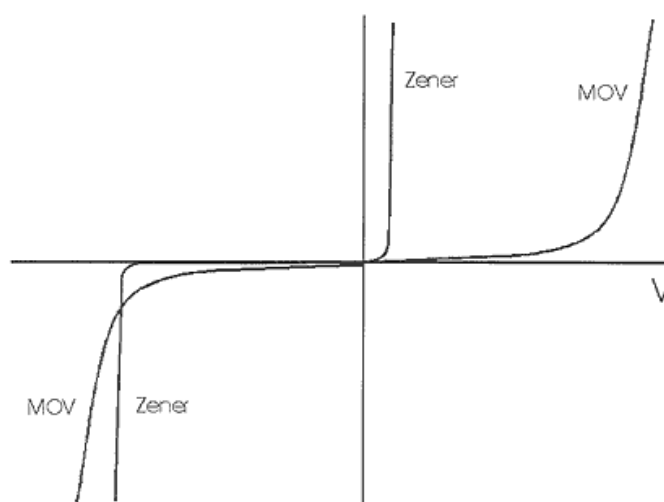
Prenapetostne zaščite glede na način delovanja razdelimo na zaščite s stikalno ter zaščite s stalno omejevalno karakteristiko. Omenjeni vrsti karakteristik pripadata določenim skupinam odvodnih elementov.

### **Odvodni elementi s stikalno karakteristiko:**

Zaščite s to vrsto elementov delujejo tako, da ob prenapetosti le-to kratko sklenejo. Delovanje odvodnika se lahko primerja s stikalom. Pod to vrsto elementov spadata prenapetostni plinski odvodnik (angl.:GDT) ter iskrišče. V primerjavi z iskrišči so plinski odvodniki manjši za iste odvodne tokove. Zanesljivo gašenje omrežnih nadaljevalnih tokov je pri iskrišču ali plinskem odvodniku zelo pomembno, saj le-ti lahko segajo od 100 A (vezava N-Pe) vse do 5 kA (vezava L-N).

### **Odvodniki s stalno omejevalno karakteristiko:**

Osnovna elementa z omenjeno karakteristiko sta varistor ter hitra dioda (angl.:TVS). Način delovanja teh vrst odvodnikov lahko opišemo kot napetostni delilnik. V času prenapetosti se upornost varistorja zmanjša, tako varistor odvede udarni tok, ki je odvisen od energije prenapetosti. V primerjavi z iskriščem se na varistorju v času odvajanja energije prenapetosti troši večja energija [2].



**Slika 3: Primerjava karakteristik varistorskega odvodnika ter Zener diode**

S pojavom prenapetosti se lastnosti prenapetostne zaščite naj ne bi spremenile, če so bile pri projektiranju sistema izbrane pravilno, glede na pričakovane obremenitve. Ker se pogoji v sistemu tekom časa spreminjajo, je postal smiseln nadzor nad obremenitvijo zaščit.

Z namenom kontrole nad količino ter amplitudo tokovnih udarov, ki so posledica prenapetosti v omrežju, je s tržišča prišla potreba po napravi, katere osnovna funkcija je beleženje tokovnih udarov s podatkom o amplitudi in času.

S pomočjo naprave ProSECIII, katere kratica pomeni »Surge Event Counter« oz. prevedeno števec tokovnih udarov, lahko spremljamo el. dogajanje na prenapetostnih zaščitah. To nam pomaga v primerih, kadar so v sistemu instalirane zaščite za nižje obremenitve od dejanskih, zaradi nepravilnega predvidevanja ali sprememb v sistemu po instalaciji. Da se izognemo odpovedi zaščit, slabi zaščiti porabnikov ter pogosti menjavi zaščit, je potreben nadzor, ki ga omogoča naprava ProSECIII. Ciljni trg je industrija ter telekomunikacije, kjer je nadzor in uporaba pravilno izbranih zaščit izredno pomembna zaradi posledičnega preprečevanja fizične škode na napravah ter zastojev dela.

## 2. DOLOČITEV SPECIFIKACIJ TER FUNKCIJ NAPRAVE ProSECIII

Pred začetkom dela na projektu je bilo potrebno v grobem določiti specifikacije naprave ter robne pogoje, pri katerih mora naprava delovati v mejah vnaprej določene točnosti. Zastaviti je bilo potrebno tudi smernice raziskovanja metod za merjenje visokih tokovnih pulzov.

### a) Merilno območje naprave:

S strani inženirjev energetike ter trga je prišla zahteva po merjenju tokov do 50 kA. Tok, ki sproži meritev in hkrati minimalni tok, ki ga naprava še izmeri, pa je bil določen na 500 A. Naprava mora pravilno izmeriti vršno vrednost, ne glede na obliko udara.

- Minimalni izmerjeni tok:  $I_{\text{MIN}} = 500 \text{ A}$
- Maksimalni izmerjeni tok:  $I_{\text{MAX}} = 50 \text{ kA}$

### b) Točnost naprave:

Predvidena je 5 % točnost instrumenta. To pomeni  $\pm 2.5 \text{ kA}$  napake pri maksimalni vrednosti meritve, kar je pri tokovnih udarih 50 kA precejšen izziv zaradi visokih elektromagnetnih motenj, ki lahko vplivajo na elektroniko v merilni napravi.

### c) Napajalna napetost naprave:

Ker je izdelek namenjen svetovnemu trgu, se je pojavila potreba po uporabi stikalnega napajalnika. Le-ta lahko drži zeleno izhodno napetost v širokem rangu vhodne napetosti in frekvence.

- Amplituda:  $U_{\text{AC}} = 110 - 240 \text{ V}$
- Frekvenca:  $f = 50 - 60 \text{ Hz}$

d) Funkcije programske ter strojne opreme:

Naprava ima možnost pregleda zgodovine tokovnih udarov, v kateri je zabeležena amplituda, čas ter datum. Ker je izdelek namenjen tudi prodaji pod drugimi blagovnimi znamkami, ima možnost izbire različnih barvnih tem.

Omogočena je uporaba vhoda »RC<sub>IN</sub>« (Angl.: Remote Controll input) ter relejnega izhoda »RC<sub>OUT</sub>« (Remote Controll output). V napravi je vgrajen tudi piskač, ki s piskom opozarja, da je prišlo do tokovnega udara.

Funkcije programske opreme:

- Amplituda / čas / datum
- Zgodovina
- Teme
- Nastavitve zaslona

Strojna oprema

- Vhod RC<sub>IN</sub>
- Relejni izhod RC<sub>OUT</sub>
- Piskač
- Senzorski vhod

e) Uporabniški vmesnik:

Za pregled informacij, zgodovine ter nastavitve naprave služi barvni LCD zaslon z osvetlitvijo. Zaslon ima 128 x 128 točk, 4096 barv ter 30 x 30 mm aktivne površine.

Za prehajanje med meniji ter nastavljanje naprave služijo 4 smerne tipke, ki so vgrajene v čelni foliji naprave.

- Barvni LCD zaslon z osvetlitvijo
- Štiri smerne tipke

f) Komunikacija:

Zaradi težnje po nadzoru detekcijskih in merilnih naprav na daljavo je bila izbrana komunikacija RS485. Kot brezžična možnost pa je bila izbrana »Xbee wireless« komunikacija.

- Serijska komunikacija RS232
- Brezžična komunikacija Xbee

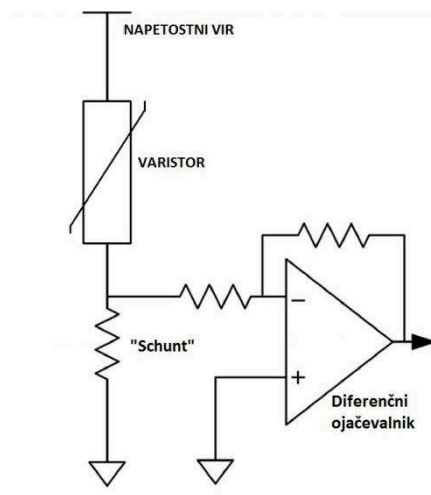


### 3. IZBIRA NAČINA MERJENJA AMPLITUDE TOKOVNEGA UDARA

Ker mora biti naprava sposobna meriti tokovne udare oz. prehodne pojave s časovnimi poteki  $8/20 \mu\text{s}$  ter  $10/350 \mu\text{s}$ , je bilo potrebno izbrati med dvema osnovnima principoma merjenja toka.

#### 3.1 DIREKTNO MERJENJE EL. TOKA - UPOROVNO

Metoda ima prednost enostavnosti ter linearnosti. Merilni upor je pri tej metodi vstavljen v merilni tokokrog, v katerem hočemo meriti električni tok. Tok skozi upor ustvari pretvorbo moči v toploto. Ta pretvorba povzroči napetostni signal, preko katerega lahko pri znani upornosti izračunamo električni tok. Poleg enostavnosti ter linearnosti je ta metoda v večini primerov ugodna z ekonomskega stališča [3].



Slika 4: Način direktnega merjenja el. toka z merilnim uporom

Zaradi dotične nestandardne aplikacije se pojavi problem pri omejeni ponudbi merilnih uporov za merjenje tokov reda 50 kA. Senzor postane dimenzijsko robusten, imeti mora nizek temperaturni koeficient upornosti zaradi visokih trenutnih moči ob udarih in posledično visokega segrevanja upora. Poleg tega na področju odvodnikov prekinitve ozemljitvenega vodnika niso zaželeni. V primeru izbire te vrste merjenja bi se pojavila potreba po izdelavi namenskega upora, kar izgubi v osnovi dobro lastnost cenenosti merilnega sistema.

## 3.2 INDIREKTNO MERJENJE EL. TOKA

Vrste merjenja el. toka preko elektromagnetnih sil, ki jih-le ta ustvarja:

- Tokovni transformator
- Hallov senzor
- Rogowski tuljava

### 3.2.1 Tokovni transformator

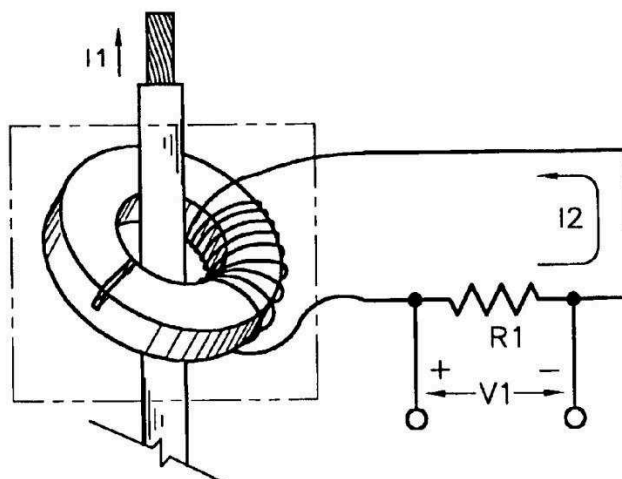
Idealni napetostni transformator ima zelo nizko izhodno impedanco in se obnaša kot napetostni vir, medtem ko ima idealni tokovni transformator visoko izhodno impedanco in se zato obnaša kot tokovni vir. Tok sekundarnega navitja je tako neodvisen od upornosti bremena. Željeno je, da ima breme kar se da nizko upornost.

