Tipični načini upravljanja u jednofaznim naponskim izmjenjivačima prikazanim s pomoću didaktičko multimedijalne opreme Lucas-Nulle

Babić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:566474

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Diplomski studij

TIPIČNI NAČINI UPRAVLJANJA U JEDNOFAZNIM NAPONSKIM IZMJENJIVAČIMA PRIKAZANIM S POMOĆU DIDAKTIČKO MULTIMEDIJALNE OPREME LUCAS-NUELLE

Diplomski rad

Matija Babić

Osijek, 2017.g.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 06.09.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Matija Babić
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-810, 07.10.2014.
OIB studenta:	94114166743
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin
Sumentor:	Andrej Brandis
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Doc.dr.sc. Davor Vinko
Član Povjerenstva:	Ivan Biondić
Naslov diplomskog rada:	Tipični načini upravljanja u jednofaznim naponskim izmjenjivačima prikazanim s pomoću didaktičko multimedijalne opreme Lucas-Nulle
Znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	Za postojeću didaktičko-multimedijalne opreme Lucas-Nulle pokazati postupke upravljanja jednofaznog naponskog izmjenjivača . Osmisliti laboratorijsku vježbu i napraviti predložak za laboratorijsku vježbu!
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	06.09.2017.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 11.09.2017.

Ime i prezime studenta:	Matija Babić
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-810, 07.10.2014.
Ephorus podudaranje [%]:	0

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Tipični načini upravljanja u jednofaznim naponskim izmjenjivačima prikazanim s pomoću didaktičko multimedijalne opreme Lucas-Nulle**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Denis Pelin

i sumentora Andrej Brandis

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. JEDNOFAZNI NAPONSKI IZMJENJIVAČ 2

2.1. Analiza rada neupravljivog naponskog izmjenjivača u mosnom spoju 4

2.2. Analiza rada neupravljivog naponskog izmjenjivača u polumosnom spoju 8

3. DIDAKTIČKO MULTIMEDIJALNA OPREMA 10

3.1. Opis opreme 10

3.1.1.Sučelje s pripadajućim eksperimentatorima 10

3.1.2. Set eksperimentalnih kartica 11

3.1.3. Računalni program *LabSoft* 12

3.2. Vježba: Neupravljivi naponski izmjenjivač (pravokutna modulacija) 14

3.2.1. Snimanje valnih oblika struje i napona neupravljivog izmjenjivača 16

3.2.2. Korištenje vanjskog trošila za prikaz rada neupravljivog naponskog izmjenjivača 19

3.2.3.Ukupno harmonijsko izobličenje 23

4. SMANJIVANJE UKUPNOG HARMONIJSKOG IZOBLIČENJA 26

4.1. Smanjivanje THD-a napona trošila 26

4.1.1 Reaktivni filtri 26

4.1.2. Uklanjanje pojedinih harmonika iz izlaznog napona izmjenjivača 28

4.2. Pulsno-širinska modulacija 29

4.2.1. Snimanje valnih oblika struje i napona pravokutne pulsno-širinske modulacije 31

4.2.2. Frekvencijski spektar i mjerenje THD-a pravokutne modulacije 37

4.3. Bipolarna sinusna pulsno-širinska modulacija 44

4.3.1. Određivanje modulacijskog indeksa $\boldsymbol{ma}$ i snimanje valnih oblika struje i napona 46

4.3.2. Frekvencijski spektar i mjerenje THD-a 54

4.3.3. Mjerenje THD-a pri promjeni izlazne i sklopne frekvencije 62

5. ZAKLJUČAK 64

LITERATURA 65
SAŽETAK 66
ABSTRACT 67
ŽIVOTOPIS 68

1. UVOD

Način rada jednofaznog naponskog izmjenjivača prikazan je pomoću didaktičko multimedijalne opreme proizvođača *Lucas Nuelle* koja služi za opće obrazovanje i usavršavanje u elektrotehnici i ostalim znanostima (kemija, fizika...). Sastav opreme je opisan u nastavku rada, a čini jedan sustav osmišljen kao prenosivi laboratorij koji svojom kompaktnošću olakšava tranasport te smanjuje radni prostor. Za prikaz rada izmjenjivača pomoću opreme *Lucas Nuelle* potrebno je računalo u svrhu komunikacije između sklopovlja i programske podrške.

Jednofazni naponski izmjenjivači nazivaju se i autonomni izmjenjivači jer za njihov rad ne treba izmjenična pojna mreža, osim u ovakvim slučajevima kada se pomoću multimedijalne opreme prikazuje njihov rad, gdje je i oprema i računalo spojeno na izmjeničnu mrežu. Ovi izmjenjivači imaju mogućnost upravljanja amplitudom i frekvencijom izlaznog izmjeničnog napona. Najčešća primjena autonomnih izmjenjivača je napajanje izmjeničnih motora, kojima treba mjenjati brzinu vrtnje. Ostale primjene uključuju sustave za neprekidno napajanje električnom energijom, pretvarače frekvencije, prenosive punjače i sustave za prilagodbu izmjeničnih trošila obnovljivim izvorima energije. Najveći problem ovih izmjenjivača stvaraju harmonici jer oni smanjuju faktor snage na izmjeničnim priključcima. Viši harmonijski članovi izvor su smetnje za upravljačke sklopove i druge uređaje, a kod motora mogu potaknuti mehaničke rezonancije i uzrokovati akustičku buku trošila. Potrebno je smanjiti utjecaj viših harmonika, a pokazatelj koji opisuje sadržaj harmonika je ukupno harmonijsko izobličenje (THD-total harminic distorsion).

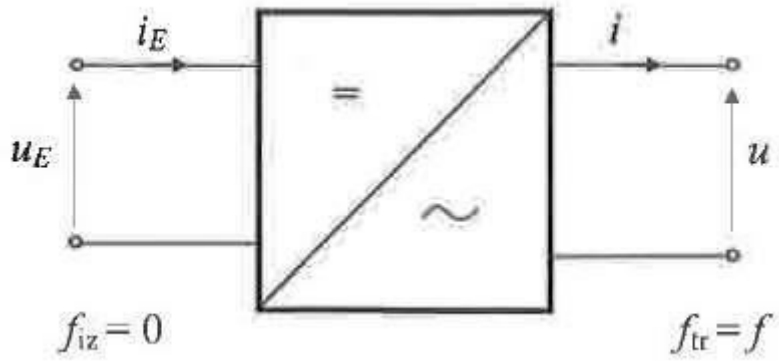
U prikazu rada izmjenjivača biti će korištene dvije modulacijske tehnike: pravokutna i sinusna pulsno širinska. Prije svake od tehnika bit će opisana teorija, te način dobivanja rezultata u programu *LabSoft.* Rezultati mjerenja pri tazličitim postavkama izmjenjivača biti će prikazani kao valni oblici napona i struja, te frekvencijski spektri napona i struja. Uz frekvencijske spektre biti će mjereno i ukupno harmonijsko izobličenje napona i struja, THDU i THDI.

Cilj ovog rada je prikazati praktičnost didaktičko-multimedijalne opreme pri opisivanju rada jednofaznog naponskog izmjenjivača, odnosno pomoću opreme prikazati načine upravljanja jednofaznim izmjenjivačem, a rezultate mjerenja usporediti sa teorijskim rezultatima.

2. JEDNOFAZNI NAPONSKI IZMJENJIVAČ

Nakon nestanka napona izmjenične mreže kao rezervni energetski izvor ostaje akumulatorska baterija. Iz ovog se istosmjernog izvora mora s pomoću izmjenjivača izgraditi izmjenični sustav. Frekvencija rada ovog izmjeničnog sustava generirana je autonomno, tj. unutar samog izmjenjivača. Zbog toga se ova vrsta izmjenjivača naziva nezavisni ili autonomni izmjenjivači [1]. Autonomni izmjenjivači se mogu podijeliti: s obirom na broj faza trošila (jednofazne i trofazne), s obzirom na upravljivost (upravljive i neupravljive), s obzirom na vrste istosmjernih pojnih mreža (strujne izmjenjivače i naponske izmjenjivače) i s obzirom na titrajna svojstva izmjeničnih trošila

Izmjenjivač u ovome radu naziva se jednofaznim jer je njegovo trošilo jednofazno. Slika 2.1. prikazuje simbol jednofaznog izmjenjivača, na ulaznom prilazu (paru polova) priključena je istosmjerna pojna mreža napona u_E i struje i_E, dok je na izlaznom prilazu (paru polova) priključeno izmjenično trošilo napona *u*, struje *i* i frekvencije $f_{tr} = f \neq 0$.



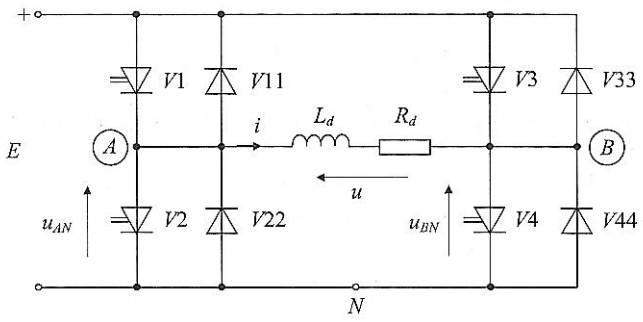
Slika 2.1.*Simbol jednofaznog autonomnog izmjenjivača i referentni smjerovi napona i struja na priključcima*

Većinu izmjeničnnih energetskih trošila čine induktivna trošila – transformatori i izmjenični motori. Induktivna trošila se mogu napajati iz strujnih izmjenjivača na dva osnovna načina. Jedan je da se induktivna trošila nadkompenziraju paralelno im spojenim kondenzatorskim baterijama. Drugi je da se usložne sheme spojeva strujnih izmjenjivača, primjerice, upotrebom dvomosnih ili tiristorsko-diodnih mosnih spojeva. To nisu niti jeftina niti jednostavna rješenja.

Temeljni uzrok tim poteškoćama jest u tome što su pojna mreža i trošilo istog, induktivnog, karaktera. Zbog toga je tehnički korektnije, u svim primjenama kad je to moguće, induktivna trošila napajati iz naponskih izmjenjivača. Dakle, iz autonomnih izmjenjivača priključenih na istosmjerne naponske izvore. Zbog različitiog karaktera istosmjerne pojne mreže i izmjeničnih trošila pretvarački sklopovi naponskih izmjenjivača će se sastojati samo od pretvaračkih komponenata. To je već značajna prednost u odnosu na napajanje induktivnih trošila s pomoću strujnih izmjenjivača[1].

Ovim je istosmjernim pretvaračem omogućen motorski rad i generatorsko kočenje istosmjernog motora za oba smjera vrtnje. Na armaturni krug istosmjernog motora (induktivno trošilo) može se narinuti istosmjerni napon obaju smjerova uz oba smjera istosmjerne struje trošila. To znači da se, promjenom samo načina upravljanja, može s pomoću četverokvadrantnog istosmjernog pretvarača postići jednofazni izmjenični napon i struja trošila. Drugim riječima, shema spoja četverokvadrantnog istosmjernog pretvarača je ujedno i shema spoja jednog naposkog izmjenjivača. Jednofazni naponski izmjenjivač u mosnom spoju prikazan je na slici:

.



Slika2.2.*Shema spoja jednofaznog naponskog izmjenjivača u mosnom spoju*

Na slici se može primjetiti kako se mosni spoj sastoji od dviju grana. Jednu granu tvore upravljivi ventili V1 i V2 s pripadnim antiparalelno spojenim diodama V11 i V22. Drugu granu tvore upravljivi ventili V3 i V4 s pripadnim antiparalelno spojenim diodama V33 i V44.

Osnovno pravilo upravljanja u analizi rada naponskih izmjenjivača je da upravljivi ventili svake grane sklapaju protutaktno, može ga se zapisati u sažetom obliku izraženo s pomoću upravljačkih signala:

$$x_{V1} + x_{V2} = 1 \quad , \quad \forall t$$

$$x_{V3} + x_{V4} = 1 \quad , \quad \forall t$$

2.1. Analiza rada neupravljivog naponskog izmjenjivača u mosnom spoju

Napon trošila ovisi isključivo o sklopnom stanju (uklopljenosti/isklopljenosti) upravljivih ventila, a ne i o trenutnom smjeru struje trošila, napon se trošila može odrediti na temelju poznavanja valnih oblika upravljačkih signala. Prema oznakama na slici 2.2. napon trošila je jednak razlici napona priključaka trošila A i B prema negativnom polu istosmjernog izvora N.

Naponi priključaka su jednaki:

$$u_{AN} = x_{V1}E \ , \quad u_{BN} = x_{V3}E$$

Napon na trošilu iznosi:

$$u = u_{AN} - u_{BN} = (x_{V1} - x_{V3})E \tag{2-1}$$

Na trošilu su moguće tri različite vrijednosti napona; pozitivna, iznosa +E, kada je $x_{V1} = 1$, $x_{V3} = 0$; negativna, iznosa –E, kada je x_{V1}=0, x_{V3}=1, odnosno jednaka nuli kad je $x_{V1} = x_{V3} = 1\ ili\ 0$.

Trošila koja se napajaju iz naponskog izmjenjivača izmjenična su, i u pravilu, projektirana za sinusni napon odnosno za sinusnu struju. Zbog toga se i na izlazni napon naponskog izmjenjivača (napon trošila), što se tiče valnog oblika napona, postavljaju isti uvjeti koje zadovoljava sinusna funkcija. Valni oblik napona mora biti zrcalno simetrična funkcija vremena, tj. mora vrijediti

$$u(t) = -u\left(t + \frac{T}{2}\right) \tag{2-2}$$

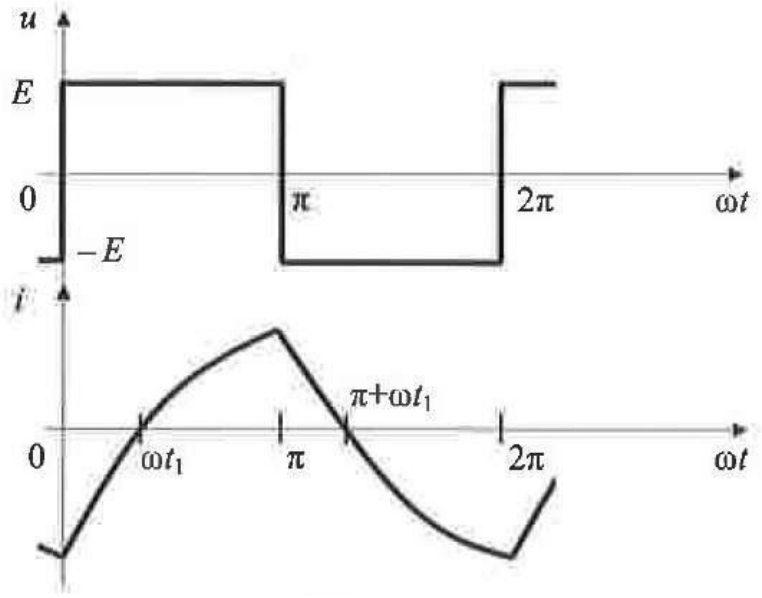
gdje je T = 2π/ω perioda rada.