Sekundarno navitje je običajno navito okrog jedra, medtem ko za primarno navitje pogosto služi le en vodnik skozi center toroida. Podatki transformatorja so podani kot razmerje ovojev in ne kot podatek o vhodni ter izhodni napetosti, kot pri napetostnih transformatorjih [4].

Bremenski upor, ki ga priključimo na izhod sekundarnega navitja, imenujemo »burden«. Breme nizke ohmske upornosti nam služi za pretvorbo toka v napetost.

Tokovni transformator ima dobro lastnost galvanske ločitve merilnega vezja ter inštalacije, na kateri izvajamo meritev toka.

Slaba lastnost pri uporabi »burden« upora je zelo nizek napetostni signal, kar pri prisotnosti visokih elektromagnetnih motenj predstavlja veliko verjetnost za napako med izvajanjem meritve.



Slika 5: Način indirektnega merjenja el. toka s tokovnim transformatorjem

Tokovni senzorji te vrste uporabljajo feromagnetno jedro, z namenom zvišanja impedance sekundarnega navitja. S tega razloga so uporabni le za merjenje izmeničnih veličin. V primeru tokovnih udarov iste polaritete v krajšem časovnem zaporedju obstaja velika verjetnost, da spravimo jedro transformatorja v zasičenje in s tem dobimo popolnoma napačen rezultat meritve.

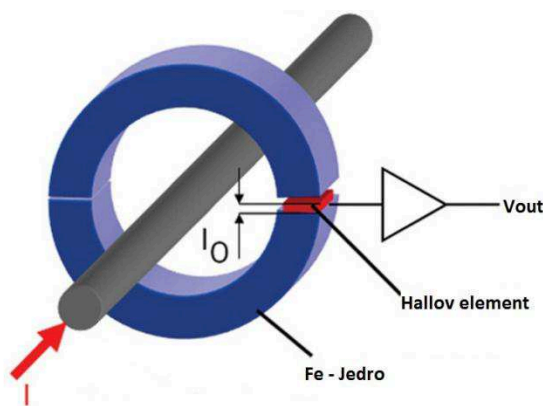
### 3.2.2 Hallov senzor

Hallov element je sestavljen iz tanke plasti prevodnega materiala z izhodnimi kontakti, nameščenimi pravokotno glede na smer električnega toka, ki ga želimo meriti. Ko prevodno plast izpostavimo magnetnemu polju, na izhodu dobimo napetost, ki je proporcionalna jakosti magnetnega polja. Ker je izhod elementa reda »uV«, Hallov element potrebuje dodatno elektroniko za doseg uporabnih napetostnih nivojev. Element v kombinaciji s potrebno elektroniko tvori Hallov senzor.

Ker je magnetno polje tokov lahko pozitivno ali negativno, imajo analogni Hallovi senzorji izhodno napetost običajno dvignjeno na polovico napajalne. To fiksno izhodno napetost v času, ko senzor ni izpostavljen magnetnemu polju, imenujemo nična napetost oz. angleško »offset voltage«. S tem se znebimo uporabe dveh napetostnih vej pri napajalniku merilnega vezja [5].

Izvedb analognih Hallovih senzorjev je več, v ožji obzir pa so bile vzete naslednje:

- Hallov senzor z močnostnimi priključnimi kontakti na senzorju.  
V naši aplikaciji je prekinjanje ozemljitvenega vodnika neželeno, poleg tega je merilni obseg običajno prenizek.
- Hallov senzor s toroidnim feromagnetnim jedrom.  
Senzorji, ki delujejo na Hallovem principu, imajo feromagnetno jedro z namenom koncentriranja magnetnega polja vodnika, kateremu merimo el. tok. Zaradi možnih večkratnih udarov enake polaritete v kratkem časovnem zaporedju in s tem velike verjetnosti zasičenja jedra ta način merjenja v dotični aplikaciji ni uporabljen.



Slika 6: Način indirektnega merjenja el. toka s Hallovim senzorjem

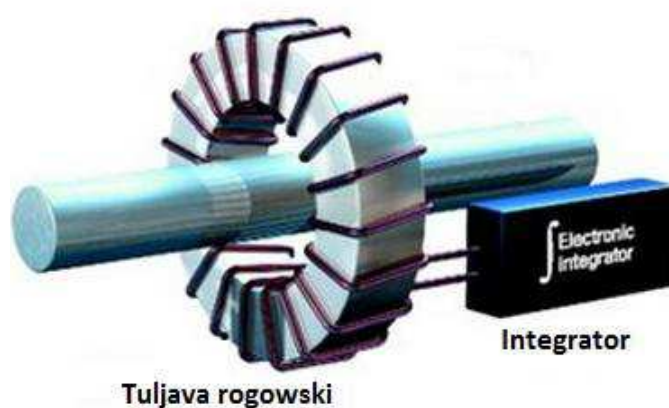
- Hallov senzor brez toroidnega obroča.  
Uporaba Hallovega senzorja brez jedra postane problematična, saj ima v tem primeru oddaljenost senzorja od vira magnetnega polja veliko vlogo. Presek ozemljilnih žic, priključenih na prenapetostne odvodnike, je različen, kar zahteva univerzalen senzor. Izdelava namenskega senzorja, pri katerem bi bil Hallov element vedno na isti distanci od vodnika, bi tako postala kompleksna.

### 3.2.3 Tuljava Rogowski

Tuljava Rogowski je namenjena merjenju izmeničnih tokov ter hitrih tokovnih pulzov. Enakomerno je navita na toroidno jedro, ki je neferomagnetno, zato jo poimenujemo tudi z izrazom zračna tuljava [6].

Ena od značilnosti te tuljave je koaksialno usmerjanje konca tuljave nazaj na začetek. To omogoča tuljavi ločitev koncev, zaradi česar jo lahko enostavneje namestimo okoli primarnega vodnika.

Če tega koaksialnega usmerjanja žice ne bi bilo, bi senzor v bistvu postal zanka z enim ovojem okoli primarnega vodnika in bi bil občutljiv na vsako magnetno polje, ki je pravokotno na ravnino senzorja. Pravilno oblikovana Rogowski tuljava, z enakomerno razporejenimi navitji, je odporna na elektromagnetno interferenco. Izmerjena napetost je teoretično neodvisna od oblike in lege tuljave napram vodniku, katerega tok želimo izmeriti.



Slika 7: Način indirektnega merjenja el. toka s tuljavo Rogowski

Napetostni izhod je proporcionalen časovni spremembi toka. Če predpostavimo, da sklenjena tuljava tvori krog s polmerom  $r$ , je inducirana napetost odvisna od naslednje enačbe:

$$e = \frac{N_2}{2\pi r} * S * \mu_0 * \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

Enačba (1): Odvisnost inducirane napetosti od parametrov tuljave ter čas. poteka toka

Nato je napetost potrebno integrirati, kar ima za rezultat izhodno napetost, ki je sorazmerna merjenemu električnemu toku.

Pri uporabi tuljave Rogowski ni težav z zasičenjem, je relativno poceni, omogoča široko frekvenčno območje meritve, meritev visokih tokov, ima prednost galvanske ločitve ter je manjša v primerjavi s tokovnim transformatorjem, ki potrebuje veliko število ovojev sekundarnega navitja. Omenjene pozitivne lastnosti so bile razlog za uporabo te tehnologije merjenja v naši aplikaciji.

### 3.3 PRIMERJALNA TABELA

Tehnologija merjenja	Nizko ohmski upor	Tokovni transformator	Hallov senzor	Tuljava Rogowski
Cena	Zelo nizka	Srednja	Visoka	Nizka
Linearnost skozi merilno območje	Zelo dobra	Zadovoljiva	Slaba	Zelo dobra
Možnost merjenja visokih tokov	Zelo slaba	Dobra	Dobra	Zelo dobra
Poraba el. Energije	Visoka	Nizka	Srednja	Nizka
Problem zasičenja pri visokih ali DC tokovih	Ne	Da	Da	Ne
Temperaturna odvisnost senzorja	Srednja	Nizka	Visoka	Zelo nizka

Tabela 1: Primerjava metod merjenja el. toka glede na njihove lastnosti

## 4. NAČRTOVANJE ANALOGNEGA DELA

Vežje za zajem vršne vrednosti tokovnega udara je sestavljeno iz naslednjih segmentov v vrstnem redu, ki sledi:

- senzor ter prilagoditveno vezje
- integrator
- usmernik
- detektor vršne vrednosti
- A/D pretvorba

### 4.1 SENZOR TER PRILAGODITVENO VEZJE

Po analizi tehnologij merjenja tokovnih pulzov je bilo jasno, da je uporaba tuljave Rogowski najprimernejša pot k cilju projekta.

Najbolj zaželjena bi bila uporaba tako imenovane »self integrated« Rogowski tuljave, katere dizajn je narejen tako, da lastna induktivnost, upornost ter kapacitivnost tuljave poskrbijo za integriran izhod tuljave. Žal je cena te vrste tuljav zaradi zapletene tehnologije za uporabo na napravi ProSECIII previsoka.

Pri pregledu ponudbe tržišča in iskanju ustrezne tuljave je relativno visoka cena, predvsem pa dimenzijska neustreznost senzorja usmerila projekt k izdelavi namenskega senzorja. Za merjenje tokov do 50 kA so imeli ponujeni senzorji toka, ki delujejo na principu tuljave Rogowski, premere tudi po 12 cm in več. Ker je montaža takih senzorjev v omarico zelo nepraktična, ima izdelan senzor premer 1/3 opisanega.



Slika 8: Prototip senzorja

Zaradi majhnega premera senzorja je tuljava (navita na neferomagnetno jedro) bližje viru magnetnega polja oz. vodniku, na katerem želimo meriti tokovni pulz. To pri tokovnem udaru pomeni višjo inducirano napetost v primerjavi s tuljavo večjega notranjega premera.

Ker je bila želja pri toku 50 kA imeti izhodno napetost tuljave v še uporabnem rangu elektronskih komponent, je bilo število ovojev na jedru relativno nizko. Določeno je bilo eksperimentalno. Ker je naprava namenjena meritvam informativnega značaja in ne kot laboratorijski merilni instrument, koaksialno usmerjanje konca tuljave nazaj ni bilo izvedeno.

Za povezavo med senzorjem in napravo je uporabljen koaksialni kabel z namenom ščitenja pred električnim poljem.

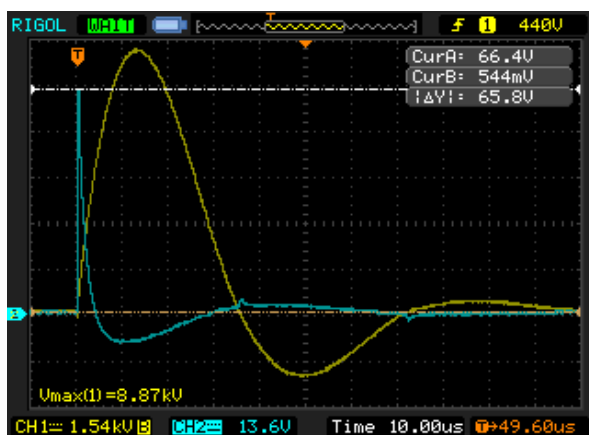
Zaradi nizkega št. ovojev ter zračnega jedra je imel tak merilni senzor izredno nizko induktivnost. Pri tokovnem pulzu reda 8/20  $\mu$ s smo zato dobili na izhod nadpovprečno visoko napetostno špico, katere trajanje je bilo reda 200 ns. Ker se vhoda operacijskega ojačevalnika napetostno ne sme prekoračiti, je bilo zaradi tega pojava potrebno atenuirati celoten signal, s čimer pa se je zmanjšala tudi maksimalna napetostna razlika uporabnega signala. Točnost instrumenta se je na ta način poslabšala.

Da bi izničili neželeni pojav, sta v serijo z merilno toroidno tuljavo vezani dodatni tuljavi visoke induktivnosti. Nameščeni sta na tiskano vezje naprave ProSECIII, da magnetno polje tokovnega udara nanju nima vpliva. Na ta način navidezno zvišamo induktivnost senzorja. Težava napetostnih špic na ohmskem bremenu tuljave je tako izničena.

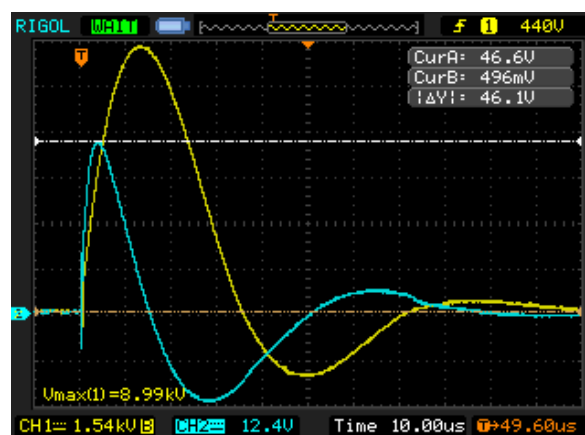


Naslednja oscilograma prikazujeta izhod senzorja na ohmskem bremenu vrednosti 2.3 k $\Omega$ .

Sliki: Rumena - amplituda tokovnega udara (~9 kA) / Modra izhodna napetost senzorja z / brez dodatne serijske induktivnosti



Slika 9: Izhod senzorja brez dodatne induktivnosti



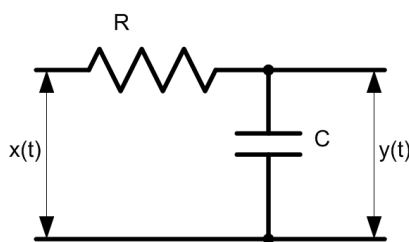
Slika 10: Izhod senzorja z dodatno serijsko induktivnostjo

## 4.2 INTEGRATOR

### 4.2.1 Pasivni integrator

Prvi testi elektronskega vezja za merjenje tokovnih udarov so bili narejeni s pasivnim integratorjem.

Sestavljen je iz RC člena, izhodni signal » $y(t)$ « pri pravilno izbranih komponentah pa predstavlja integral vhodnega signala » $x(t)$ «



Slika 11: RC pasivni integrator

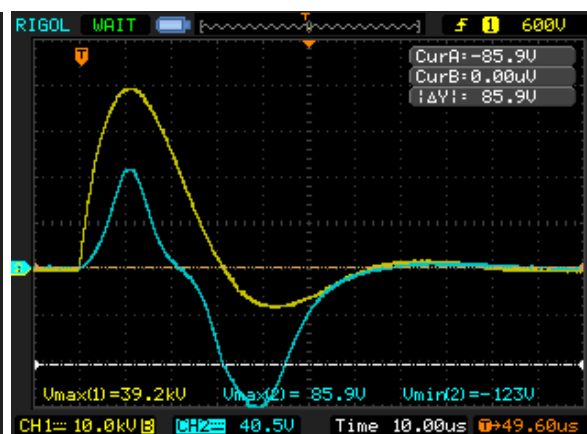
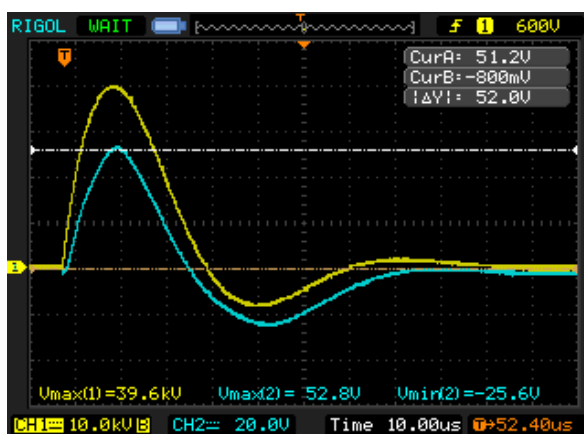
Pogoj za ustrezno delovanje pasivnega integratorja je visoka impedanca bremena na njegovem izhodu. Zaradi uporabe pasivnih komponent v usmerniškem vezju ter detektorju vršne vrednosti je prišlo do težave zaradi nizke impedance.

Hkrati je težavo predstavljal tudi padec napetosti na usmerniških diodah, saj je amplituda izhodne napetosti umerjenega integratorja relativno nizka.

Oscilograma prikazujeta napetostni odziv integratorja pri uporovnem ter kapacitivnem bremenu. Breme je priključeno na izhod RC integratorja »y(t)«.

Sliki : Rumena - amplituda tokovnega udara (~40kA) / Modra izhodna napetost integratorja

Integrator: Vrednost upora  $R=120\Omega$  ; Vrednost kondenzatorja  $C = 470\text{nF}$ :



Slika 12: Izhod integratorja - uporovno breme 1kOhm

Slika 13: Izhod integratorja - kapacitivno breme 100nF

Kot je razvidno z oscilogramov, kapacitivno breme predstavlja nizko Ohmsko upornost, kar močno popači izhodni signal integratorja. Zaradi potrebe po naslednjem delu vezja (usmerniku) z visoko vhodno impedanco je bil potreben prehod na aktivno vezje z operacijskimi ojačevalniki. Glede na to, da ima naprava stalno napajanje z AC/DC pretvornika, zaradi česar ni težav s preskrbo vezja z električno energijo, je bil tudi pasivni integrator zamenjan z aktivnim.

## 4.2.2 Aktivni integrator

### 4.2.2.1 Prilagoditev senzorja in zaščita vhoda:

Pri uporabi operacijskega ojačevalnika napetost na vhidih ne sme preseči napajalne napetosti le-tega. Tokovnemu senzorju je bil dodan napetostni delilnik, kateri zniža potencial na vrednost, ki jo operacijski ojačevalnik, konfiguriran kot integrator, še lahko obdela. Uporabljeno je simetrično napajanje z napetostjo  $\pm 15$  V.

Delilnik je preračunan tako, da je pri tokovnem udaru 50 kA, oblike pulza 8/20  $\mu$ s, napetost na vhodu integratorja 12 V. Vhodi so zaščiteni z namensko TVS diodo, ki omeji napetost na vhodu na maksimalnih 15 V, ne glede na amplitudo tokovnega udara.

### 4.2.2.2 Izbira operacijskega ojačevalnika:

Pred izdelavo, prilagajanjem ter testiranjem aktivnega integratorja je bilo potrebno izbrati operacijski ojačevalnik, ki bo zadostil potrebam aplikacije.

Pri izbiri operacijskega ojačevalnika je bilo potrebno več pozornosti nameniti naslednjim parametrom:

- Nizek napetostni premik

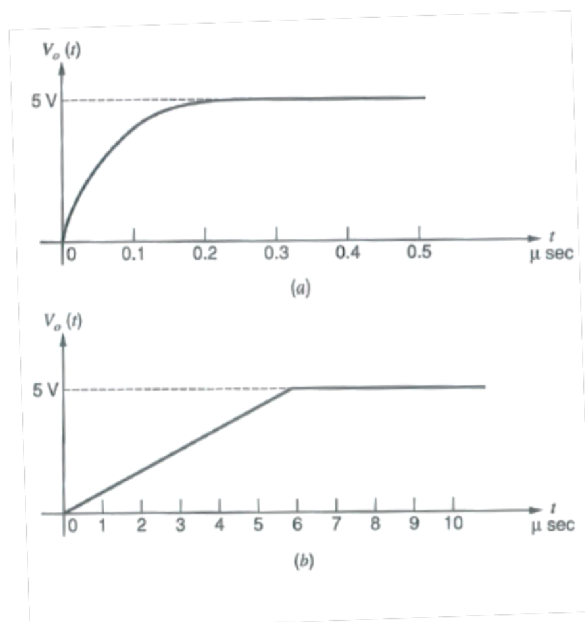
Napetostni premik oz. »offset voltage« je napetost, ki se pojavi na vhodu operacijskega ojačevalnika zaradi nesimetričnosti tranzistorjev v vezju. Vpliv napetostnega premika na izhodno napetost je odvisen od ojačanja oz. vrednosti uporov v vezju.

- Dovolj visok »Slew rate«

To je sposobnost ojačevalnika, da izhod sledi vhodni napetosti. Tranzistorji v integriranem vezju imajo omejeno tokovno zmogljivost in pri višjih frekvencah ne morejo dovolj hitro napolniti kapacitivnosti v vezju. Če je frekvenca signala previsoka, pride do popačenja izhodnega signala. Pri usmerniškem delu vezja ter detektorju vršne vrednosti se vhod spreminja s strmino 12V/10  $\mu$ s, kar zahteva minimalni »slew rate« 1,2 V/ $\mu$ s. Ker je oblika tokovnega udara lahko krajša, prav tako signal na vhodu običajno ne narašča linearno, je potreben vsaj štirikrat višji »slew rate« za sprejemljive rezultate [7].

Naslednja slika prikazuje primer izbire operacijskega ojačevalnika s prenizko vrednostjo »slew rate«.

- Graf »(a)« prikazuje potek vhodnega signala.
- Graf »(b)« prikazuje potek izhodnega signala.



Slika 14: Primer izbire ojačevalnika s prenizkim "slew rate"

- PSRR (angl.: Power supply rejection ratio)

PSRR nam pove stopnjo imunosti operacijskega ojačevalnika na motnje, ki vstopajo v vezje preko napajanja. Ker se naprava ProSECIII napaja preko energetske linije  $230V_{AC}$ , na kateri so v času tokovnih udarov visoke prenapetosti, je velika verjetnost motenj na nizkonapetostni strani AC/DC pretvornika, ki napaja vezje. Potreben je čim višji PSRR operacijskega ojačevalnika, da motnje, generirane v simetrično napajanje, na delovanje vezja nimajo vpliva.