Najjednostavniji način upravljanja ventilima, kojim je ostvaren izmjenični valni oblik napona, jest ako se odabere slijed upravljačkih signala

$$x_{V1}(t) = 1 \quad x_{V3}(t) = 0 \qquad 0 \le t \le \frac{T}{2}$$

$$x_{V1}(t) = 0 \quad x_{V3}(t) = 1 \qquad \frac{T}{2} \le t \le T$$

Što znači da su u jednoj polovini periode rada uklopljjeni upravljivi ventili V1 i V4, a u drugoj polovini periode rada upravljivi ventili V2 i V3. Željena frekvencija trošila $f = 1/T$ jednaka je sklopnoj frekvenciji f_S. Napon trošila je izmjeničan i pravokutan što se može vidjeti na slici 2.3.



Slika 2.3.*Valni oblici napona i struje trošila*

Rastavom ovog valnog oblika u Fourierov red dobivamo izraz za napon trošila u obliku

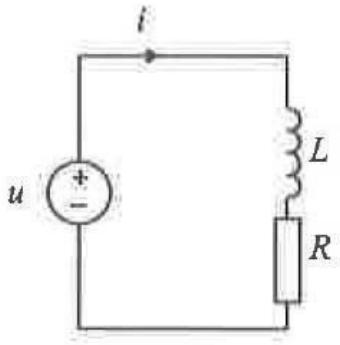
$$u = \frac{4E}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin n\omega t}{n} \quad ; \quad n = 1, 3, 5 \ldots \tag{2-3}$$

Što znači da je efektivna vrijednost osnovnog harmonika napon trošila

$$U(1) = \frac{4E}{\pi}\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}E \tag{2-4}$$

Efektivna vrijednost napona osnovnog harmonika $U(1)$ može se mijenjati samo promjenom iznosa istosmjernog napona E, što je moguće zaključiti iz izraza (2-4). Iz tog razloga naponski izmjenjivač, upravljan na ovaj način, naziva se neupravljivim naponskim izmjenjivačem.

Valni oblik struje trošila i valni oblici struja ventila se određuju analizom nadomjesne sheme kruga trošila, prikazane na slici 2.4.



Slika 2.4.*Nadomjesna shema kruga trošila neupravljivog naponskog izmjenjivača*

Jednadžba ovog kruga može se napisati u obliku

$$tg\varphi = \frac{di}{d(\omega t)} + i = \frac{E}{R} \cdot \begin{cases} 1 & +0 \le \omega t \le \pi - 0 \\ -1 & \pi + 0 \le \omega t \le 2\pi - 0 \end{cases} \tag{2-5}$$

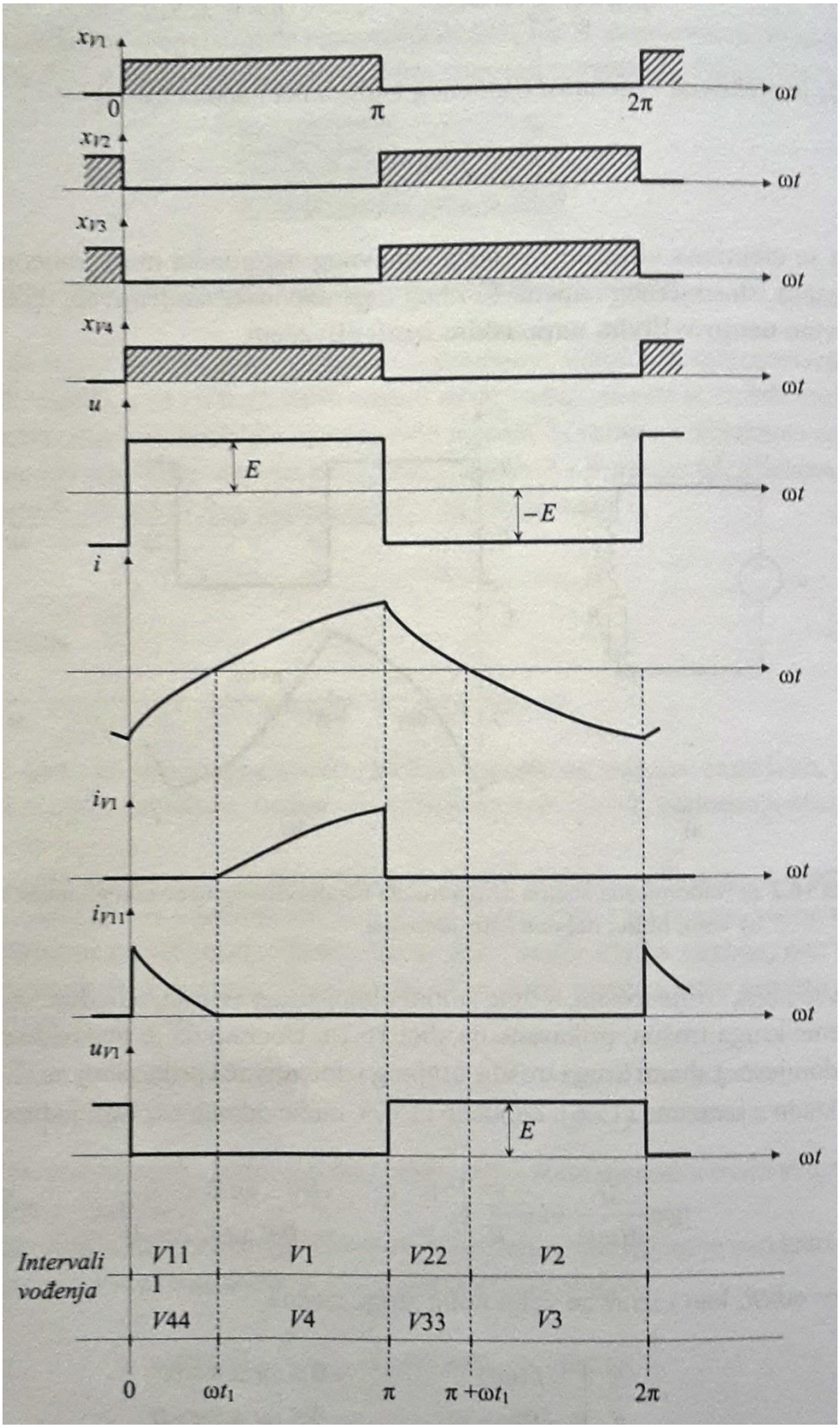
Gdje je tgφ = ωL/R, kao i izraz za valni oblik struje trošila prikazan u slijedecoj formuli:

$$i = \frac{E}{R} \cdot \begin{cases} f(\omega t) & +0 \le \omega t \le \pi - 0 \\ -f(\omega t - \pi) & \pi - 0 \le \omega t \le 2\pi - 0 \end{cases} \tag{2-6}$$

Funkcija $f(\omega t)$ dana je izrazom:

$$f(\omega t) = 1 - \frac{2e^{-\frac{\omega t}{tg\varphi}}}{1+e^{-\frac{\pi}{tg\varphi}}} \tag{2-7}$$

Potrebno je još odrediti naponsko i strujno opterećenje pojedinih ventila naponskog izmjenjivača. U skladu s odabranim referentnim smjerovima napona i struja, prikazanim na slici 2.1. lako je odrediti intervale vođenja pojedinih ventila. Na slici 2.5. prikazan je slijed upravljačkih signala te valni oblici napona i struje trošila.



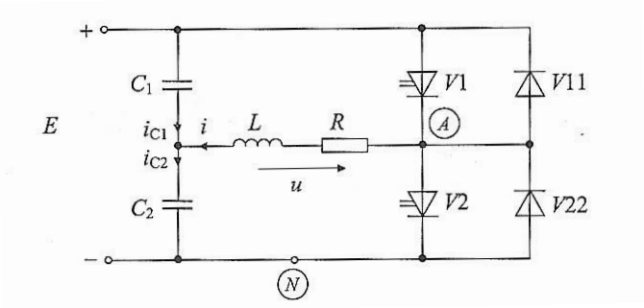
Slika 2.5.*Karakteristični valni oblici napona i struja neupravljivog naponskog izmjenjivač*

U intervalu $[0, \omega t_1]$ vrijedi da je napon na trošilu $u = E$, zbog toga što su na upravljive ventile V1 i V4 narinuti upravljački signali. No, stvarni je smjer struje trošila suprotan od referentnog smjera, tj. $i < 0$, što znači da upravljivi ventili V1 i V4 ne vode struju trošila, nego njima antiparalelno spojene diode V11 i V44.

U intervalu $[\omega t_1, \pi]$, upravljački su sigali i dalje narinuti na upravljive ventile V1 i V44, ali se smjer struje trošila promjenio, tj. Vrijedi da je $u = E$; i $i > 0$, što znači da struju trošila vode upravljivi ventili V1 i V4. Na analogni se lako određuje koji ventili vode i u kojem vremenskom intervalu u sljedećoj poluperiodi rada $[\pi, 2\pi]$, što je i prikazano na slici 2.5.

2.2. Analiza rada neupravljivog naponskog izmjenjivača u polumosnom spoju

Najčešće upotrebljavani spoj jednofaznog naponskog izmjenjivača jest mosni spoj. Ovaj spoj se ne upotrebljava uvijek jer postoje nedostaci kod jednofaznog mosnog spoja, kojemu je specifičnost da u svakom trenutku struju trošila vode dva poluvodička ventila. U stanju vođenja na ventilima nastaje pad napona koji se kreće od 1V za diode i do 3V i više za upravljive ventile, što uzorkuje glavni nedostatak ovakvog spoja, a to su gubici vođenja. Ako se želi povećati stupanj djelovanja koriste se druga rješenja i drugi spojevi, kao što je polumosni spoj. Na slici 2.6 prikazan je jednofazni polumosni spoj.



Slika 2.6. *Shema jednofaznog izmjenjivača u polumosnom spoju.*

Bez detaljnije analize rada moguće je uočiti nekoliko specifičnosti polumosnog spoja. Prvo je svojstvo da struju trošila u svakome trenutku vodi samo jedan ventil, što uzrokuje manje gubitke od jednofaznog mosnog spoja.

Druga specifičnost polumosnog spoja su dva serijski spojena kondenzatora C_1 i C_2 koji tvore srednju točku istosmjernog izvora. Iz sheme sa slike 2.6. je vidljivo da je struja kroz trošilo u svakome trenutku iznosa $i = i_{C2} - i_{C1}$. Srednja vrijednost struje trošila $I(0)$ jednaka je nuli, iz razloga što je srednja vrijednost oba kondenzatora u periodičkom ustaljenom stanju jednaka nuli. Ovo je posebice važno kod galvanskog odvajanja trošila od izvora. Kapaciteti kondenzatora biraju se tako da im je napon zanemarive valovitosti, dakle $u_{C1} \approx U_{C1}(0)$ i $u_{C2} \approx U_{C2}(0)$. Kondenzatori su obično elektrolitski. Srednje vrijednosti napona oba kondenzatora, ukoliko se osigura jednako trajanje uklopljenosti oba upravljačka ventila $V1$ i $V2$, iznose:

$$U_{C1}(0) \approx U_{C2}(0) \approx \frac{E}{2}$$

Treće je svojstvo da je napon trošila uvijek ili pozitivan i iznosi $+E/2$ ili je negativan te iznosi $-E/2$. Ova činjenica dovodi do toga da je efektivnu vrijednosti osnovnog harmonika $U(1)$ moguće mijenjati samo bipolarnom pulsno-širinskom modulacijom.

Za prikazivanje rada jednofaznog naponskog izmjenjivača u polumosnom spoju pri raznim modulacijama korištena je didaktičko multimedijalna oprema.

Tehničko osposobljavanje se stalno mijenja. Takve promjene su uvjetovane brzim razvojem elektrotehnike, potrebom za interdisciplinarnom obukom kao npr. mehatronike, komunikacijske tehnologije, te razvojem didaktičkih metoda. Sve ove promjene moguće je pratiti jedino stalnim unapređenjem kako teoretskog tako i praktičnog dijela nastave u laboratorijima. Razne studije su dokazale da je sposobnost učenika/studenta da se prisjete nekog pojma ili činjenice značajno bolja ako je on aktivni sudionik, a ne samo pasivni slušač u nastavnom procesu[2]. Iz tog razloga koristi se navedena oprema koja je opisana u slijedećem poglavlju.

3. DIDAKTIČKO MULTIMEDIJALNA OPREMA

3.1. Opis opreme

Didaktičko-multimedijalna oprema proizvođača *Lucas Nuelle* multimedijalni je sustav namijenjen općem obrazovanju i usavršavanju u elektrotehnici. Ova oprema sastoji se od sklopovlja i programske podrške. Za korištenje navedene multimedijalne opreme potrebno je računalo te izvor električne energije. Računalni program koji dolazi uz navedenu opremu je *LabSoft*. Ovaj program sadrži sve potrebne virtualne mjerne instrumente i izvore napajanja za odrađivanje vježbi kojima će se prikazati rad i karakteristike jednofaznog naponskog izmjenjivača.