Izbran je bil operacijski ojačevalnik z oznako TL074C, kateri prednjači v naslednjih lastnostih:

- nizek vhodni mirovni tok – 30pA
- nizek tokovni premik – 5pA
- nizek šum –  $15nV/\sqrt{Hz}$
- visoka vhodna upornost -  $10^{12}\Omega$
- visok »slew rate« – min.  $8V/\mu\text{s}$

#### 4.2.2.3 Lastnosti integratorja:

Izhodna napetost idealnega integratorja je proporcionalna površini pod krivuljo vhodne napetosti proti X osi.

Enačba prikazuje odvisnost izhodne napetosti integratorja od vhodne napetosti.

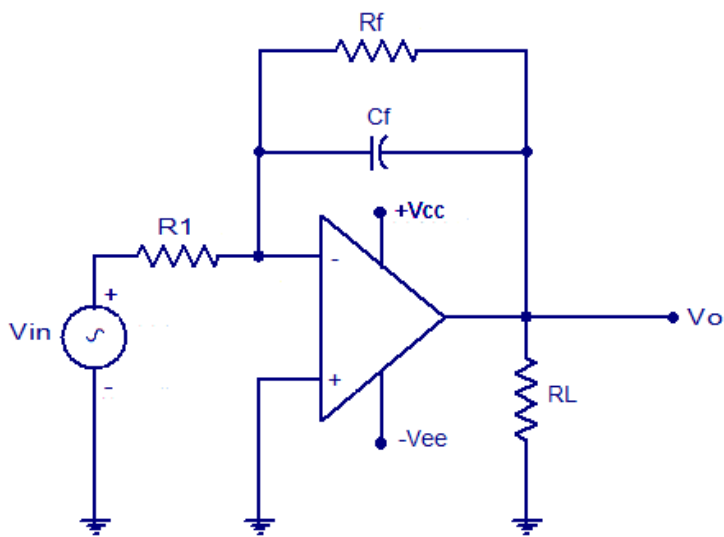
$$V_o = \frac{-1}{R_1 C_1} \int_0^t V_{in} dt \quad (2)$$

#### Enačba (2): Medsebojna odvisnost napetosti integratorja

Negativni predznak predstavlja fazni zasuk za kot  $180^\circ$  med vhodnim in izhodnim signalom. To je posledica vhoda integratorja na invertirajoči vhod. Dobra lastnost aktivnega integratorja je velika časovna konstanta, katere rezultat je točna meritev.

#### 4.2.2.4 Delovanje integratorja:

Pozitivna napetost na vhodu povzroči linearno naraščanje napetosti na izhodu v negativni smeri. S tem operacijski ojačevalnik drži napetost invertirajočega vhoda na potencialu neinvertirajočega, to je 0V. Obratno se zgodi, kadar je vhodni signal negativen. Strmina izhodne napetosti je proporcionalna amplitudi vhodne napetosti [8].



Slika 15: Shema aktivnega integratorja

Na strmino izhodne napetosti vplivamo tudi s spreminjanjem RC časovne konstante ( $R_1$  ter  $C_f$ ). S povišanjem kapacitivnosti kondenzatorja v povratni zanki ter/ali znižanjem upornosti  $R_1$  zmanjšamo strmino izhodne napetosti in obratno.

Paralelno s kondenzatorjem je v povratni zanki vezan upor ( $R_f$ ) visoke Ohmske vrednosti z namenom določitve ojačanja enosmerne napetosti. Brez uporabe tega upora bi že sam odmik potenciala operacijskega ojačevalnika povzročil prehod integratorja v zasičenje.

RC časovna konstanta integratorja je bila izbrana eksperimentalno s pomočjo referenčnega tokovnega transformatorja znamke Pearson electronic.

### 4.3 USMERNIK

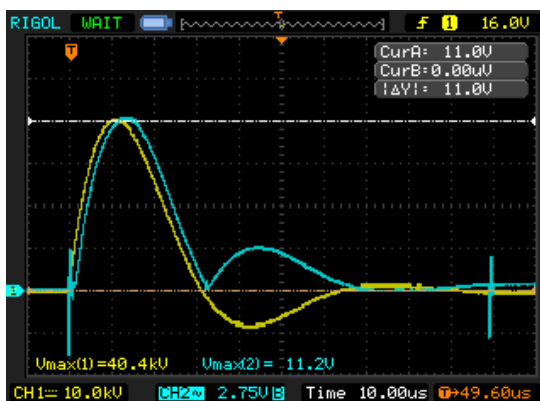
Tokovni udar je lahko tako negativen kot pozitiven, kar rezultira v pozitivnem oz. negativnem izhodu integratorja. To napetost je potrebno usmeriti, da jo detektor vršne vrednosti nato pravilno obdela.

Pri pasivnem usmerjanju se uporablja diode, medtem ko pri aktivnem usmerjanju poleg diod sodeluje še operacijski ojačevalnik. Vloga le-tega je izničiti padec napetosti na usmerniških diodah v prevodni smeri. S tem omogočimo usmerjanje nizkih izmeničnih napetosti.

Izvedb aktivnega usmerjanja napetosti je več. Izbrana je izvedba z enojnim operacijskim ojačevalnikom, pri kateri izkoriščamo visoko impedanco bremena, to je v našem primeru naslednja ojačevalna stopnja. Tako operacijski ojačevalnik pri pozitivni vhodni napetosti nima vloge, negativna napetost na invertirajočem vhodu pa povzroči pozitiven izhod ojačevalnika.

Oscilogram prikazuje polnovalno usmerjanje idealnega usmernika pri tokovnem udaru 40 kA.

Slika : Rumena - amplituda tokovnega udara (~40kA) / Modra izhodna napetost usmernika)



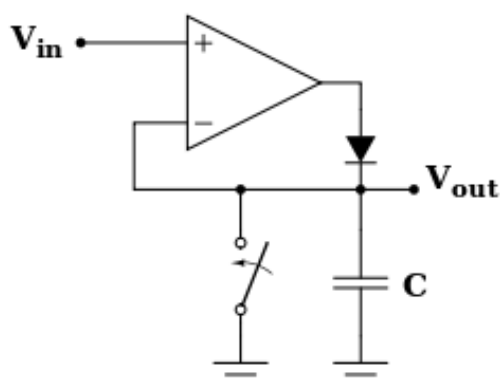
Slika 16: Polnovalni usmernik

Na točnost usmerniškega dela vpliva tudi reverzni tok diod ter tolerance uporabljenih uporov. Zadošča že izbira uporov tolerance 1 % ter diod z reverznim tokom 100 nA.

#### 4.4 DETEKTOR VRŠNE VREDNOSTI

Tako imenovani »peak detector« ima nalogo zadržati vršno vrednost napetosti, dovedene na vhod operacijskega ojačevalnika.

Na sliki je klasična izvedba detektorja vršne vrednosti:



Slika 17: Detektor vršne vrednosti

Pri izbiri detektorja vršne vrednosti je pomembno upoštevati, da shranjujemo vršno vrednost prehodnega pojava. To pomeni, da mora biti kapacitivnost kondenzatorja na izhodu dovolj visoka, da zadrži vrednost napetosti na istem potencialu, dokler je ne pomei A/D pretvornik mikrokrmilnik. V nasprotnem primeru pride do predčasnega praznjenja kondenzatorja, napetost s časom pada, kar povzroči napako ob času meritve.

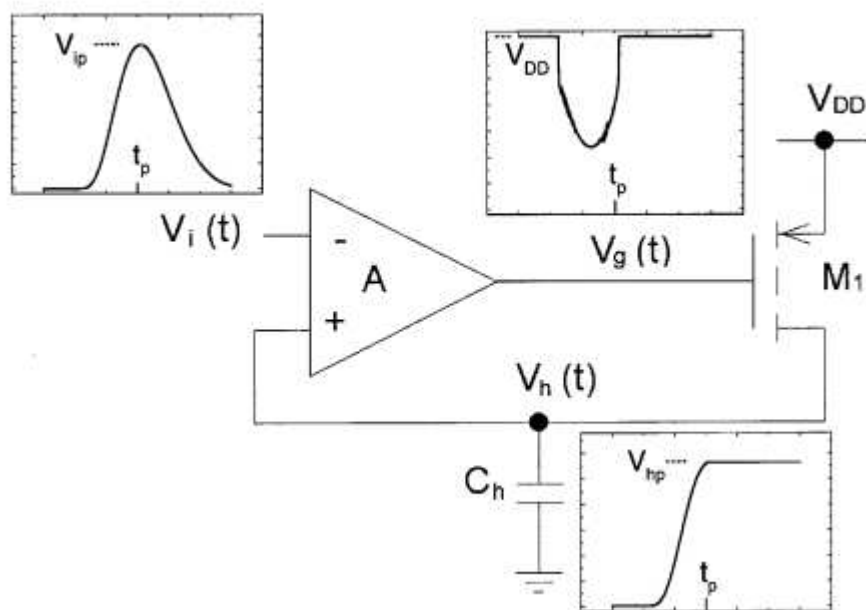
Ker so pri vseh oblikah tokovnih udarov vršne vrednosti znotraj 20  $\mu\text{s}$ , bi bil čas od udara do izvedbe vzorčenja lahko relativno kratek. Ker se je v prid točnosti izkazalo, da je z A/D pretvorbo bolje počakati do konca udara, se je čas vzorčenja nastavilo na 500  $\mu\text{s}$  po prekinitvi, ob kateri se mikrokrmilnik zbudi.

Pri velikih kapacitivnih bremenih, vezanih na izhod operacijskih ojačevalnikov, se pojavi težava, saj kondenzator povzroči dodatni fazni zamik v povratni zanki. Zaradi tega pojava lahko pride do oscilacij, kar privede do prekoračitve izhodne napetosti preko vršne vrednosti napetosti na vhodu. Izpraznjena kapacitivna bremena imajo tudi lastnost nizke upornosti.

Da bi zagotovili visoko tokovno zmogljivost polnjenja kondenzatorja v kratkih polnilnih časih, je bila narejena druga iteracija detektorja vršne vrednosti. Izbrana je bila izvedba detektorja, katerega izhod operacijskega ojačevalnika krmili vrata Mosfet tranzistorja. Tranzistor, vezan med napajalno linijo in kondenzatorjem, predstavlja regulirano stikalo. Pri tej izvedbi je izhod operacijskega ojačevalnika tokovno neobremenjen.



Slika prikazuje delovanje detektorja vršne vrednosti v izvedbi s tranzistorjem tipa Mosfet:



Slika 18: Detektor vršne vrednosti - izvedba z Mosfet tranzistorjem

Izhod Peak detektorja je vezan na vhod A/D pretvornika mikrokrmilnika.

#### 4.5 PREKINITVENO VEZJE

Ker je naprava programirana tako, da je večina časa v stanju spanja, je potrebno vezje, ki povzroči prekinitev na vhodu mikrokrmilnika. Ta prekinitev zbudi mikrokrmilnik, ki izvede proces inicializacije ter meritev napetosti na analognem vhodu. Za prekinitev je bilo izvedeno ojačevalno vezje, ki napetost na »peak« detektorju ojača na vrednost, ki postavi digitalni vhod na logično »1« že ob tokovnem udaru 500A.