Korištena oprema uključuje:

- *SO4203-2A, UniTrain-1* sučelje s pripadajućim napajanjima
- *SO4203-2B* dva eksperimentatora za povezivanje sučelja i eksperimentalnih kartica
- *SO4204-7M* set eksperimentalnih kartica sa pripadajućim programskim paketom
- *SO4203-2J* pribor za spajanje
- *DS4203-2A* računalni program *LabSoft*

3.1.1.Sučelje s pripadajućim eksperimentatorima

UnitTrain-1 služi za međusobnu komunikaciju opreme i računala preko *USB* veze. Navedeno sučelje sadrži priključke za analogne ulaze i izlaze, digitalne ulaze i izlaze te releje. Eksperimentatori *SO4203-2B* služe za međusobnu vezu između sučelja i eksperimentalnih kartica. Oni sadrže priključnice za fiksne i promjenjive izvore napajanja. Sučelje s pripadnim eksperimentatorima nalazi se na slici 3.1.



Slika 3.1. *Sučelje mjerne opreme s pripadajućim eksperimentatorima*

3.1.2. Set eksperimentalnih kartica

Set eksperimentalnih kartica *SO4204-7M* uključuje eksperimentalnu karticu s energetskim pretvaračem koji može raditi ili kao izmjenjivač ili kao istosmjerni pretvarač napona. Sadrži šest MOSFET tranzistora s kojima upravlja mikrokontroler. Napajanje kartice je interno preko sabirnica (40 V, 1 A). Ova kartica sadrži i priključnice *MUX* koje služe za istovremeno mjerenje napona i struja, a s kojima se upravlja preko programske podrške. Također, vizualno se preko uključenja i isključenja svjetlećih dioda može vidjeti sklopno stanje MOSFET-a. Drugi dio seta uključuje eksperimentalnu karticu sa trofaznim radnim ili radno-induktivnim trošilom, vizualni prikaz smjera struje preko promjenjive boje svjetlećih dioda. Na slici 3.2. prikazan je navedeni set eksperimentalnih kartica korištenih za prikazivanje rada jednofaznog izmjenjivača.



Slika 3.2.*Eksperimentalne kartice*

Ove dvije eksperimentalne kartice prikazane na slici 3.2. stavljaju se u utore eksperimentatora kako je prikazano na slici 3.3.



Slika 3.3. *Korištena didaktičko-multimedijalna oprema*

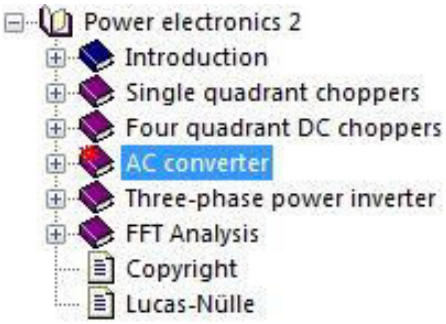
3.1.3. Računalni program LabSoft

Računalni program *LabSoft* sadrži sve potrebne virtualne instrumente koji komuniciraju putem *USB* veze s *UniTrain-I* sučeljem. Programski paket *LabSoft* instalira se preko dobivenog kompaktnog diska na računalo. Kompaktni disk sadrži potreban upravljački program kako bi komunikacija računala i sučelja bila uspješna. Po završetku instalacije navedenog programskog

paketa potrebno je instalirati skup vježbi dobiven na kompaktnom disku koji se dobije uz set eksperimentalnih kartica.

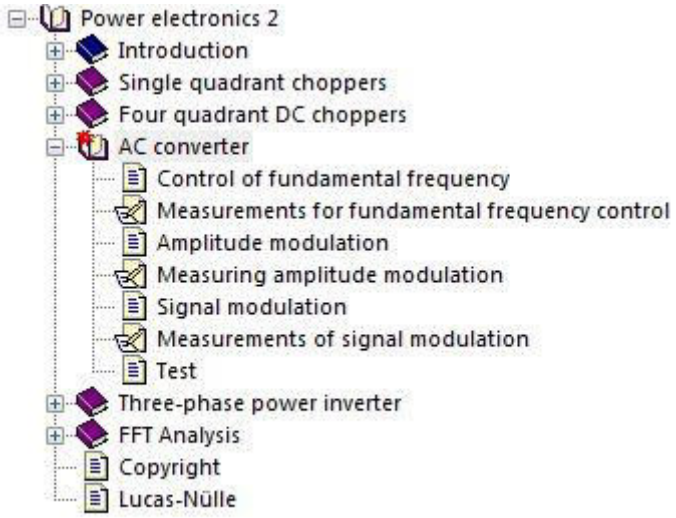
Nakon uspješno završenih instalacija, te prije pokretanja samog programskog paketa *LabSoft*, potrebno je spojiti sučelje opreme s računalom te ga potom uključiti. Kada na sučelju svjetleća dioda svijetli zeleno, računalni program *LabSoft* može se pokrenuti.

Nakon pokretanja, otvori se početni zaslon računalnog programa *LabSoft.* Na početnom zaslonu najvažniji dio je izbornik sa energetskim pretvaračima, a prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. *Dio početnog zaslona računalnog programa LabSoft sa pripadajućim izbornicima*

Pritiskom miša na + padajućeg izbornika *Power Electronics 2*, otvaraju se razne vježbe koje je moguće obraditi s pripadajućim eksperimentalnim karticama. Vježba korištena u ovom radu je „AC converter“, a kada se otvori izbornik dobiju se mogućnosti prikazane na slici 3.5.



Slika 3.5. *Otvoreni izbornici vježbi s jednofaznim naponskim izmenjivačem*

Iz otvorenog izbornika moguće je pristupiti vježbama. Svaka vježba sadrži teorijski dio vježbe i pripadni eksperimentalni dio vježbe. U gornjem desnom uglu nalaze se gumbi za pristup raznim mjernim alatima jednofaznog izmjenjivača (Slika 3.6.).



Slika 3.6. *Prikaz gumba za pristup mjernim alatima jednofaznog izmjenjivača*

Ovisno o odabranoj vježbi mijenjaju se dostupni mjerni alati. Dostupni gumbi odnosno mjerni alati u programu *LabSoft* označavaju:

 Početni zaslonu za izbor tečaja i vježbi

 Osciloskop

 Vremenski dijagram

 Alat za snimanje upravljačke karakteristike

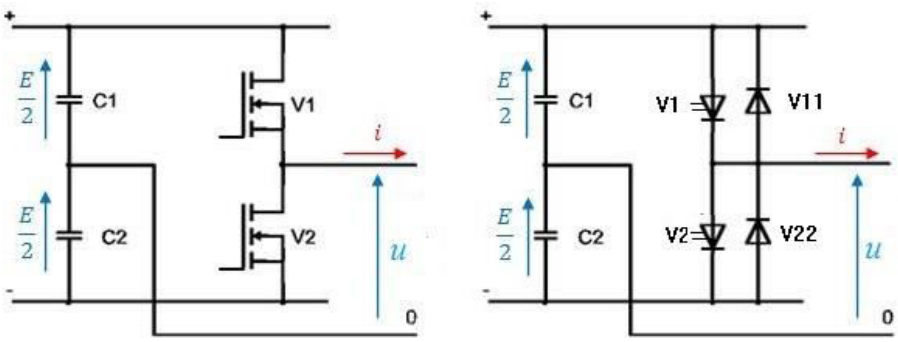
 Alat za mjerenje vektora snaga

 Spektralni analizator

Sa slike 3.6. može se vidjeti kako su za jednofazni naponski izmjenjivač od mjernih alata dostupni samo osciloskop i vremenski dijagram.

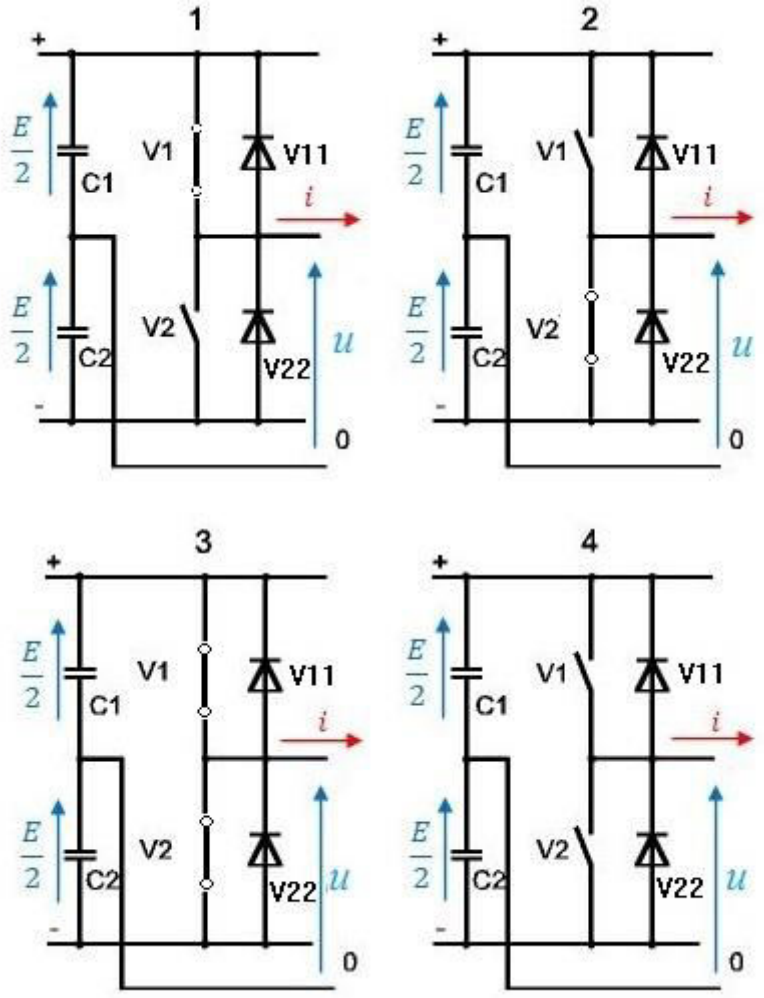
3.2. Vježba: Neupravljivi naponski izmjenjivač (pravokutna modulacija)

Načelni prikaz neupravljivog polumosnog izmjenjivača prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7. *Polumosni spoj jednofaznog izmjenjivača*

Ovaj polumosni sklop izmjenjivača teoretski je moguće ostvariti pomoću dva antiparalelna spoja upravljivog ventila i idealne diode (slika 3.7. desno). Ovakva konfiguracija sklopa omogućuje četiri različita sklopna stanja, kao što je prikazano na slici 3.8.

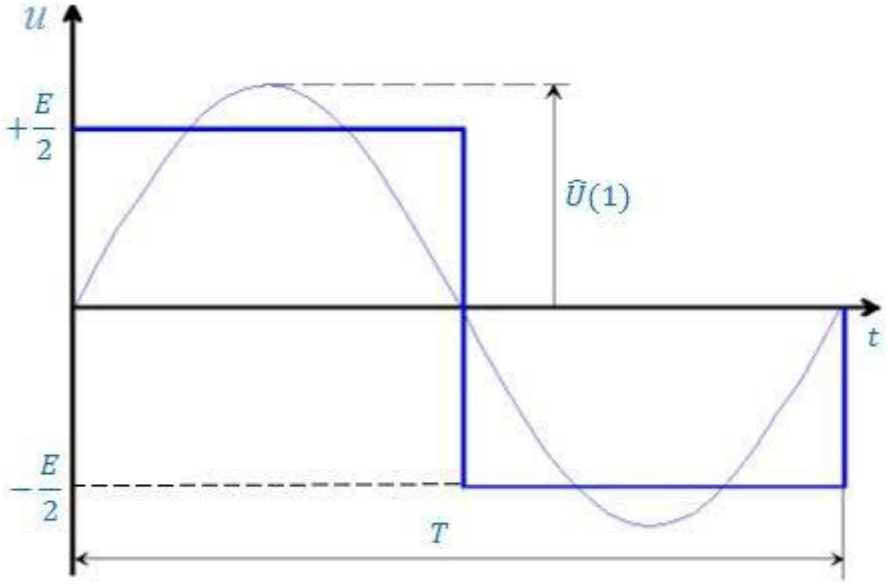


Slika 3.8. *Moguća sklopna stanja neupravljivog naponskog izmjenjivača*

Kao što je već rečeno, teoretski su moguća četiri sklopna stanja neupravljivog naponskog izmjenjivača, a to su:

- Sklopka *V*1 je zatvorena; sklopka *V*2 je otvorena. Izlazni napon *u* iznosi $+E/2$.
- Sklopka *V*1 je otvorena; sklopka *V*2 je zatvorena. Izlazni napon *u* iznosi $-E/2$.
- Obje sklopke *V*1 i *V*2 su zatvorene. Ovo stanje je neželjeno stanje, jer dolazi do kratkog spoja naponskog izvora
- Obje sklopke *V*1 i *V*2 su otvorene. Ovo stanje je stanje mirovanja.

Za rad izmjenjivača koriste se stanja sklopa 1 i 2. Ovakav sklop čini jednostavni naponski izmjenjivač. Izlazni napon pravokutnog je oblika s amplitudom napona iznosa $E/2$. Izlazna frekvencija namješta se pomoću frekvencije sklapanja.

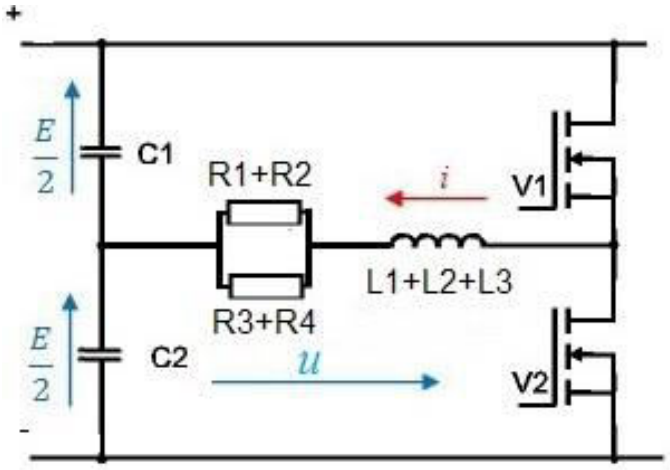


Slika 3.9. *Valni oblik izlaznog napona i ekvivalentni sinusni oblik napona*

Na slici 3.9. je prikazan valni oblik izlaznog napona koji je pravokutnog oblika, te osnovni harmonik napona.