## 5. NAPAVALNI DEL ANALOGNEGA TER DIGITALNEGA DELA VEZJA

### 5.1 IZBIRA NAPETOSTNIH NIVOJEV

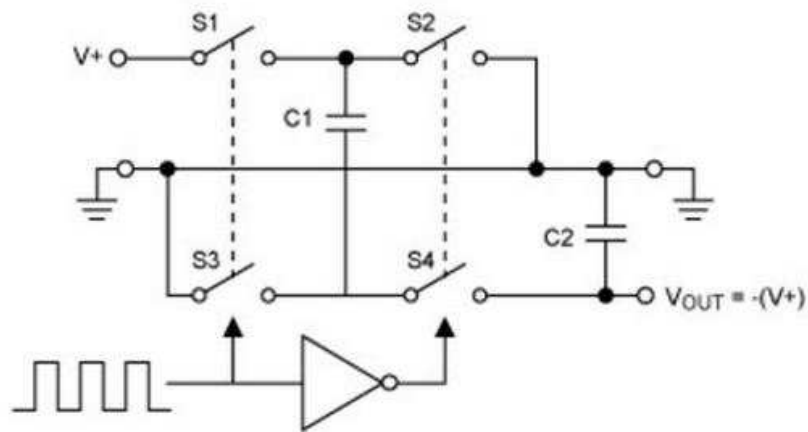
Ob tokovnem udaru ozemljitveni vodnik izseva veliko količino elektromagnetnega smoga. Pri tem pogosto pride do interference z elektroniko naprav, v obliki nihanja napajalnih napetostnih linij, ter napake v meritvi zaradi kapacitivnega ali magnetnega sklapljanja EM vala na analogni del vezja. Da bi zmanjšali vpliv elektromagnetne interference, je izbrana simetrična napajalna napetost analognega dela  $\pm 15$  V. EMI ima v tem primeru manjši vpliv, saj je napetostni obseg merilnega dela relativno visok in motnje reda nekaj 10 mV ne predstavljajo večje napake v meritvi. Napetost se preko delilnika spusti šele po zadnji stopnji analognega dela vezja, ki deluje kot "buffer". Amplitudno prilagojeni napetostni signal z informacijo o amplitudi pripeljemo do mikrokrmilnik po najkrajši možni povezavi, kjer se izvede vzorčenje.

Izbira AC/DC pretvornikov s simetričnimi izhodi je zaradi manj pogoste uporabe manjša. Posledično omenjene pretvornike spremlja tudi višja cena ter manj opcij glede izhodne moči in s tem tudi dimenzij. Prostorsko ter cenovno je bila bolj smiselna uporaba pretvornika z enojnim izhodom, potrebo po simetrični napajalni napetosti pa se je pokrilo z uporabo napetostnega inverterja, t. i. "charge pump".

### 5.2 CHARGE PUMP

Pri uporabi "charge pump" preko integriranih stikal z oscilatorjem preklapljamemo med ciklom polnjenja ter praznjenja kondenzatorja C1.

V ciklu polnjenja sta vklopljeni stikali S1 in S3, v ciklu praznjenja, ko sta vklopljeni stikali S2 ter S4, pa prenesemo naboj kondenzatorja C1 na C2, ki predstavlja vir negativne napetosti v sistemu [9].



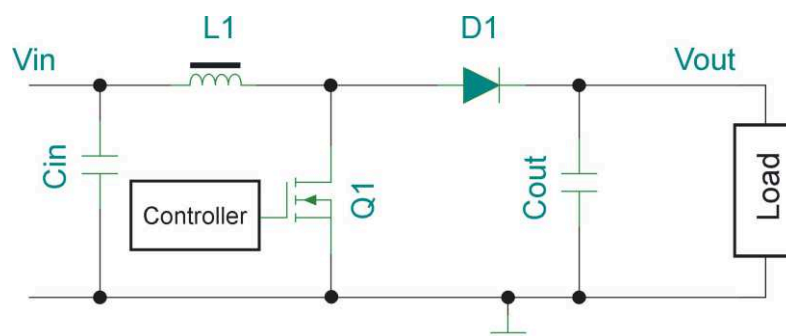
Slika 19: Poenostavljeno delovanje napetostnega inverterja

Zaradi generiranih motenj med preklopi je na izhodu "charge pumpe" smiselno uporabiti LC filter, ki zmanjša napetostne špice, da se le-te ne prenašajo preko napajalne linije na izhode operacijskih ojačevalnikov. K zmanjšanju napetostnih špic pripomore tudi uporaba višje kapacitivnosti kondenzatorjev napetostnega inverterja.

### 5.3 STEP UP PRETVORNIK

Na vrhnji plošči tiskanega vezja se kot glavna elementa nahajata LCD ter mikrokrmilnik. Zaradi težnje po modularni uporabi te plošče tudi na drugih projektih je bil dodan "step up" napetostni pretvornik. Ta omogoča napajanje vrhnje plošče že z 3,3 V. "Step up" pretvornik ima namen zagotavljanja dovolj visoke napetosti za delovanje osvetlitve LCD zaslona, ki potrebuje 6 V.

»Step up converter« je DC/DC pretvornik, katerega izhodna napetost je višja od vhodne.



Slika 20: Poenostavljeno delovanje "step up" pretvornika

- V prvi fazi je odprt tranzistor Q1, zaradi česar vhodni tok ustvari magnetno polje v tuljavi L1. Izhod je z reverzno polarizirano diodo D1 izoliran od vezja okrog tuljave L1. Tok skozi breme teče s kondenzatorja  $C_{out}$ .

- V drugi fazi se tranzistor Q1 zapre, energija, shranjena v tuljavi L1, pa inducira napetost, ki se prišteje k vhodni napetosti  $V_{in}$  in s tem ustvari izhodno napetost višjo kot vhodno.

Krmilniki »switching« regulatorjev uporabljajo različne algoritme, ki določajo čase preklopov tranzistorskega stikala Q1, zaradi česar je mogoče dosegati tudi 90 % efektivnost pretvorbe [10].

V prvi fazi delovanja pretvornika je zaradi odprtega tranzistorja Q1 vhod precej obremenjen. Ustvarjeni tokovni pulzi povzročajo napetostno nihanje napajalne linije sistema, kar lahko zmanjšamo z uporabo keramičnega kondenzatorja z nizko vrednostjo ESR na vhodu. Smiselno je bilo potrebno izbrati tudi izhodni kondenzator, saj je le-ta pred vklopom osvetlitve zaslona napolnjen le na vhodno napetost. Ko osvetlitev vklopimo, »step up« pretvornik preide na maksimalen cikel polnjenja, saj mora zagotavljati energijo bremenu, hkrati pa napolniti še izhodni kondenzator. Pri neustrezno izbranem kondenzatorju je bila napetostna motnja dovolj visoka, da se je preko napajalne linije prenesla na izhod operacijskega ojačevalnika in povzročila prekinitvev oz. »interrupt«. Naprava je v takem primeru sprožila proces meritve tokovnega udara, čeprav do tega ni prišlo.

#### 5.4 FUNKCIJA »POWER DOWN«

Na napravi je izvedeno zasilno napajanje, ki omogoča njeno delovanje do 15 min po izpadu AC napajanja. V tem času se s superkondenzatorja napajata le najosnovnejša dela vezja, to je mikrokrmilnik ter EEPROM. Zaradi te funkcije ob kratkotrajnih izpadih napajanja ne izgubimo ure, datuma ter nastavitve klase varistorja.

## 6. EMC MERITVE

### 6.1 SPLOŠNO O EMI/EMC

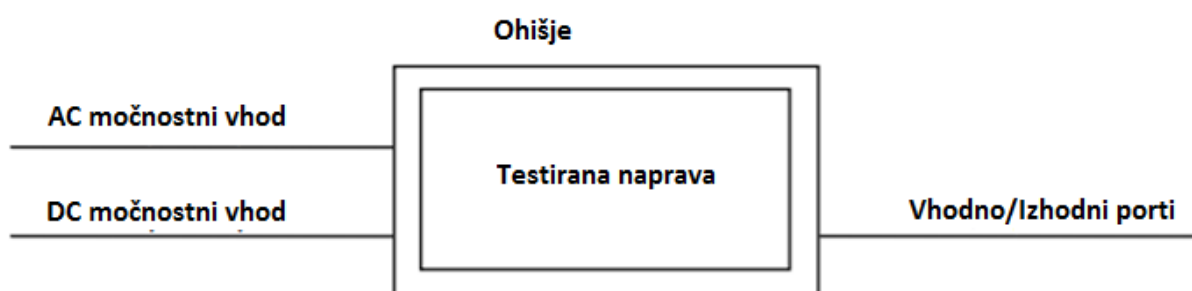
Elektromagnetna interferenca (angl.: EMI) je motnja, ki vpliva na električni del naprave preko elektromagnetne indukcije ali pa EM radiacije, generirane z zunanjega vira. Motnja lahko vpliva na delovanje vezja na več načinov tako, da prekine, ovira, degradira, omejuje normalno delovanje elektronike. Vir elektromagnetne interference lahko predstavlja umetni ali naravni objekt, ki ustvarja izmenični električni tok.

Medtem ko je elektromagnetna interferenca fenomen, povezan z radiacijo ter njenimi efekti, je elektromagnetna kompatibilnost (angl.: EMC) karakteristika naprave oz. njena imunost na EMI v okolju.

Ker je naprava ProSECIII namenjena predvsem industrijskemu okolju, je njena imunost na EMI zelo pomembna. Zaradi izvajanja meritve tokov v realnem času je potrebna tudi imunost na visoke elektromagnetne pulze, ki jih povzročijo tokovni udari skozi varistorje.

Naprava ProSECIII je kategorizirana kot testna in merilna naprava. Spada v »A« klaso opreme, kar pomeni, da je primerna za direktno uporabo na vseh nizkonapetostnih omrežjih, ki napajajo objekte.

EMC testiranje se izvaja na naslednjih delih naprave:



Pri napravi ProSECIII to pomeni teste na:

- AC napajalnem vhodu naprave
- vhodno/izhodnih portih
- ohišju

EMC standardi, ki omogočajo uporabo naprave v okolju, za katerega je predvidena, poleg imunosti na zunanje elektromagnetne motnje obravnavajo tudi meritve sevanja EM motenj naprave navzven.

## 6.2 PLAN MERITEV

**Table 2 – Immunity test requirements for equipment intended to be used in an industrial electromagnetic environment**

Port	Phenomenon	Basic standard	Test value	Performance criterion
Enclosure	Electrostatic discharge (ESD)	IEC 61000-4-2	4 kV contact discharge 8 kV air discharge	B B
	Electromagnetic field	IEC 61000-4-3	10 V/m (80 MHz to 1 GHz) 3 V/m (1,4 GHz to 2 GHz) 1 V/m (2,0 GHz to 2,7 GHz)	A A A
	Power frequency magnetic field	IEC 61000-4-8	30 A/m (50 Hz, 60 Hz) <sup>e</sup>	A
AC power (including protective earth)	Voltage dip	IEC 61000-4-11	0 % during 1 cycle	B
			40 % during 10/12 <sup>g</sup> cycles	C
			70 % during 25/30 <sup>g</sup> cycles	C
	Short interruptions	IEC 61000-4-11	0 % during 250/300 <sup>g</sup> cycles	C
	Burst	IEC 61000-4-4	2 kV(5/50 ns, 5 kHz)	B
Surge	IEC 61000-4-5	1 kV <sup>a</sup> /2 kV <sup>b</sup>	B	
Conducted RF	IEC 61000-4-6	3 V <sup>f</sup> (150 kHz to 80 MHz)	A	
DC power <sup>f</sup> (including protective earth)	Burst	IEC 61000-4-4	2 kV (5/50 ns, 5 kHz)	B
	Surge	IEC 61000-4-5	1 kV <sup>a</sup> /2 kV <sup>b</sup>	B
	Conducted RF	IEC 61000-4-6	3 V <sup>f</sup> (150 kHz to 80 MHz)	A
I/O signal/ control (including functional earth)	Burst	IEC 61000-4-4	1 kV (5/50 ns, 5 kHz) <sup>d</sup>	B
	Surge	IEC 61000-4-5	1 kV <sup>b, c</sup>	B
	Conducted RF	IEC 61000-4-6	3 V <sup>d, f</sup> (150 kHz to 80 MHz)	A
I/O signal/ control connected directly to mains supply	Burst	IEC 61000-4-4	2 kV (5/50 ns, 5 kHz)	B
	Surge	IEC 61000-4-5	1 kV <sup>a</sup> /2 kV <sup>b</sup>	B
	Conducted RF	IEC 61000-4-6	3 V <sup>f</sup> (150 kHz to 80 MHz)	A
<sup>a</sup> Line to line. <sup>b</sup> Line to ground. <sup>c</sup> Only in the case of long-distance lines (see 3.10). <sup>d</sup> Only in the case of lines > 3 m. <sup>e</sup> Only to magnetically sensitive equipment. CRT display interference is allowed above 1 A/m. <sup>f</sup> DC connections between parts of equipment/system which are not connected to a d.c. distribution network are treated as I/O signal/control ports. <sup>g</sup> For example "25/30 cycles" means "25 cycles for 50 Hz test" or "30 cycles for 60 Hz test".				

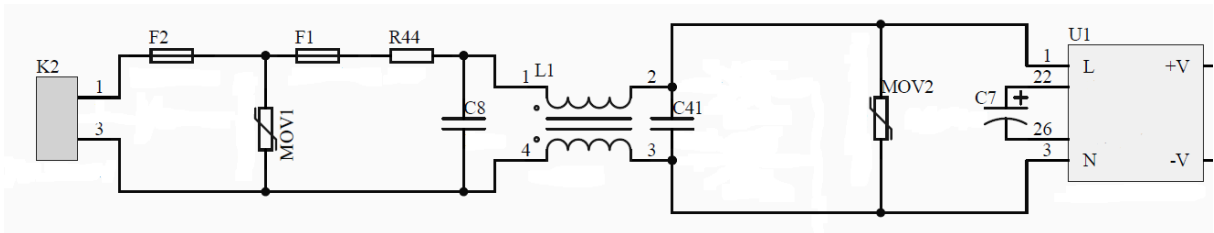
**Tabela 2: Testni plan naprave ProSECIII**

Za pozitivne rezultate testov je bilo potrebno izvesti določene spremembe napajalnega dela vezja ter ščitenje elektronike s kovinskim ščitom oz. Faradayevo kletko.

## 6.3 FILTRI IN ŠČITENJE NAPAVALNEGA DELA VEZJA

### 6.3.1 Zaščita naprave pred prenapetostmi na AC liniji

Pri odvodnikih razreda I. je ob tokovem udaru zgornja meja preostale napetosti na varistorju 4 kV. Ker je naprava ProSECIII namenjena direktni priključitvi na napajalno omrežje, ki je varovano vsaj z varistorjem razreda I., mora prenapetostno obremenitev vzdržati brez poškodbe vezja. Za to skrbita varistorja na vhodnem delu napajalnega vezja.



Slika 21: AC del napajanja naprave ProSECIII

Kljub pogosti uporabi varistorjev brez varovalk je njihova uporaba smiselna, saj v primeru odpovedi varistorja prekinejo visoke tokove, ki lahko vodijo v eksplozijo le-tega. Poleg tega varovalka ščitenu varistorju ter vezju doda serijsko impedanco, kar zmanjšuje tok skozi varistor v času udara. Nižji tok skozi varistor pa pomeni nižjo preostalo napetost.

V primeru dotične naprave je ščitenje glavnega varistorja »MOV1« izvedeno s počasno varovalko »F2« vrednosti 1,6 A. Ker je tokovna zmogljivost varovalke, katera ščiti vhodni varistor, previsoka za sočasno ščitenje AC/DC pretvornika, je za varistorjem »MOV1« uporabljena dodatna varovalka nižje vrednosti 0,5 A. Varovalka »F1« tako skrbi za odklop v primeru defekta v napetostnem pretvorniku ali za njim.

Prvotno je bil uporabljen le varistor MOV2, vendar je zaradi serijske induktivne upornosti tuljave L1 prihajalo med udari do dovolj visokih prenapetosti, da je prišlo do uničenja »X« kondenzatorja C8. Kondenzatorja C8 ter C41 s tuljavo L1 tvorijo vhodno/izhodni filter visokofrekvenčnih motenj.

Tuljava L1 lahko v času prehodnih pojavov zaradi svoje induktivnosti deluje kot vir visoke napetosti. Pri testu IEC610000-4-5, kjer generiramo tokovni udar z linijsko prenapetostjo 1 kV, je zaradi tega pojava prihajalo do odpovedi AC/DC pretvornika. Odvodnik MOV2 poskrbi, da napetosti, generirane v tuljavi, ne presežejo kritične meje napetostnega pretvornika.

Ker se odvodni tok ob izbiri istih vrednosti varistorjev, zaradi toleranc ter različne pozicije odvodnikov v vezju, ne bi razporedil enakomerno, bi bilo težko določiti obremenjenost posamičnega varistorja med udarom. Da lažje predvidimo obremenitve posamičnega odvodnika, ima varistor MOV1 nižjo napetost odprtja in tako v času ščitenja absorbira večinski delež energije, ki se sprosti ob prenapetosti. Na ta način je lahko varistor MOV2 manjših dimenzij.

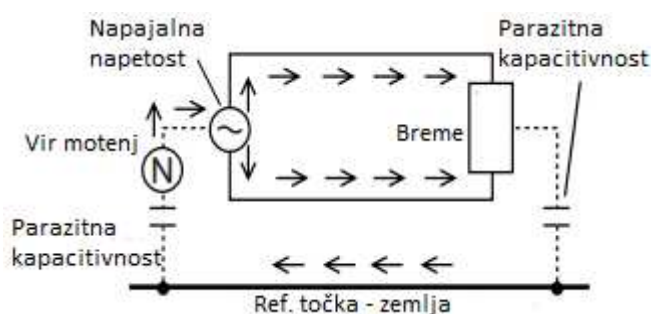
Vloga upora R44 je omejevanje zagonskega toka AC/DC pretvornika ob vklopu naprave.

### 6.3.2 Zaščita naprave pred »konduktivnimi« motnjami

Na AC napajalni liniji se poleg testov prenapetosti izvajajo tudi testi imunosti naprave na visokofrekvenčne »konduktivne« motnje. Da le-te ne prodrejo v notranjost vezja in povzročijo interferenco, so v napravi ProSECIII uporabljeni filtri na AC in DC delu vezja.

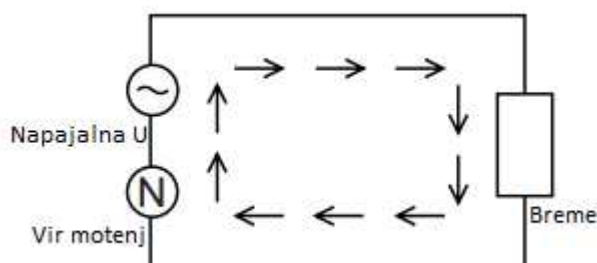
»Konduktivne« motnje delimo na 2 tipa:

- »Common mode«



Slika 22: Prenos "common mode" tipa motenj na porabnik

- »Differential mode«

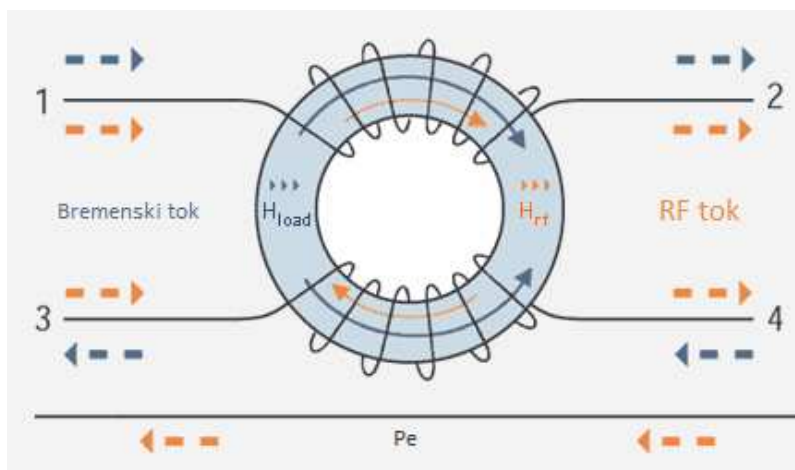


Slika 23: Prenos "differential mode" tipa motenj na porabnik



»Common mode« predstavlja komponenta analognega signala, ki je z isto polariteto prisotna na vseh vodnikih, izpostavljenih zunanjemu viru EM polja. CM signal na izpostavljenih vodnikih je v fazi, referenčna točka signala pa je zemlja.

Za omejevanje vstopa CM motenj v elektroniko naprave je bila uporabljena CM dušilka na AC delu vezja, zaradi naslednjega razloga. AC/DC pretvornik zaradi stikalnega načina pretvarjanja napetosti predstavlja tudi vir CM motenj, zato je potrebno omejiti motnje, ki bi jih le-ta generiral v omrežje.

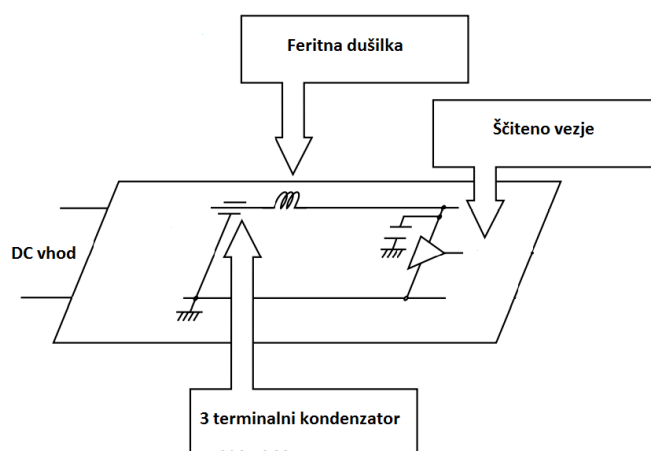


Slika 24: Delovanje CM dušilke

Pri CM dušilki je seštevek magnetnih polj ustvarjenih zaradi bremenskega toka enak 0. Dušilka diferenčnim signalom predstavlja nizko impedanco. Teoretično ostane le Ohmska komponenta upornosti navitja.