3.2.1. Snimanje valnih oblika struje i napona neupravljivog izmjenjivača

U ovoj vježbi snimat će se valni oblici izlaznog napona i izlazne struje sa radno-induktivnim opterećenjem neupravljivog jednofaznog izmjenjivača. Slika 3.10. prikazuje shematski prikaz spajanja polumosnog spoja izmjenjivača s trošilom.

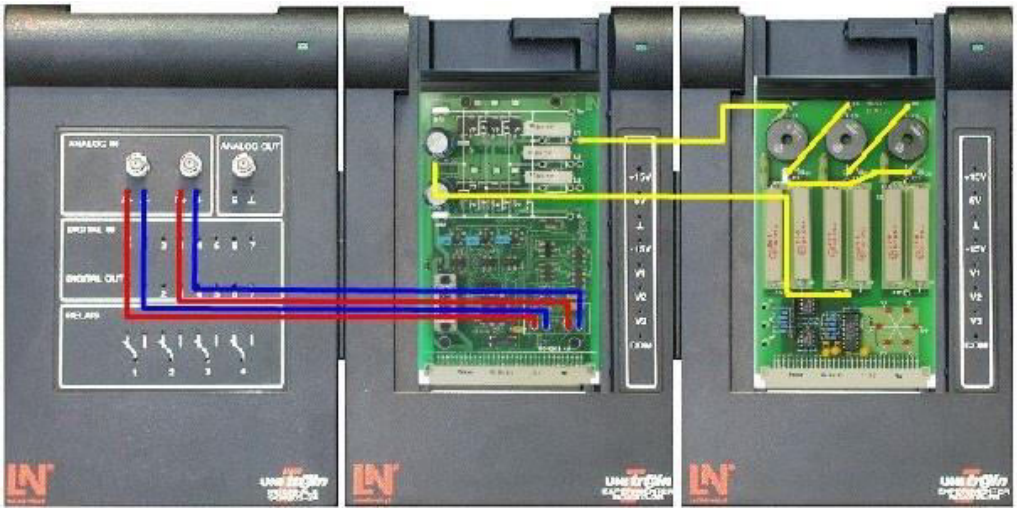


Slika 3.10. *Shema spajanja jednofaznog neupravljivog naponskog izmjenjivača*

Trošilo korišteno u vježbi nalazi se na eksperimentalnoj kartici, a iznosi otpora i induktiviteta su: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 18\Omega$ i $L_1 = L_2 = L_3 = 3{,}3mH$. Što znači da ukupni otpor ovog spoja iznosi: $R_{uk} = 18\Omega$, a induktiviteta $L_{uk} = 9{,}9mH$. Ovim načinom spajanja može se dobiti najveća vremenska konstanta trošila s eksperimentalne kartice. Ona iznosi:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{9{,}9mH}{18\Omega} = 0{,}55ms$$

Na slici 3.11. prikazan je način spajanja mjerne opreme jednofaznog neupravljivog naponskog izmjenjivača sa trošilom eksperimentalne kartice.

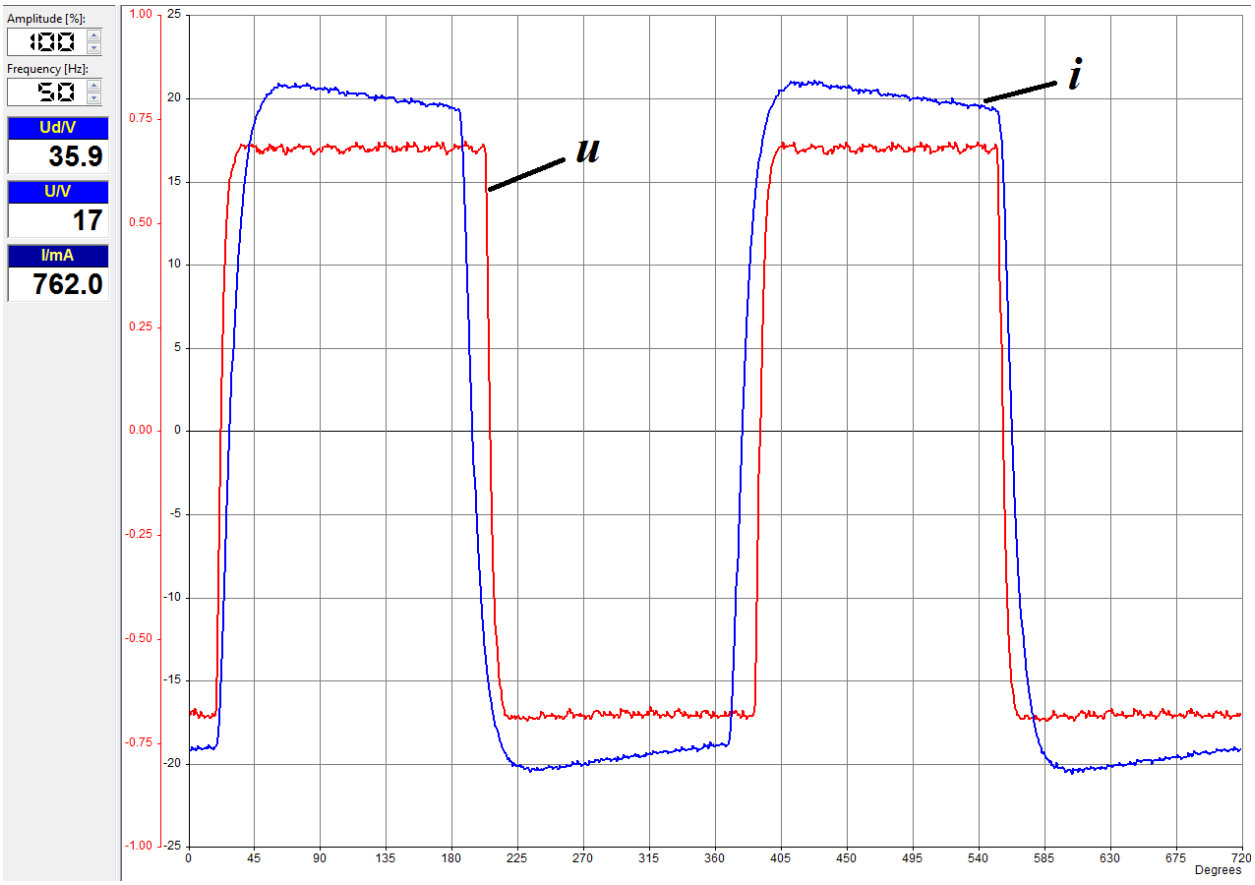


Slika 3.11. *Način spajanja strujnog kruga mjerne opreme s radno-induktivnim opterećenjem jednofaznog neupravljivog naponskog izmjenjivača*

Pritiskom na dugme automatski se učitava radni prostor, te se automatski učitaju podaci dani u tablici 3.1.

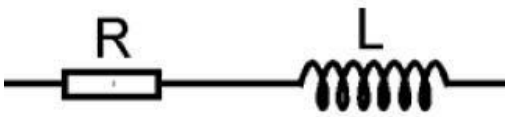
Tablica 3.1. *Postavke jednofaznog neupravljivog naponskog izmjenjivača s radno-induktivnim opterećenjem*

Alat:	Vremenski dijagram – jednokvadrantni „low-side“ pretvarač
Opterećenje:	Radno-induktivno
Frekvencija osnovnog harmonika:	50 Hz
Mjerenja:	Izlazni napon i izlazna struja



Slika 3.12. *Valni oblici struje i napona neupravljivog naponskog izmjenjivača*

Na slici 3.12. može se vidjeti kako je napon označen crvenom bojom, a struja plavom, prema strelicama koje ih označavaju i vrijednostima struje i napona prikazanim u gornjem lijevom kutu. Napon izlaza pravokutnog je valnog oblika i sadrži više harmonike. Zbog induktivnosti trošila, između osnovnog harmonika napona i struje treba postojati fazni pomak φ, a na ovoj slici fazni pomak je neprimjetan, što i nije tipično za induktivna trošila, vremenska konstanta τ nije dovoljno velika. Trošilo korišteno u vježbi kako je već spomenuto, radno-induktivnog je karaktera, slika 3.13.



Slika 3.13. *Trošilo radno-induktivnog karaktera*

Izraz za impedanciju je:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \tag{3-1}$$

a fazni pomak:

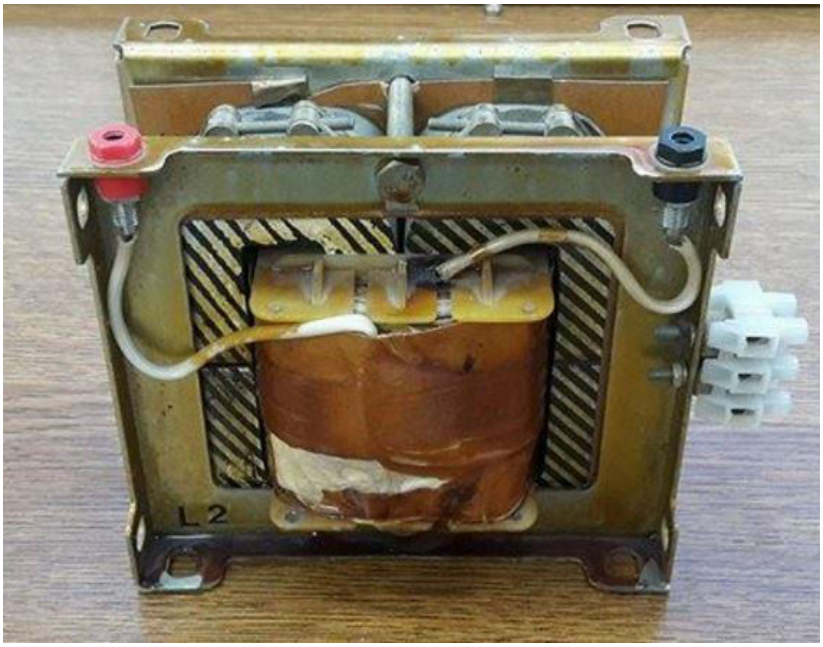
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \tag{3-2}$$

Dakle, struja kasni za osnovnim harmonikom napona za kut φ. Prema izrazu (3-2), i vrijednostima ukupnog otpora i induktiviteta, kut φ iznosi 9,79°. Vremenska konstanta odnosno fazni pomak ovog trošila ne odgovaraju karakteristikama tipičnih trošila u primjeni (transformatori, asinkroni motori...).

3.2.2. Korištenje vanjskog trošila za prikaz rada neupravljivog naponskog izmjenjivača

Da bi valni oblik struje bio tipičan za trošila iz primjene i vremenska konstanta izraženija, fazni pomak φ treba povećati, što znači da se mora koristiti drugo, vanjsko trošilo kod kojeg bi kut φ između osnovnog harmonika napona i osnovnog harmonika struje bio izraženiji.

Trošilo koje daje takav fazni pomak φ, ima vrijednosti otpora $R = 19\Omega$ i induktiviteta $L = 165mH$. Sastoji se od dvije paralelno spojene prigušnice prikazane na slici 3.14., i njima u seriju spojen otpornik sa eksperimentalne kartice, iznosa $R = 18\Omega$



Slika 3.14. *Prigušnica, R=2Ω, L=330mH*

S novim trošilom fazni pomak iznosi $\varphi = 69{,}86º$, a dobiven je na slijedeći način. Dvije prigušnice spojene paralelno imaju vrijednosti $L = 165mH\ i\ R = 1\Omega$. Najmanji otpor koji se može uzeti s eksperimentalne kartice iznosi $R = 18\Omega$, a dobije se spajanjem dva otpornika (od kojih svaki ima vrijednost $R = 36\Omega$ paralelno. Spajanjem paralelnog spoja prigušnica i paralelnog spoja otpornika sa kartice u seriju dobiva se navedeni fazni pomak.

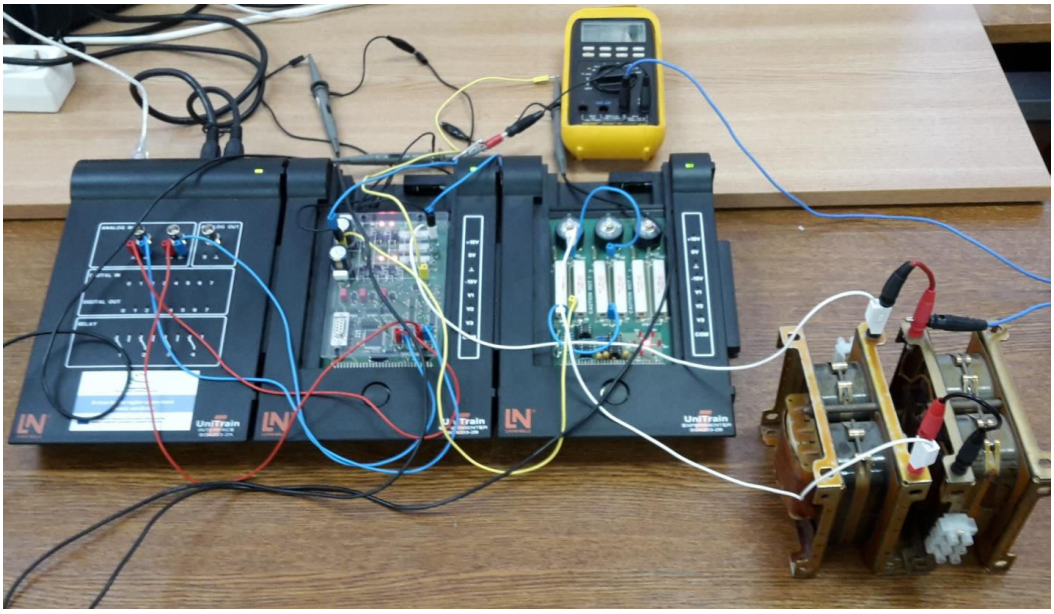
$$X_L = \omega L = 314 \cdot 165[mH] = 51{,}81\Omega \tag{3-3}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\frac{X_L}{R} = \tan^{-1}\frac{51{,}81[\Omega]}{19[\Omega]} = 69{,}86° \tag{3-4}$$

S ovim vrijednostima otpora i induktiviteta vremenska konstanta je izraženija, a iznosi:

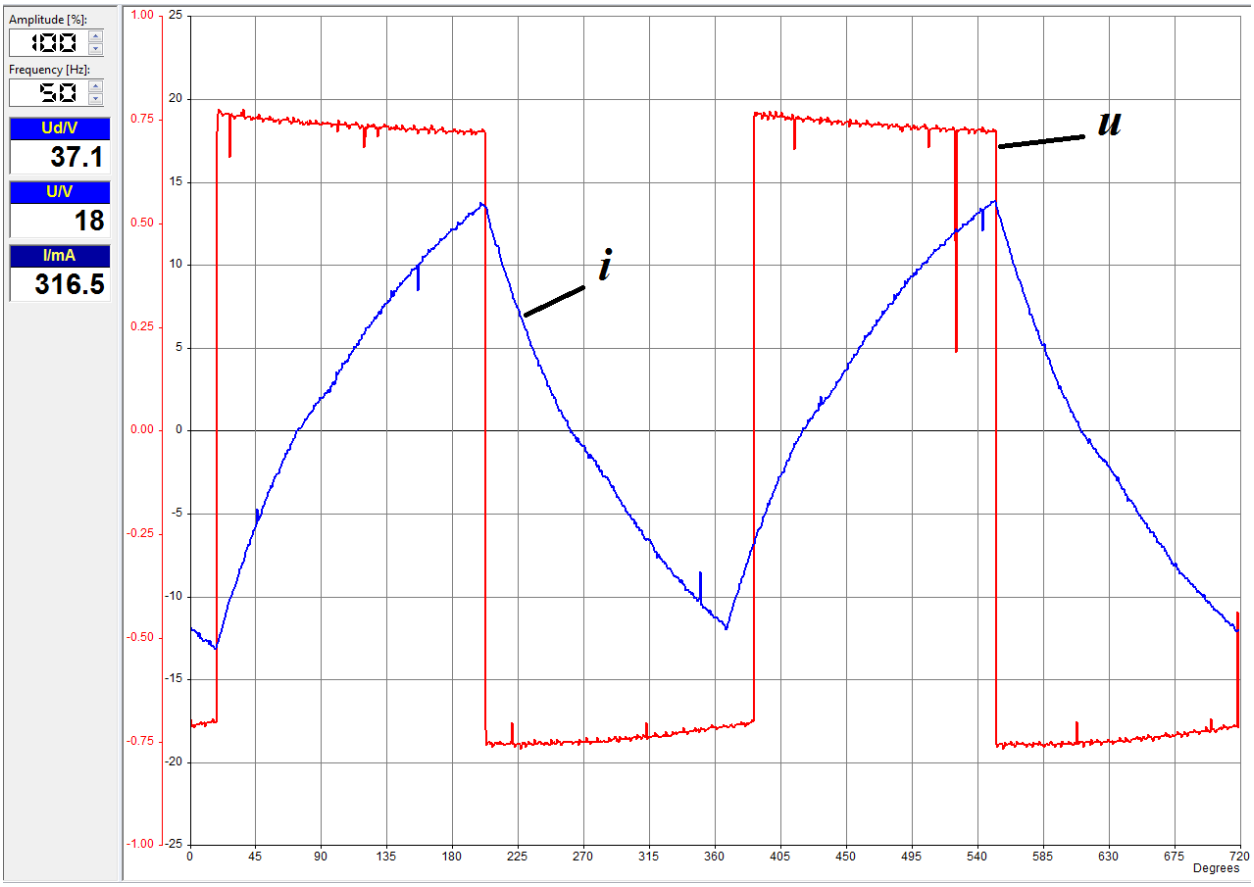
$$\tau = \frac{165mH}{19\Omega} = 8{,}68ms$$

Trošilo spojeno s opremom Lucas Nuelle izgleda ovako:



Slika 3.15. *Prikaz spoja vanjskog trošila sa opremom Lucas Nuelle*

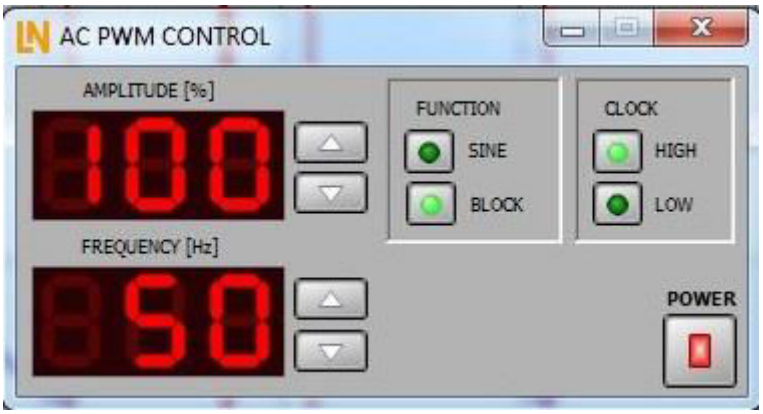
S ovakvim trošilom izlazne vrijednosti struje i napona u vremenskom dijagramu su:



Slika 3.16. *Valni oblici struje i napona neupravljivog naponskog izmjenjivača(φ=70º)*

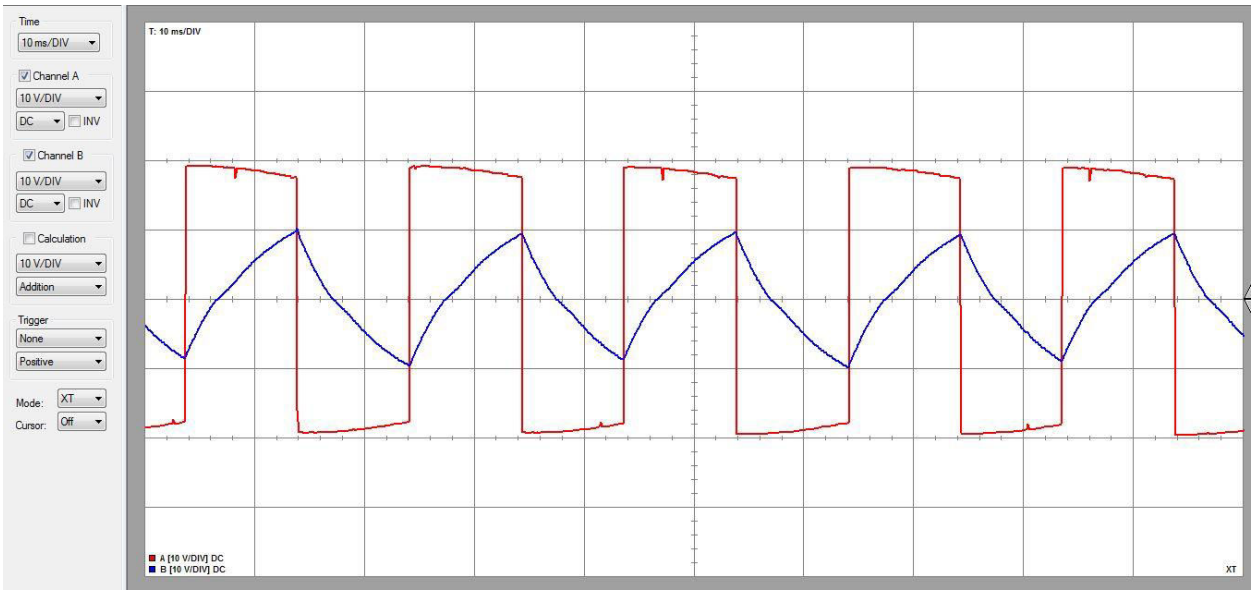
Na slici 3.16. može se primjetiti kako je veći fazni pomak struje za naponom u odnosu na sliku 3.12. Također se može primjetiti kako ovaj valni oblik struje odgovara valnom obliku struje koji se nalazi na slici 2.3. u poglavlju u kojem je opisana teorija rada neupravljivog naponskog izmjenjivača.

Valni oblicu stuje i napona neupravljivog naponskog izmjenjivača, umjesto u vremenskom dijagramu, mogu se u programu LabSoft prikazati i pomoću osciloskopa. To se radi tako da se stezaljke analognog ulaza (A+,A-,B+B-) spajaju u seriju odnosno paralelu s trošilom. U postavkama osciloskopa amplituda se namješta na 100, a frekvencija na 50Hz, kako je prikazano na slici 3.17.



Slika 3.17. *Postavke osciloskopa*

Kada se program pokrene i klikne na ikonu  (osciloskop) dobije se drugačiji način prikaza valnih oblika.



Slika 3.18. *Valni oblici struje i napona prikazani pomoću osciloskopa*

Sa slike 3.18. može se primjetiti kako su to valni oblici isti kao i na slici 3.16. Na lijevoj strani moguće je mjenjati t/ds odnosno V/ds, što je karakteristično za svaki osciloskop.

3.2.3.Ukupno harmonijsko izobličenje

Ukupno harmonijsko izobličenje (THD) ili *engl.* total harmonic distortion, je mjera koja označava sadržaj harmonika. Smanjivanje THD-a je jedan od bitnijih problema u projektiranju izmjenjivača. Smanjivanje ukupnog harmonijskog izobličenja bitno je jer harmonici smanjuju faktor snage na izmjeničnim priključcima, izvor su smetnje za upravljačke sklopove i druge uređaje, a kod motora harmonici mogu pobuditi mehaničke rezonancije i uzrokovati akustičku buku trošila. Ukupno haromonijsko izobličenje kod neupravljivog naponskog izmjenjivača izračunato je pomoću vrijednosti koje su dobivene korištenjem analizatora snage spojenog na osnovnu shemu spoja prikazanog na slici 3.15.

Analizator snage pomoću kojeg su dobivene vrijednosti THD-a je uređaj Lem Norma 4000. To je moderan, visoko precizan i višefunkcijski analizator. Lem Norma serija uključuje najnovije tehnologije mjerenja snage koje uvelike pomažu inženjerima pri raznim ispitivanjima elektromotora, frekvencijskih pretvarača, rasvjete, napajanja, transformatora i dijelova u suvremenoj automobilskoj industriji, kako bi bili što učinkovitiji. Uređaj je prikazan na slici 3.19.

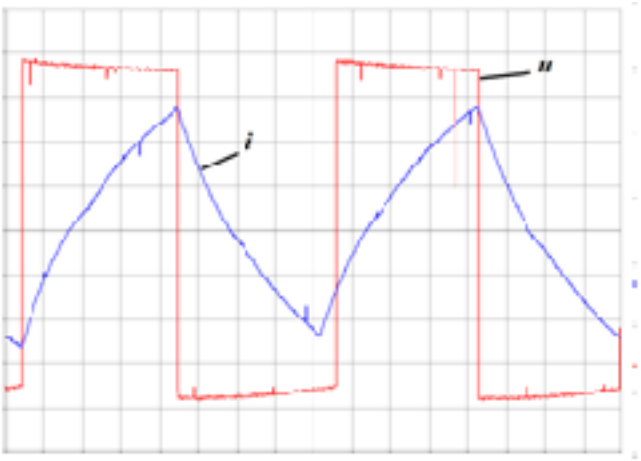


Slika 3.19. *Analizator snage Lem Norma 4000*

Vrijednosti koje su bile potrebne za izračun THD-a dobivene pomoću ovog analizatora prikazne su u tablici na slici 3.20. a), pokraj koje je prikazan valni oblik struje i napona.

Harmonik broj:	Napon[%]	Struja[%]
osnovni(1.)	100,00	100,00
3.	33,00	14,30
5.	19,70	5,40
7.	14,10	2,00
9.	11,00	1,90
11.	8,90	1,00
13.	7,40	0,80
15.	6,50	0,60

a)



b)

Slika 3.20. *a) Vrijednosti osnovnog i viših harmonika napona i struje u postocima; b)Prikaz valnih oblika struje i napona*

Osnovni izraz za ukupno harmonijsko izobličenje napona je:

$$THDU = \sqrt{\frac{U^2}{U^2(1)} - 1} \qquad (3-5)$$

THDU i THDI su izračunati pomoću vrijednosti iz tablice prema izrazima (3-6) i (3-7)

$$THDU = \frac{\sqrt{{U_3}^2 + {U_5}^2 + {U_7}^2 + {U_9}^2 + {U_{11}}^2 + {U_{13}}^2 + {U_{15}}^2}}{U_1} \cdot 100\% \qquad (3-6)$$

$$THDU = \frac{\sqrt{33^2 + 19{,}7^2 + 14{,}1^2 + 11^2 + 8{,}9^2 + 7{,}4^2 + 6{,}5^2}}{100} \cdot 100\%$$

$$THDU = 44{,}40\%$$

$$THDI = \frac{\sqrt{{I_3}^2 + {I_5}^2 + {I_7}^2 + {I_9}^2 + {I_{11}}^2 + {I_{13}}^2 + {I_{15}}^2}}{I_1} \cdot 100\% \qquad (3-7)$$

$$THDI = \frac{\sqrt{14{,}3^2 + 5{,}4^2 + 2^2 + 1{,}90^2 + 1^2 + 0{,}8^2 + 0{,}6}}{100} \cdot 100\%$$

$$THDI = 15{,}6\%$$

Vrijednosti THDU I THDI nisu povoljne što je vidljivo iz izračuna. U tablici se vidi kako dominiraju treći i peti harmonik, što znači da se moraju koristiti filtri. U praksi je poznato kako ovako upravljani naponski izmjenjivač nije prikladan za induktivna trošila. Dio induktivnih trošila (asinkroni motori) imaju izražene oscilatorne momente i buku, stoga je potrebno uvesti različite modulacije za uklanjanje harmonika koje su prikazane u slijedećem poglavlju.