Pri istosmernih signalih, ustvarjenih zaradi elektromagnetnih motenj, dušilka predstavlja induktivno breme, na katerem se troši energija, ki bi sicer lahko povzročila EMI v sistemu.

Motnje tipa »Differential mode« predstavlja komponenta analognega signala, prisotna na signalni (ali napajalni) liniji ter z nasprotno polariteto na GND liniji. Montnje tega tipa se izloči z uporabo kondenzatorjev ter/ali dušilk [11].



Slika 25: Ščitenje vezja pred diferenčnimi motnjami

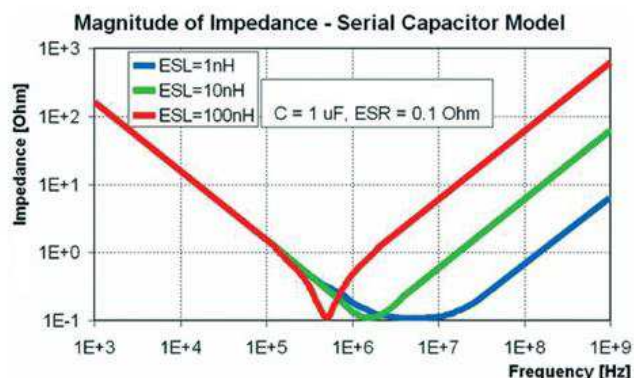
Tip ter kapacitivnost kondenzatorjev prilagodimo glede na frekvenčni pas motenj, ki jih želimo zajeti. Ker ima realni kondenzator poleg kapacitivnosti tudi serijsko induktivnost ter upornost, je pomembno vedeti, da predvsem induktivnost povzroči pri visokih frekvencah ponoven dvig impedance kondenzatorja. Tako so kondenzatorji, namenjeni filtriranju motenj, skoraj neuporabni pri frekvencah, ki so višje do trikratnika lastne resonančne frekvence. K zvišanju induktivnosti prispevata tudi induktivnost spajkalnih kontaktov ter induktivnost povezav na tiskanem vezju.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

Enačba (3): Lastna resonančna frekvenca kondenzatorja

Če za primer vzamemo najbolj pogosto uporabljeni filter s keramičnim kondenzatorjem kapacitivnosti 100 nF, postane le-ta (brez upoštevanja induktivnosti povezav na vezju) neuporaben pri frekvencah nad 50 MHz.

Na sliki je podan primer spreminjanja impedance kondenzatorja 1 nF pri različni serijski induktivnosti.



Slika 26: Spreminanje impedance kondenzatorja s frekvenco

Kot kapacitivni del filtra je bil pri vezju ProSECIII uporabljen 3-terminalni kondenzator. Ta namenska vrsta kondenzatorja se že brez ostalih elementov obnaša kot LC filter.

Kot induktivni del filtra se lahko uporablja dušilke diferenčnega tipa, lahko pa je dovolj že dušilka z enojnim navitjem. Pri običajni feritni dušilki, vstavljeni na DC napajalno linijo, je zaželena visoka induktivnost ter čim manjša ohmska upornost. Pri bližanju idealom je potrebno v zakup vzeti večje dimenzije dušilke.

Za pozitivne teste po standardu IEC 61000-4-4 je bila uporaba namenske dušilke z enojnim navitjem ter 3-terminalnega kondenzatorja dovolj. Omenjeni standard predstavlja test, pri katerem na napajalno linijo poleg linijske napetosti vsakih 300 ms vsilijo »pakete« napetostnih pulzov, ki trajajo 15 ms in dosežejo amplitudo 2 kV.

Razelektritveni testi po standardu IEC 61000-4-2 so bili pozitivni, brez večjih posegov v vezje, saj za nični potencial uporabljajo zemljo, naprava ProSECIII pa ne potrebuje ozemljitve. Na ta način se zmanjša možnost neželenih prebojev v napravi zaradi razelektritve.

## 6.4 ŠČITENJE VEZJA PRED ELEKTROMAGNETNIM POLJEM

### 6.4.1 Faradayeva kletka

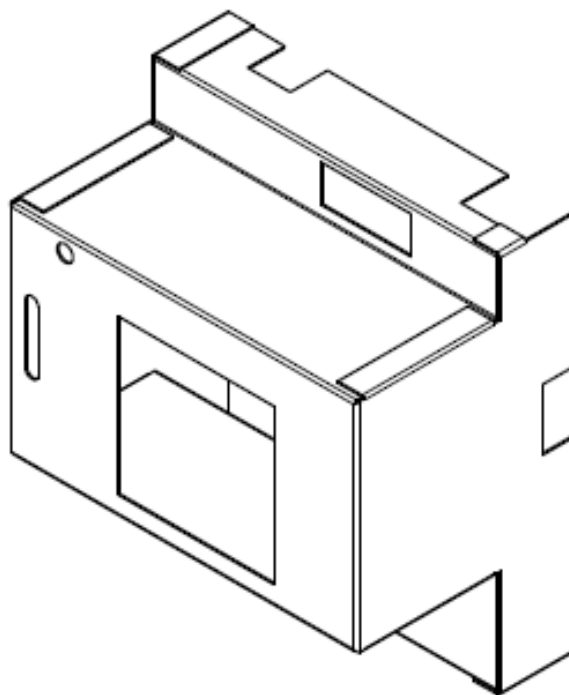
Da bi zadostili standardu IEC 61000-4-3, ki zahteva normalno delovanje naprave v okolju, kjer seva elektromagnetno polje, je bilo potrebno izdelati Faradayev ščit.

Faradayevo kletko oz. ščit predstavlja ohišje s prevodnega materiala. Tako ohišje blokira statično ter izmenično električno polje. Ko ga postavimo v električno polje, pride do prerazporejanja električnega naboja v notranjosti prevodnega materiala, s čimer se izniči vpliv zunanjega polja v notranjosti ohišja.

Osnovno pravilo veli, naj bo velikost lukenj v ohišju mnogo manjša od valovne dolžine elektromagnetnega polja (vsaj 20x). Oba parametra nam določata, koliko energije EM polja bo prodrlo v notranjost ohišja. Poleg lukenj na efekt Faradayeve kletke vplivajo tudi spoji ter reže v ohišju. Kletke z nemagnetnih kovin, kot so aluminij ter baker, uspešno blokirajo električno polje, pri magnetnem polju nizke frekvence pa njihov efekt pade. Za omejevanje vpliva magnetnega polja je zelo primerna feromagnetna kovina, kot sta železo ali »MuMetal«. Tako se magnetni pretok preusmeri skozi kovino, manjši delež pa potuje skozi notranjost ohišja [12].

Kovina »MuMetal« ima lastnost visoke permeabilnosti, kar pomeni dobro ščitenje vezja pred magnetnimi polji. Slaba lastnost je, da po preoblikovanju potrebuje ponovno toplotno obdelavo, ki zagotovi omenjene lastnosti. Ker je naprava ProSECIII neposredno izpostavljena visokim elektromagnetnim pulzom, bi lahko kovina magnetno prešla prezgodaj v zasičenje s čimer dobi magnetne lastnosti zraka.

V dotični napravi je bil zato uporabljen ščit z jeklene pocinkane pločevine. Kletka je sestavljena iz treh delov. Zaradi prostorske stiske je bila debelina zgornjega ter srednjega dela ščita omejena na 0,3 mm, spodnjega dela pa na 1 mm.



**Slika 27: Zgornji del ščita naprave ProSECIII**

## 7. MERITVE PARAMETROV NAPRAVE

### 7.1 MERITEV TOČNOSTI

Zaradi omejene debeline ter oblike ščita je EM pulz tokovnega udara še vedno vplival na merilni rezultat. Določiti je bilo potrebno minimalno oddaljenost naprave od vira tokovnega udara, pri kateri so rezultati še vedno v tolerančnih mejah, to je +/-5 %.

Določitev potrebne razdalje je bila izvedena eksperimentalno.

V tabeli je prikazan vpliv EM polja na merilni rezultat naprave ProSECIII, ki je bila najprej nameščena v oddaljenosti 10 cm od vodnika tokovnega udara, nato pa zunaj kovinske omare.

"- "polariteta udara				
	I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [kA]	Pogrešek [%]
V omari	10,2	10,7	0,5	<b>4,9</b>
Izven omare	10,3	10,7	0,4	<b>3,9</b>
V omari	18,2	19,0	0,8	<b>4,4</b>
Izven omare	18,2	18,7	0,5	<b>2,7</b>
V omari	33,2	34,5	1,3	<b>3,9</b>
Izven omare	33,0	34,0	1,0	<b>3,0</b>
V omari	38,4	40,0	1,6	<b>4,2</b>
Izven omare	38,2	39,5	1,3	<b>3,4</b>

"+" polariteta udara				
	I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [kA]	Pogrešek [%]
V omari	10,3	10,6	0,3	<b>2,9</b>
Izven omare	10,3	10,4	0,1	<b>1,0</b>
V omari	18,2	19,0	0,8	<b>4,4</b>
Izven omare	18,2	18,6	0,4	<b>2,2</b>
V omari	33,6	35,2	1,6	<b>4,8</b>
Izven omare	33,6	34,9	1,3	<b>3,9</b>
V omari	38,2	40,0	1,8	<b>4,7</b>
Izven omare	38,2	39,9	1,7	<b>4,5</b>

Tabela 3: Vpliv EM polja na pogrešek merilnega rezultata naprave ProSECIII (odmik 10 cm)



Slika 28: Testno okolje ProSECIII



Slika 29: ProSECIII izven kovinske omare

V tabeli je prikazan vpliv EM polja na merilni rezultat naprave ProSECIII, ki je bila nameščena v oddaljenosti 5cm.

"- "polariteta udara				
	I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [kA]	Pogrešek [%]
V omari	14,6	15,5	0,9	<b>6,2</b>
	22,4	23,5	1,1	<b>4,9</b>
	30,6	32,9	2,3	<b>7,5</b>
	41	47	6	<b>14,6</b>

" +" polariteta udara				
	I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [kA]	Pogrešek [%]
V omari	14,6	15,9	1,3	<b>8,9</b>
	22,4	23,7	1,3	<b>5,8</b>
	30,6	32,8	2,2	<b>7,2</b>
	41,0	45,4	4,4	<b>10,7</b>

**Tabela 4: Vpliv EM polja na pogrešek merilnega rezultata ProSECIII (odmik 5 cm)**

Za minimalno razdaljo med prenapetostno zaščito ter merilnikom tokovnih udarov ProSECIII je bila izbrana vrednost 10 cm, saj naprava na tej razdalji še zagotavlja deklarirano toleranco merilnih rezultatov.



## 7.2 TEST ENAKOSTI SENZORJEV

Ker naprava ProSECIII ni laboratorijski merilni instrument, ampak je njen namen rezultatov predvsem informativen, je 5 % toleranca od izmerjene vrednosti dovolj. Tolerance elementov analognega vezja so nizke ter predvidljive. Možen je tudi preračun napake instrumenta zaradi odstopanja elektronike v notranjosti. Pomemben element, ki lahko povzroči odstopanje rezultata, je tudi senzor. Test enakosti je pokazal, da kalibracija instrumenta zaradi razlik v izdelavi senzorja ni nujna za doseg želene tolerance instrumenta.

### SENZOR 1

I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [%]
18,7	19,1	2,1
18,7	19,0	1,6
18,7	19,1	2,1

### SENZOR 2

I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [%]
18,7	17,9	-4,5
18,9	18,0	-5,0
18,7	17,9	-4,5

### SENZOR 3

I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [%]
18,8	19,7	4,6
18,7	19,6	4,6
18,8	19,7	4,6

### SENZOR 4

I(gen) [kA]	I(SECIII) [kA]	Pogrešek [%]
18,7	18,5	-1,1
18,7	18,4	-1,6
18,7	18,4	-1,6

Tabela 5: Del testa prikazuje odstopanja različnih senzorjev

## 8. KOMUNIKACIJA NAPRAVE

### 8.1 »REMOTE CONTACT« KOMUNIKACIJA

Omogočena je uporaba vhoda »RC<sub>IN</sub>« (angl.: Remote Controll input«) ter relejnega izhoda »RC<sub>OUT</sub>« (angl.: Remote Controll output).

Vhod »RC<sub>IN</sub>« je namenjen povezavi naprave ProSECIII na namenski konektor varistorja, ki ob okvari sklence notranje mikro-stikalo. Spremembo stanja mikro-stikala zaznamo na vhodu »RC<sub>IN</sub>« in nato izvedemo željene procese v programu.

»RC<sub>OUT</sub>« služi kot enostavna vrsta daljinske komunikacije.

Programska oprema omogoča tudi izbiro vrste oz. klase varistorjev, na katerih merimo tokovne udare. Glede na izbrano vrsto nam naprava določi, pri kateri amplitudi tokovnega udara naj relejni izhod »RC<sub>OUT</sub>« spremeni stanje. Stanje relejnega izhoda se spremeni tudi v primeru okvare varistorja, če seveda uporabimo funkcijo »RC<sub>IN</sub>«.

### 8.2 NAPREDNA KOMUNIKACIJA

Zaradi težnje po nadzoru detekcijskih in merilnih naprav na daljavo je bila izbrana komunikacija RS485. To je en izmed pogosto uporabljenih industrijskih standardov z dosegom 1200 m. Zaradi diferencialnega načina prenosa podatkov je odporen na motnje, ki se pojavljajo v industrijskih okoljih.

V brezžični obliki je bila izbrana »Xbee wireless« komunikacija z dosegom 60 m.

## 9. NADGRADNJA NAPRAVE

Da bi povečali funkcionalnost naprave, je v izdelavi nadgrajena verzija merilnika tokovnih udarov ProSECIII.

Nova različica obsega:

- Ethernet komunikacijo
- merilnik amplitude tokovnih udarov
- 4 »RC« vhode
- merilnik uhajavega toka varistorjev

Ethernet komunikacija omogoča nalaganje in hranjenje zgodovine podatkov naprave na strežniku, do katerega dostopamo preko spletne aplikacije.

Merilnik amplitude tokovnih udarov ima enako vlogo kot pri merilniku ProSECIII.

Naprava bo imela univerzalne RC vhode, s katerimi lahko spremljamo status štirih vej varistorskih zaščit. Na vhode se lahko priključi tudi ostale produkte serije PRO, ki s kombinacijami stanj izhodnega releja (na priključkih »RCout«) lahko delno komunicirajo z napravo, katera podatke pošilja na strežnik.

Da bi odkrili, kdaj se življenjska doba zaščite bliža h koncu, je bil izdelan merilnik uhajavega toka. Po narejeni raziskavi na varistorskih zaščitah je bilo ugotovljeno, da se ob degradaciji le teh poveča uhajavi tok pri nazivni napetosti obratovanja. Degradirana zaščita lahko v času napetostnih razelektritev odpove. Od tega trenutka dalje so vsi porabniki izpostavljeni prenapetostim. V primeru, da pride do ponovne razelektritve pred menjavo varistorja, je velika verjetnost za poškodbo priključenih naprav. Da bi odpravili čas med okvaro ter menjavo SPD-ja, v katerem porabniki niso zaščiteni, je bila izdelana namenska naprava s tremi tokovnimi transformatorji. Le-ti izvajajo meritve toka skozi varistor.

Logika naprave je narejena tako, da si ob montaži novega varistorja, kateremu merimo uhajavi tok, merilni sistem postavi referenco. Ko sčasoma varistor degradira, se mu uhajavi tok poveča. Če uhajavi tok za dalj časa preseže petkratnik vrednosti reference, naprava pošlje alarm na strežnik, ki naznanja potrebo po menjavi zaščite.

## 10. ZAKLJUČEK

Z razvojem naprednega števca tokovnih udarov ProSECIII se izboljša pregled nad destruktivnimi električnimi pojavi, ki se dotikajo prenapetostnih zaščit. Dobra lastnost naprave je njena enostavna instalacija v sistem brez večjih posegov v ozemljitvene tokokroge. Njena glavna vloga je opazovanje tokovnih udarov skozi zaščite, ki so posledica sproščanja energije ob pojavu prenapetosti. To nam pomaga pri opazovanju obremenjenosti trenutno instaliranih zaščit, katere po potrebi nadomestimo z močnejšimi.

Preko različnih komunikacij lahko podatke pošiljamo v uporabnikov sistem, ki dobi opozorilo o prenapetostnem pojavu v obliki amplitude tokovnega udara. Po prejemu opozorilu tehnik preveri stanje zaščit, s čimer se izognemo pogostim preventivnim vzdrževalnim pregledom, med katerimi se preverja njihova izpravnost. Na ta način se naprava uporablja predvsem pri zaščitah, ki nimajo RC izhoda.

Z razvojem naprave ProSECIII se je delno zapolnila vrzel nadzora nad prenapetostnimi zaščitami.



Slika 30: Naprava ProSECIII

## 11. LITERATURA

[1] Ronald B.Standler, Protection of electronic circuits from overvoltages, Str. 86-97, Dover Publications, Inc.

[2] Ronald B.Standler, Protection of electronic circuits from overvoltages, Str.132-135, Dover Publications, Inc.

[3] Components and methods for current measurement (6.1.2012)

Dosegljivo: <http://powerelectronics.com/power-electronics-systems/components-and-methods-current-measurement> [Dostopano: 5.1.2015]

[4] Transformers – The basics (Section 2) (18.10.2012)

Dosegljivo: <http://sound.westhost.com/xfmr2.htm> [Dostopano: 10.1.2015]

[5] Hall effect sensing and application (str. 6,10)

Dosegljivo: [http://sensing.honeywell.com/index.php?ci\\_id=47847](http://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=47847) [Dostopano:12.1.2015]

[6]D.A. Ward, J. La T. Exon, »Using Rogowski coils for transient current measurements« (str. 1), Dosegljivo: <http://www.km-electronics-hk.com/Files/Products/Pr7o.pdf> [Dostopano:12.1.2015]

[7] G. Hurst in L. Meyer, Analysis and design of analog integrated circuits (Fourth Edition) Str. 680-683

[8] Operational Amplifier as Integrator

<http://www.electronicshub.org/operational-amplifier-as-integrator/> [Dostopano 11.2.2015]

[9] Charge Pumps Cut Switched Converter Costs

<http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/apr/charge-pumps-cut-switched-converter-costs> [Dostopano: 17.2.2015]

[10] SIGNAL CHAIN BASICS

[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1272436](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272436) [Dostopano: 17.2.2015]

[11] Joseph J. Carr, The technicians EMI Handbook : Clues and solutions, Str. 24-25

[12] Joseph J. Carr, The technicians EMI Handbook : Clues and solutions, Str. 48-53

### **VIRI SLIK:**

[1] Wüba d.d., podružnica Frankfurt, stanje leta 2000

[2] <http://www.electrical-installation.org/enw/images/7/75/FigF69.jpg> (Dostopano 2.1.2015)

[3] [http://www.7ms.com/enr/online/2007/01\\_02/notebook.html](http://www.7ms.com/enr/online/2007/01_02/notebook.html) (Dostopano 2.1.2015)

[4] <http://i.cmpnet.com/planetanalog/2009/02/C0363-Figure1.gif> (Dostopano 10.1.2015)

[5] <https://elektrikalia.files.wordpress.com/2011/11/6954060-0-large.jpg> (Dostopano 12.1.2015)

[6] [http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/electromechanical\\_devices/sensors\\_transducers/hall-effect-sensing\\_fig3.jpg](http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/electromechanical_devices/sensors_transducers/hall-effect-sensing_fig3.jpg) (Dostopano 18.1.2015)

[7] <http://www.eurekamagazine.co.uk/article-images/3094/F-Rogowski.jpg?width=300&height=225&scale=canvasSlika> (Dostopano 18.1.2015)

[11] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/40/Passive\\_integrator\\_circuit\\_1.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/4/40/Passive_integrator_circuit_1.png)

[14] G. Hurst in L. Meyer, Analysis and design of analog integrated circuits (Fourth Edition) Str. 682

[15] <http://www.circuitstoday.com/wp-content/uploads/2011/11/practical-opamp-integrator-circuit.png> (Dostopano 1.2.2015)

[17] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3d/PeakDet.svg/250px-PeakDet.svg.png> (Dostopano 1.2.2015)

[18] <http://www.inst.bnl.gov/programs/microelec/PDF/ME-JNL-15.pdf> (Dostopano 1.2.2015)

[19] <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/apr/charge-pumps-cut-switched-converter-costs> (Dostopano 8.2.2015)

[20] [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1272436](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272436) (Dostopano 8.2.2015)

[22]

<http://www.murata.com/~media/webrenewal/products/emc/emifil/knowhow/26to30.ashx>

(Dostopano 9.2.2015)

[23]

<http://www.murata.com/~media/webrenewal/products/emc/emifil/knowhow/26to30.ashx>

(Dostopano 15.2.2015)

[24] <http://www.vacuumschmelze.com/en/research-innovation/application-know-how/common-mode-chokes.html> (Dostopano 15.2.2015)

[25]

<http://www.murata.com/~media/webrenewal/products/emc/emifil/knowhow/26to30.ashx>

(Dostopano 27.2.2015)

[26] <http://www.mpdigest.com/issue/Articles/2010/nov/avx/Default.asp> (Dostopano 15.3.2015)

[30] <http://www.iskrazascite.si/uploads/datasheet/1397474364.pdf> (Dostopano 26.3.2015)