4. SMANJIVANJE UKUPNOG HARMONIJSKOG IZOBLIČENJA

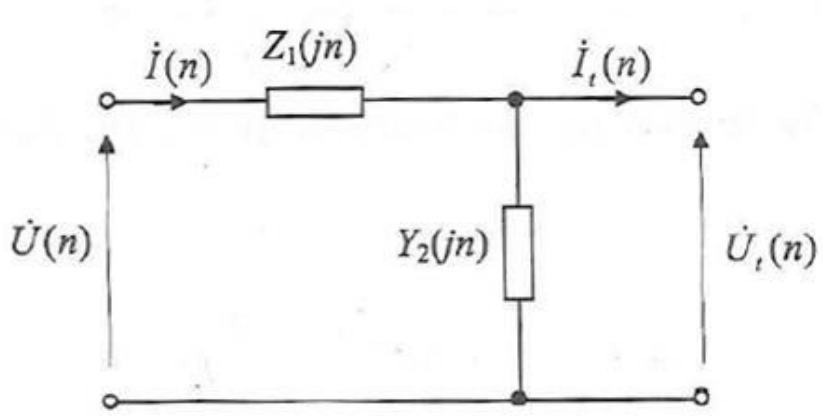
4.1. Smanjivanje THD-a napona trošila

Izlazni napon izmjenjivača (napon trošila) nije sinusan. Sadrži više harmonike koji uzrokuju više harmonike u struji trošila. Napaja li izmjenjivač transformatore i/ili izmjenične motore stvaraju se, zbog toga, u bakru kao i u željezu ovih trošila dodatni gubici. Oni uzrokuju dodatno povećanje nadtemperature trošila što izravno utječe na smanjenje njihove životne dobi i pouzdanosti. Također, viši harmonici struje uuzrokuju dodatne gubitke u svim energetskim komponentama do trošila, vodičima, sklopnim aparatima, osiguračima i dr. Osim dodatnih gubitaka posebno je neželjena posljedica postojanja viših harmonika ometanje ispravnog rada ne samo druge, blisko smještene opreme nego i ispravnog rada elektroničkih sklopova vlastitog izmjenjivača.[1]

Zbog toga je nužno smanjiti amplitude viših harmonika struje trošila. Postoje dva osnovna načina njihovog smanjivanja. Prvi način je da se amplitude viših harmonika struje trošila smanjuju smanjivanjem amplitude viših harmonika napona trošila. Drugi se način primjenjuje ako je trošilo radno-induktivno, što i jest u svim važnim primjenama. Odabirom prikladnog načina upravljanja najveći se, po amplitudi, viši harmonici izlaznog napona izmjenjivača „potisnu“ što je moguće dalje od osnovnog harmonika. Radno-induktivno trošilo ponaša se kao niskopropusni filtar pa amplitude viših harmonika struje trošila mogu biti znatno smanjene.[1]

4.1.1 Reaktivni filtri

Amplitude viših harmonika napona trošila napajanih iz izmjenjivača mogu se smanjiti ako se između izmjenjivača i trošila ugrade reaktivni filtri (izlazni filtri). U najjednostavnijem se slučaju reaktivni filtri sastoje od jedne uzdužne grane, impedancije $Z_1(jn)$ na n-tom harmoniku, te jedne poprečne grane, admitancije $Y_2(jn)$ na n-tom harmoniku, kako je i prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1. *Nadomjesna shema spoja reaktivnog filtra na n-tom harmoniku*

Od idealnog reaktivnog filtra očekuje se da bez slabljenja propusti osnovni harmonik izlaznog napona izmjenjivača, tj. da izraženo u efektivnim vrijednostima bude $U_t(1) = U(1)$, odnosno da ne propusti niti jedan viši harmonik, tj. da je $U_t(n) = 0, \ \forall n > 1$.

U skladu s ovim zahtjevima, od četiri osnovne vrste filtara (niskopropusni, visokopropusni, pojasnopropusni i pojasna brana) u obzir dolaze samo dvije vrste: pojasnopropusni, i niskopropusni filtar.

Uzima se u obzir još da se komponente rekativnih filtara (prigušnice, kondenzatori) odabiru s fiksnim vrijednostima induktivnosti i kapacitivnosti. To znači da će se ugradnjom pojasnopropusnog filtra maksimalno moguće propuštanje postići na samo jednoj frekvenciji. Analogno tome, ugradnjom niskopropusnog filtra postojat će samo jedna granična frekvencija filtra. Posljedice toga su očigledne. Pojasno propusni filtar moći će se upotrebljavati djelotvorno za smanjivanje amplituda viših harmonika napona samo u izmjenjivačima fiksne frekvencije rada. U svim drugim primjenama primjenit će se samo niskopropusni filtri.[1]

4.1.2. Uklanjanje pojedinih harmonika iz izlaznog napona izmjenjivača

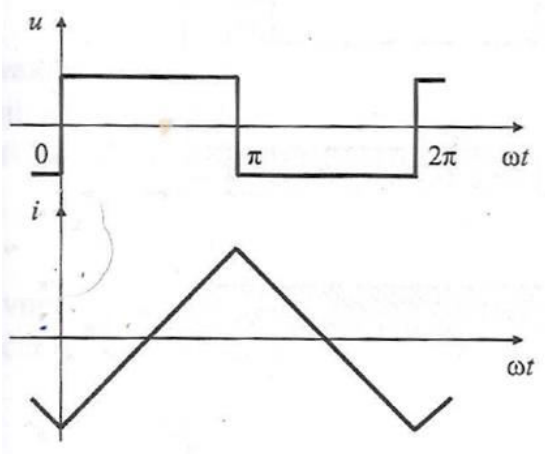
Reaktivni filtri se danas rijetko uptrebljavaju za smanjenje ukupne harmoničke distorzije napona trošila. Osnovni razlog jest u tome što je primjena reaktivnih filtara ograničena samo na napajanje linearnih vremenski nepromjenjivih trošila, a njihov se broj u odnosu na nelinearna i vremenski promjenjiva trošila stalno smanjuje. Osim toga fizičke dimenzije, masa i cijena reaktivnih filtara imaju najveći utjecaj na fizičke dimenzije, masu i cijenu fazno upravljanih izmjenjivača. Čine ih glomaznim, teškim i skupim, te se njihova upotreba izbjegava kad god je to moguće i u slučajevima napajanja linearnih vremenski nepromjenjivih trošila.[1]

Postoji i druga mogućnost smanjenja ukupne harmoničke distorzije napona trošila, a to je da se odabirom kutova upravljanja izmjenjivača iz izlaznog napona uklone pojedini harmonici. Izraz za efektivnu vrijednost *n*-tog harmonika izlaznog napona izmjenjivača je:

$$U(n) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \frac{\cos n\alpha}{n} \quad ; \quad n = 1,3,5,\ldots \qquad (4-1)$$

Najvažnije je ukloniti po iznosu najveće harmonike, a to su treći i peti harmonik. Treći harmonik kao i njegovi višekratnici ovim načinom se uklanja ako se odabere kut upravljanja $\alpha = \pi/6$

Ukupna harmonička distorzija struje trošila THDI ovisi o kutu trošila φ. Najveća je i jednaka ukupnoj harmoničkoj distorziji napona ako je trošilo radno ($\varphi = 0$), a najmanja ako je trošilo čisto induktivno ($\varphi = \pi/2$). Primjer napona i struje čisto induktivnog trošila izgleda kao na slici 4.2.



Slika 4.2. *Valni oblik napona i struje induktivnog trošila* ($\varphi = \pi/2\,, \alpha = 0$)

Postoje i dva nedostatka ovog načina smanjivanja ukupne harmoničke distorzije. Prvi nedostatak je da fiksiranjem kuta upravljanja upravljivi izmjenjivač postaje neupravljiv. Promjena efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila $U(1)$ ostvariva je u ovom slučaju samo promjenom napona istosmjernog izvora *E*. Drugi nedostatak ovog postupka je da fiksiranjem kuta upravljanjana $\alpha = \pi/6$ ektivna vrijednost osnovnog harmonika napona trošila smanjena je u odnosu na efektivnu vrijednost osnovnog harmonika napona pri pravokutnom izmjeničnom naponu.[1]

4.2. Pulsno-širinska modulacija

Prednost uklanjanja izmjenjivača pojedinih harmonika iz izlaznog napona izmjenjivača u odnosu na upotrebu reaktivnih filtara sa svrhom da se smanji ukupna harmonička distorzija struje trošila su očigledne. No, kutovi su upravljanja u tom slučaju fiksirani te je izmjenjivač neupravljiv. S druge strane, posebno u izmjeničnim elektromotornim pogonima, bitna je upravljivost izmjenjivača. Obično se ne zahtjeva samo promjena frekvencije trošila f nego i efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila $U(1)$. Ovom je zahtjevu lako udovoljiti upotrebe li se lančani spojevi istosmjernih pretvarača i neupravljivih izmjenjivača odnosno fazno upravljanih upravljača i neupravljivih izmjenjivača. No, to nisu jeftina rješenja. Potrebno je pronaći i druge načine smanjenja ukupne harmoničke distorzije struje trošila uz zadržanu upravljivost izmjenjivača.

U razmatranjima se treba ograničiti na najvažniju primjenu. To su izmjenični elektromotorni pogoni kod kojih se trošilo može promatrati kao radno-indiktivno trošilo. S obzirom na više harmonike struje, radno-induktivno trošilo ponaša se kao niskopropusni filtar. Pri nepromijenjenoj efektivnoj vrijednosti kojeg višeg harmonika napona trošila $U(n)$, efektivna će vrijednost struje trošila tog harmonika $I(n)$ biti to manja što je frekvencija tog harmonika veća. Može se zaključiti da bi trebalo pronaći takav način upravljanja izmjenjivačem kod kojeg bi po iznosu najznačajniji harmonici napona trošila bili u cijelom opsegu upravljanja frekvencijski odmaknuti što je moguće dalje od osnovnog harmonika napona. Time bi se ukupna harmonička distorzija struje trošila mogla smanjiti na željenu vrijednost a da se ne žrtvuje upravljivost izmjenjivača.[1]

Pulsno-širinskom modulacijom moguće je mijenjati amplitudu izlaznog napona izmjenjivača i to tako da se izmjenjivačem mijenjaju voltsekunde narinute na trošilo po nekom unaprijed utvrđenom zakonu. Najveća vrijednost amplitude odgovara amplitudi neupravljivog naponskog izmjenjivača.

Eksperimentalna kartica *Lucas Nuelle* za jednofazne izmjenjivače ima dvije programirane modulacije: pravokutnu i sinusnu modulaciju. Valni oblici struje i napona dobiveni pravokutnom modulacijom prikazani su u 3. poglavlju (slika 3.12. i slika 3.16.) Kod pulsno-širinske sinusne modulacije, voltsekunde se mijenjaju po sinusnom zakonu. U telekomunikacijama se uobičajeno svaki proces utiskivanja signala niske ili modulacijske frekvencije f_m u signal visoke ili prijenosne frekvencije f_0 naziva modulacijom.[1] Ukoliko se navedeni pojmovi primijene na autonomne izmjenjivače, pojam modulacijske frekvencije odnosit će se na frekvenciju trošila $f_m = f = 1/T$, a pojam prijenosne frekvencije odgovarat će frekvenciji sklapanja $f_0 = f_s = 1/T_0$ ukoliko je modulirano trajanje vođenja svih upravljivih ventila izmjenjivača, ili je dvostruko manja od nje, $f_0 = f_s/2$ ukoliko je modulirano trajanje vođenja upravljivih ventila jedne grane izmjenjivača.

Faktor koji se računa prema izrazu:

$$m_f = \frac{f_0}{f} \tag{4-2}$$

zove se modulacijski omjer frekvencija i to u posebnom slučaju kada je $f_0 = f_s$.

Faktor

$$0 \leq m_a \leq 1$$

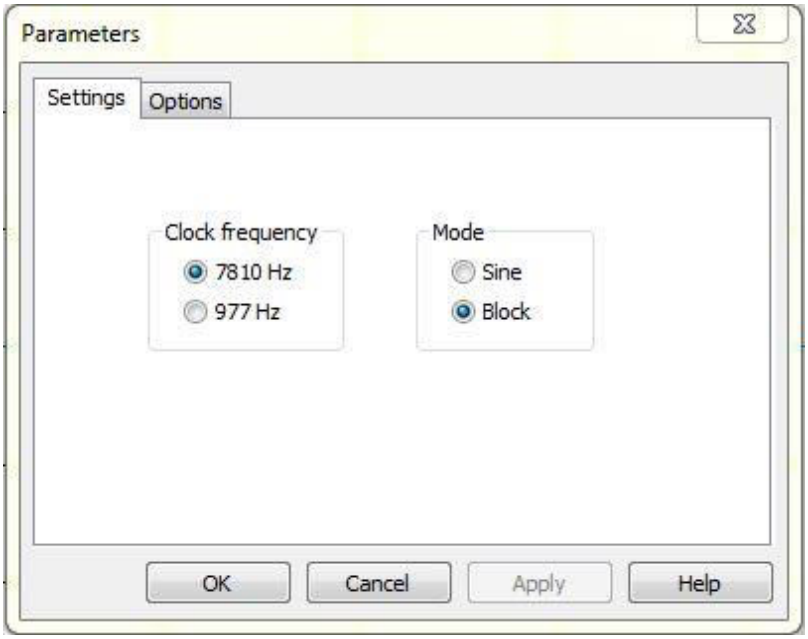
Naziva se modulacijski indeks ili dubina modulacije.

Ukoliko je modulacijski omjer frekvencija cjelobrojni umnožak frekvencije osnovnog harmonika, tada se govori o sinkronoj modulaciji. Ovdje se frekvencija rada *f* mijenja zajedno s prijenosnom frekvencijom f_0, tako da je u svim ustaljenim stanjima modulacijski omjer frekvencija cijeli broj. Ukoliko to nije slučaj, govori se od asinkronoj modulaciji. Kod asinkrone modulacije u trošilu se javljaju subharmonici. Ovi subharmonici, iako malih amplituda, mogu uzrokovati strujna preopterećenja. Zato se u radno-induktivnim trošilima češće upotrebljava sinkrona modulacija [1].

U slijedećoj vježbi je prikazana pulsno-širinska modulacija pomoću opreme *Lucas Nuelle*.

4.2.1. Snimanje valnih oblika struje i napona pravokutne pulsno-širinske modulacije

U ovoj vježbi biti će prikazani valni oblici struje i napona pravokutne pulsno-širinske modulacije pri dvije različite sklopne frekvencije f_s, odnosno pri dva različita modulacijska omjera frekvencija m_f, i različitim amplitudama izlaznog napona izmjenjivača. U programu *LabSoft* moguće je mjenjati sklopnu frekvenciju klikom na dugme (*Device Settings*) te na karticu *Settings*, kako je prikazano na slici 4.3.



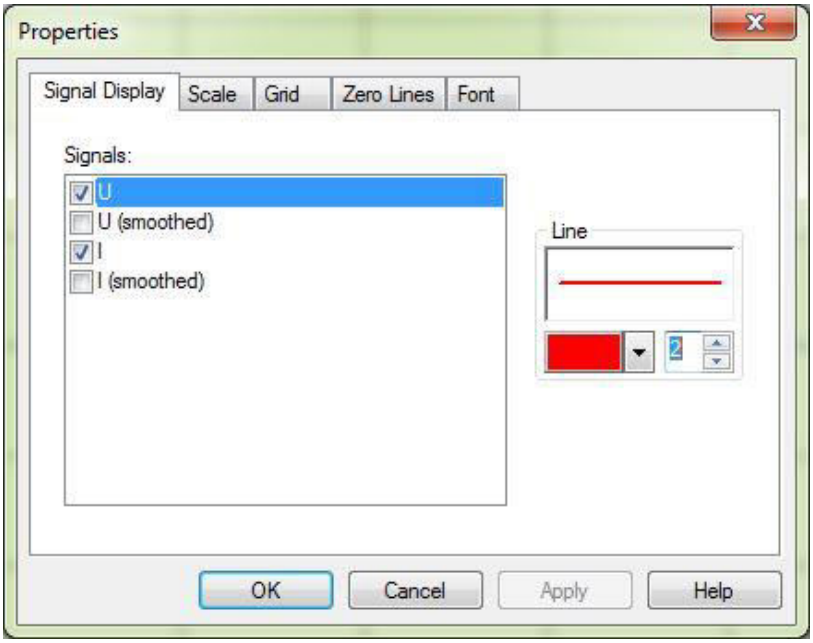
Slika 4.3. *Sklopne frekvencije*

Na slici je vidljivo da se mogu odabrati dvije sklopne frekvencije: 7810 Hz i 977 Hz. Izlaznu frekvenciju izmjenjivača f također je moguće mijenjati i to od 0 do 100 Hz. U ovoj vježbi izlazna frekvencija namještena je na 50 Hz i nije mijenjana. Kod pravokutne modulacije izbornik ostaje na opciji „*Block*“ kao i na slici. Modulacijski omjeri frekvencija u ovoj vježbi prema izrazu (4-2) iznose:

$$m_{f1} = \frac{f_{s1}}{f} = \frac{977Hz}{50Hz} = 19{,}54$$

$$m_{f2} = \frac{f_{s2}}{f} = \frac{7810Hz}{50Hz} = 156{,}2$$

Spoj za prikaz ovih valnih oblika isti je kao i kod neupravljivog izmjenjivača sa dodatnim trošilom (prigušnicom), slika 3.15. Pritiskom na dugme  automatski se učitava radni prostor, sve vrijednosti namještaju se kako je prikazano u tablici 4.1. Sklopna frekvencija postavlja se na 977Hz tj. nižu, amplituda na 75% i izlazna frekvencija na 50Hz. U programu postoje i mogućnosti za prikaz valnih oblika i usrednjenih valnih oblika struje i napona, a moguće je izabrati desnim klikom miša na radnoj površini te klikom na *Settings*. Za ovaj slučaj izabrat će se napon i struja kao na slici 4.4. U(*smoothed*) i I(*smoothed*) označavaju usrednjene vrijednosti.

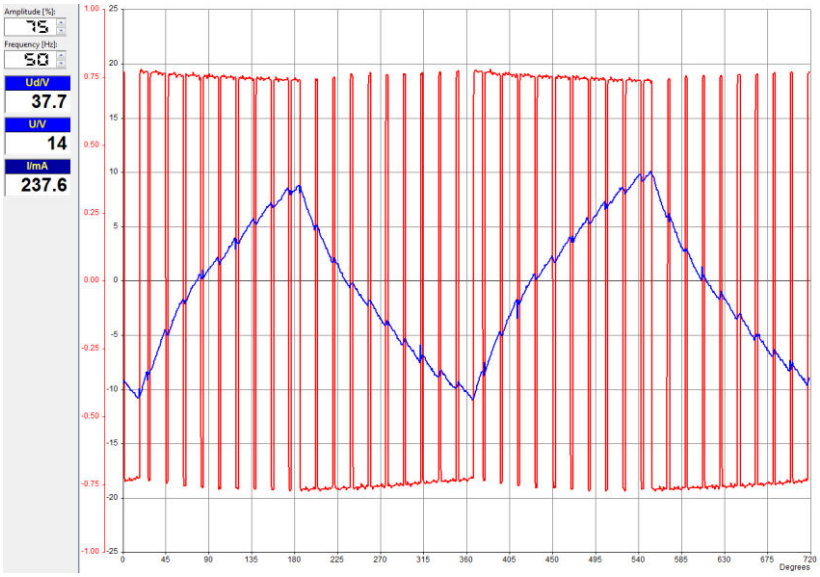


Slika 4.4. *Izbornik za prikaz napona i struje*

Tablica 4.1. *Postavke jednofaznog naponskog izmjenjivača s radno-induktivnim opterećenjem i pulsno-širinskom modulacijom*

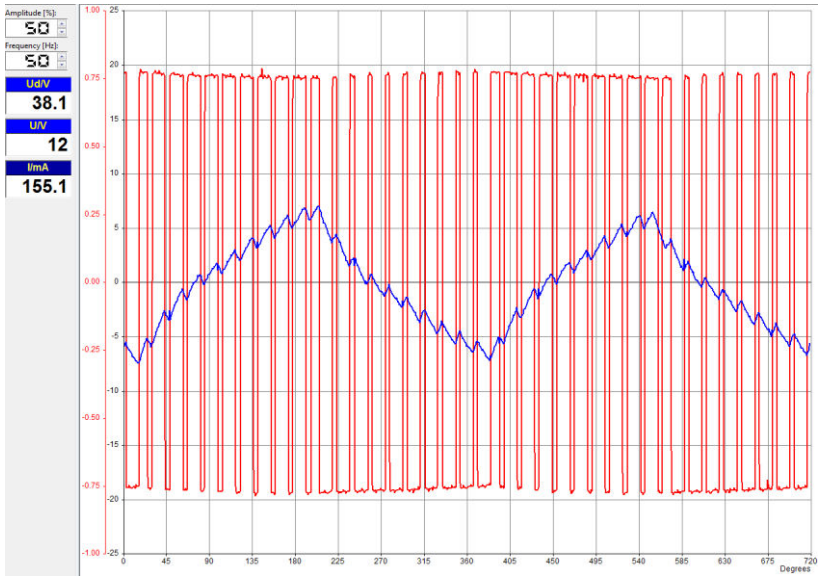
Alat:	 Vremenski dijagram – jednokvadrantni istosmjerni „low-side“ pretvarač
Opterećenje:	Radno-induktivno
Osnovna frekvencija:	50 Hz
Mjerenja:	Izlazni napon i struja
Frekvencija sklapanja:	977 Hz, $m_f = 19{,}54$
Amplituda:	75%

Pokretanjem mjerenja dobiju se oblici struje i napona:



Slika 4.5. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača, amplituda* 75 *%, frekvencija* 50 Hz*, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija* 977 Hz*, pravouktna modulacija*

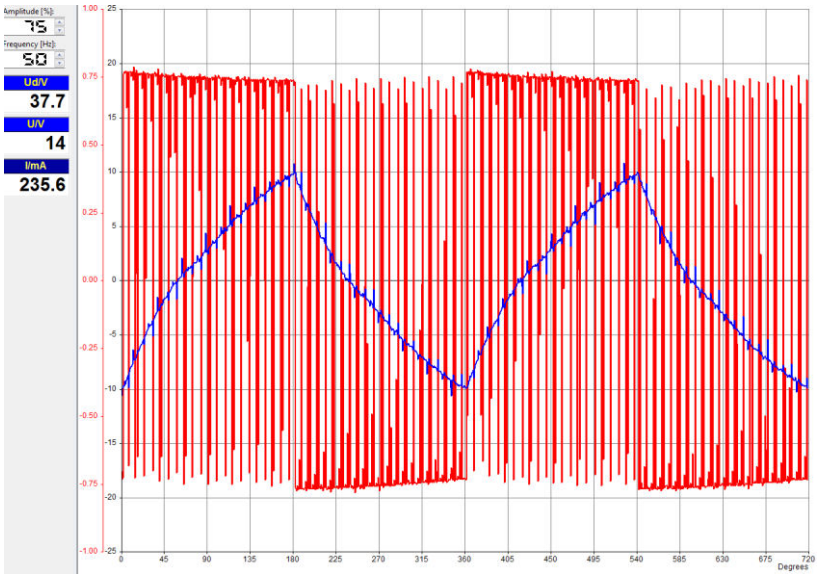
Na slici se može primjetiti kako smanjenjem amplitude u odnosu na neupravljivi izmjenjivač, na 75%, izlazna struja se smanjila sa $315{,}5mA$ na $237{,}6mA$ i efektivna vrijednost napona osnovnog harmonika U/V se smanjila sa $18V$ na $14V$. U slijedećem postupku amplituda je sa 75% smanjena na 50%, pokretanjem mjerenja dobiva se slijedeća slika:



Slika 4.6. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača, amplituda* 50 *%, frekvencija* 50 *Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija* 977 *Hz, pravokutna modulacija*

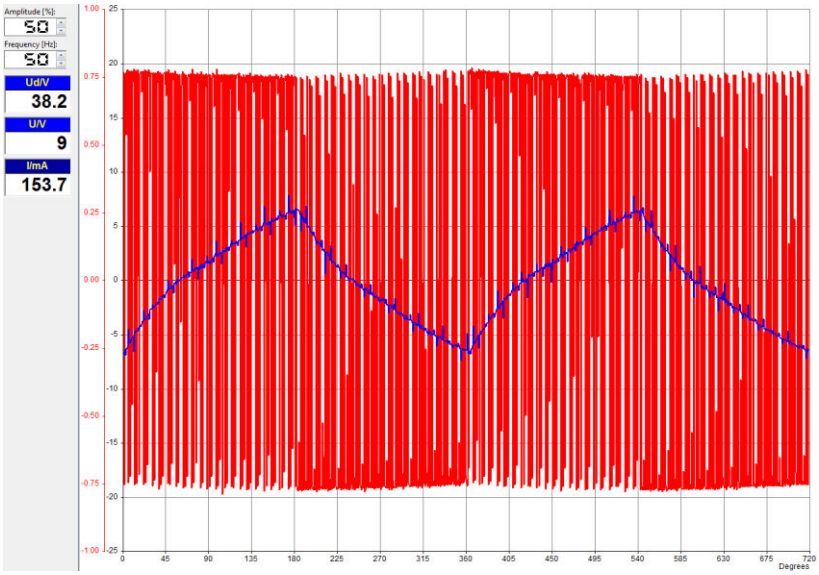
Mjerenjem je ustanovljeno da je pulsno-širinskom modulacijom moguće mijenjati amplitudu izlaznog napona. Uspoređujući sliku 4.5. i sliku 4.6. može se vidjeti način upravljanja pulsno-širinskom modulacijom. Ukoliko se promatra prva polovica periode, može se vidjeti da je razlika između narinutih pozitivnih i negativnih voltsekundi veća kod amplitude 75%, što u konačnici daje i veći napon. Može se primjetiti kako je na slici 4.6. efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona manja $U = 12V$, a tako i izlazna struja izmjenjivača $I = 155{,}1mA$.

Slika 4.5. i 4.6. su prikaz valnih oblika struje i napona pri nižoj sklopnoj frekvenciji naponskog izmjenjivača $f_{s1} = 977Hz$, odnosno pri nižem modulacijskom omjeru frekvencija m_f. Na slijedećim slikama biti će prikazani valni oblici struje i napona jednofaznog naponskog izmjenjivača (pravokutna modulacija) pri višoj sklopnoj frekvenciji f_s.



Slika 4.7. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača, amplituda 75 %, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810 Hz, pravokutna modulacija*

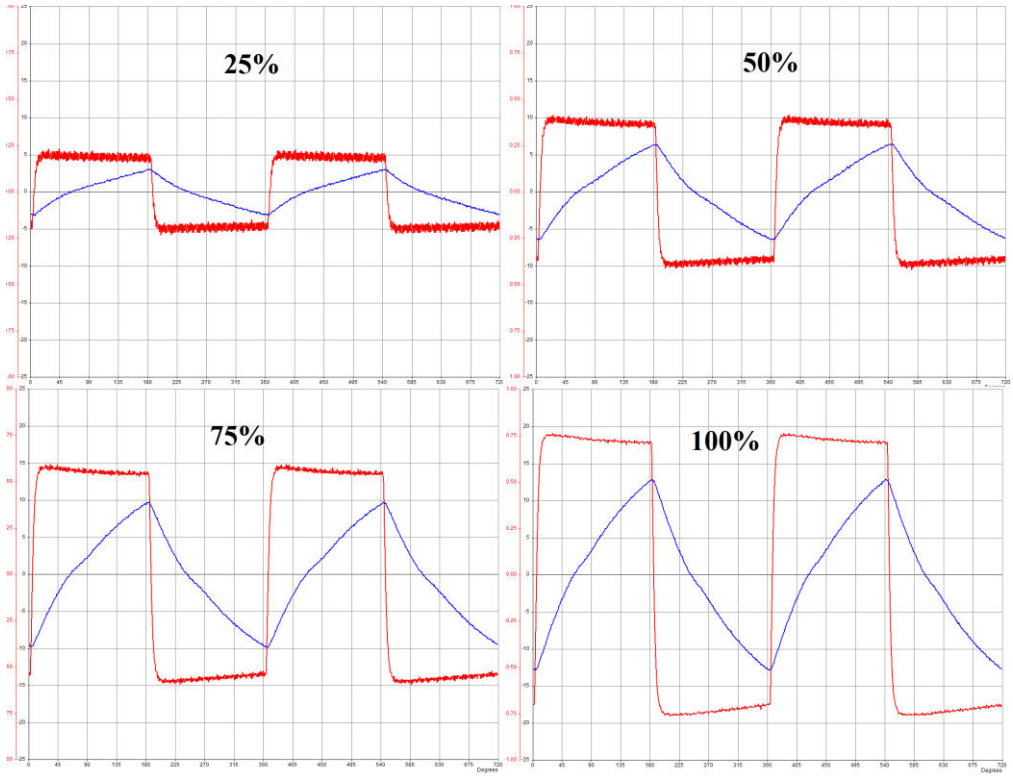
Na slici 4.7. prikazani su valni oblici struje i napona pri višoj sklopnoj frekevenciji te pri amplitudi 75%. U usporedbi s valnim oblicima sa slike 4.5. gdje je bila ista amplituda, ali niža sklopna frekvencija, moguće je primjetiti kako m_f odnosno f_s pri amplitudi 75% ne utječu na promjenu vrijednosti napona i struje.



Slika 4.8. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača, amplituda 50 %, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810 Hz, pravokutna modulacija*

Slika 4.8. prikazuje valne oblike struje i napona pri višoj sklopnoj frekvenciji i pri amplitudi 50%. Kao i kod usporedbe slika 4.5. i 4.6. može se vidjeti kako se smanjenjem amplitude i pri višoj sklopnoj frekvenciji smanjuje efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona, a tako i izlazna struja. Uspoređujući ovu sliku i sliku 4.6. može se zaključiti kako je utjecaj sklopne frekvencije na vrijednostima struje i napona trošila veći pri amplitudi 50% nego pri amplitudi 75%. Efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona pri amplitudi 50% smanjila se za 3V u odnosu na napon pri amplitudi 75%. Izlazna struja također se smanjila, ali neznatno.

Pri amplitudi 25% efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona kod više sklopne frekvencije bila je duplo manja u odnosu tu vrijednost pri nižoj f_s, što znači da je kod nižih amplituda utjecaj sklopne frekvencije na napon trošila puno veći.



Slika 4.9. *Usrednjeni valni oblici struje i napona izmjenjivača, amplitude (25%, 50%, 75%,i 100%), frekvencija* 50 Hz*, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810 Hz, pravokutna modulacija*

Na slici 4.9. prikazani su usrednjeni valni oblici napona i struja pri 4 različite amplitude. Prikaz ovih valnih oblika dobije se odabirom „U (smoothed)“ i „I (smoothed)“ slika 4.4.

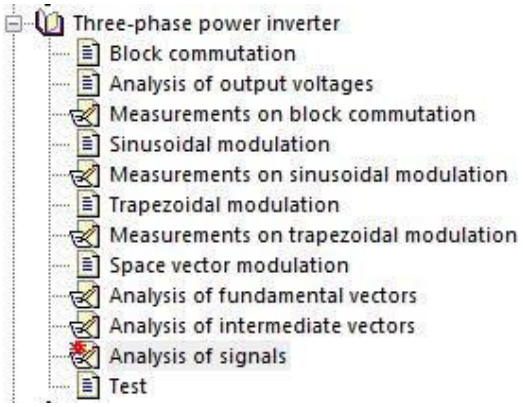
Izračunata srednja vrijednost odnosi se na jedan trenutak i mijenja se od trenutka do trenutka, a naziva se trenutačna srednja vrijednost. Dobiveni valni oblik trenutačne srednje vrijednosti naziva se usrednjeni valni oblik i sporo se mijenja od periode do periode. Postoje dva razloga zbog kojih se koristi usrednjeni valni oblik. Prvi je razlog da se jednofaznim izmjenjivačem regulira srednja vrijednost izlaznog napona, a ne trenutačna vrijednost. Drugi je razlog: usrednjeni se valni oblici za tu vrstu strujnih krugova lakše izračunavaju ili simuliraju nego trenutačni valni oblici ako se uporabe usrednjeni modeli

U slijedećoj vježbi biti će prikazan frekvencijski spektar pravokutno puslno-širinske modulacije i način izračuna THD-a za ovu vrstu modulacije.

4.2.2. Frekvencijski spektar i mjerenje THD-a pravokutne modulacije

Kod neupravljivog naponskog izmjenivča, vrijednosti THD-a mjerene su pomoću analizatora snage. Pri pulno-širinskoj modulaciji pojavljuju se viši harmonici reda m_f, a to valni analizator više ne može tablično prikazati. Iz tog razloga frekvencijski spektar a time i vrijednosti THD-a prikazani su pomoću programa *LabSoft*. „AC converter“ iz izbornika nema mogućnost mjerenja THD-a i prikaz frekvencijskog spektra, zato se odabire „Three-phase power inverter“ kako je prikazano na slici 4.10.

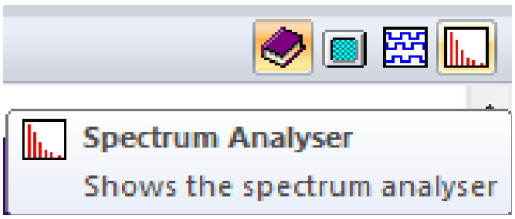
Ovim trofaznim izmjenjivačem bit će prikazane prave vrijednosti koje su potrebne , jer on u ovom slučaju prikazuje samo jednu fazu na koju je spojeno trošilo, što i odgovara jednofaznom naponskom izmjenjivaču.



Slika 4.10. *Trofazni naponski izmjenjivač*

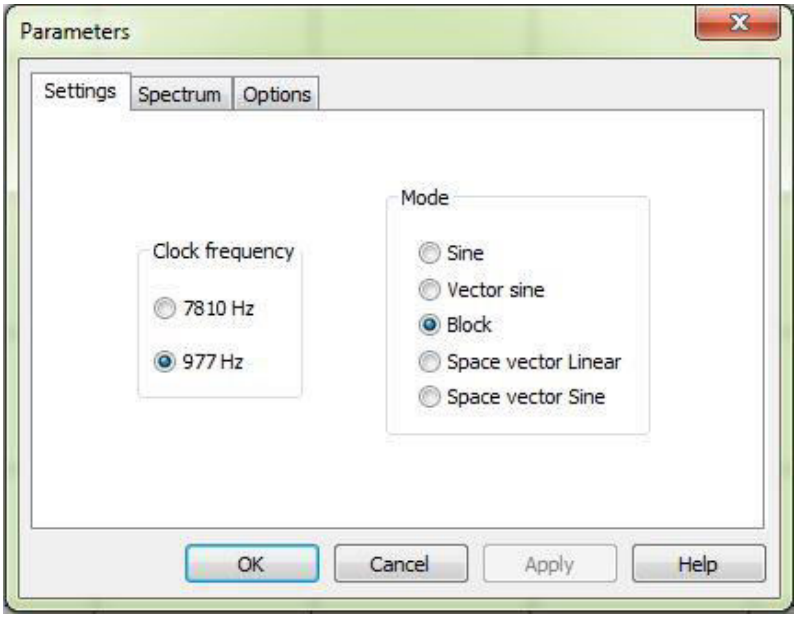
Nakon odabira „Three-phase power inverter“ odabire se jedna od vježbi ovog izmjenjivača te nakon toga u gornjem desnom kutu pritisne se gumb 

(*Spectrum Analyser)* slika 4.11.



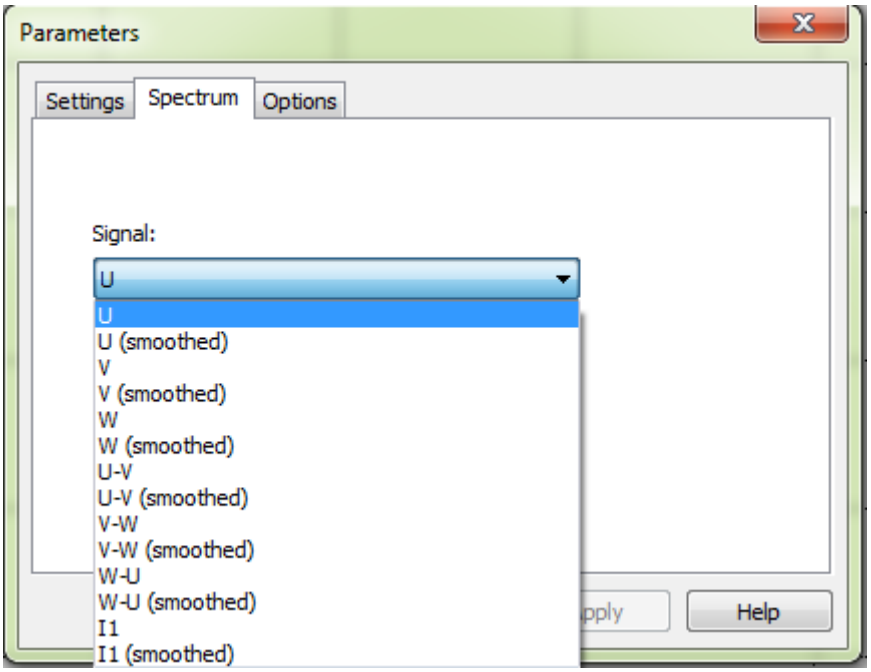
Slika 4.11. *Spektralni analizator*

Nakon odabira *Spectrum Analyser* u otvorenom prozoru moguće je mijenjati više parametara. Klikom na  (*Device Settings*) otvara se prozor:



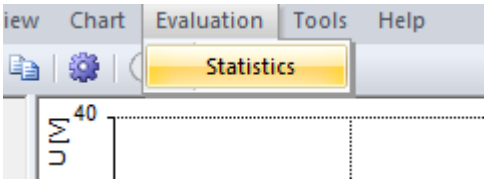
Slika 4.12. *Prozor za promjenu sklopne frekvencije i vrstu modulacije*

U ovom prozoru moguće je kao i kod jednofaznog izmjenjivača promijeniti sklopnu frekvenciju i vrstu modulacije, pravokutnu ili sinusnu. U ovoj vježbi još uvijek se radi samo o pravokutnoj modulaciji, pri dvije različite sklopne frekvencije. Klikom na *Spectrum* moguće je mijenjati koja se vrijednost želi prikazati, napon ili struja, također postoji mogućnost za odabir usrednjenih vrijednosti kao i u jednofaznom izmjenjivaču, slika 4.13. U ovoj vježbi biti će prikazane i stvarne i usrednjene vrijednosti prve faze trofaznog izmjenjivača.



Slika 4.13. *Prozor za promjenu prikaza vrijednosti*

Nakon odabira željene sklopne frekvencije i signala koji se želi prikazati, klikom na *Start/Stop* na zaslonu se pojavi frekvencijski spektar. Da bi dobili vrijednosti THD-a u postotcima, u traci s izbornicima klikne se na *Evulation*, a zatim na *Statistics* slika 4.14.



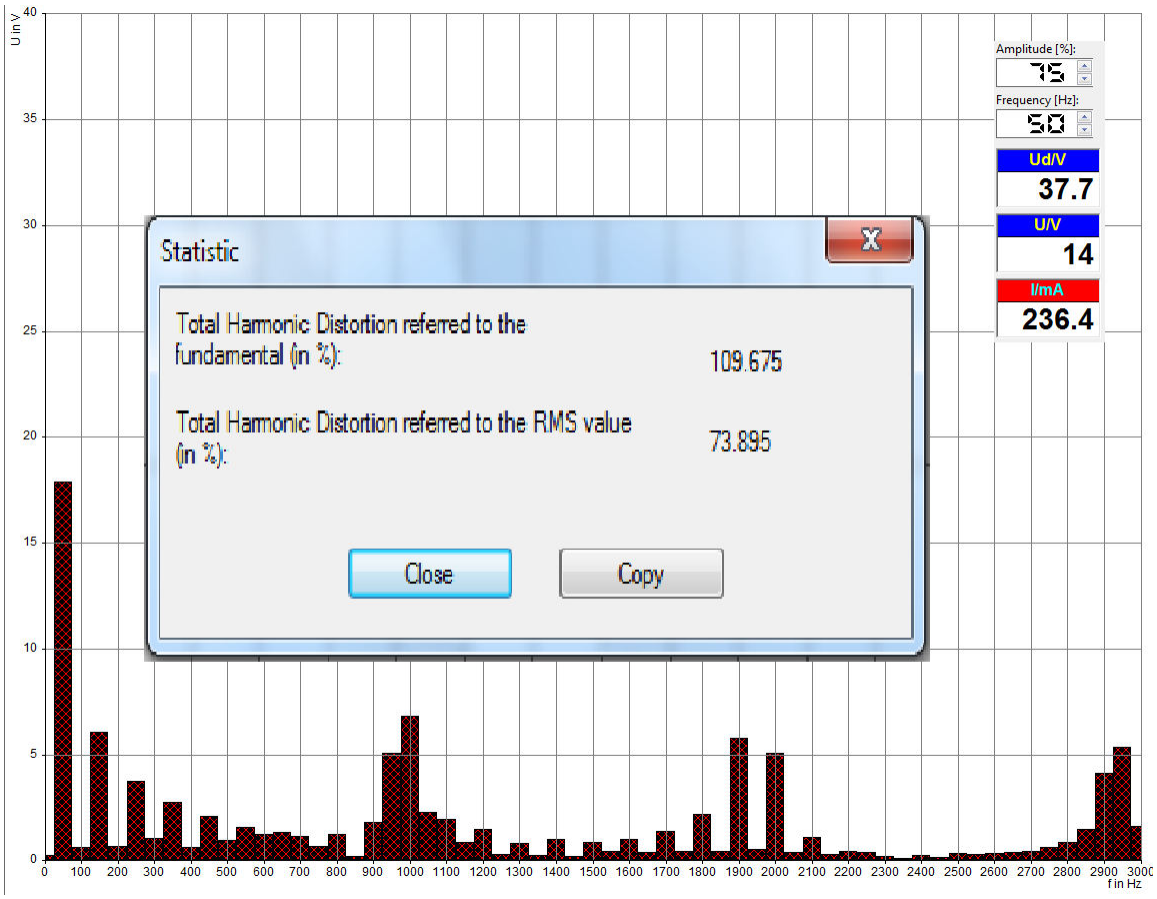
Slika 4.14. *Padajući izbornik za analizu ukupnog THD-a u postotcima*

Kao i kod prikaza prvih valnih oblika za pravokutnu modulaciju (slika 4.5.), postavke izmjenjivača će biti slijedeće (tablica 4.2.), ali u ovom slučaju trofaznog.

Tablica 4.2. *Postavke trofaznog izmjenjivača u svrhu analize frekvencijskog spektra*

Alat:	Spektralna analiza, pravokutna modulacija
Opterećenje:	Radno-induktivno
Osnovna frekvencija:	50 Hz
Frekvencija sklapanja:	977 Hz, m_f=19,54
Amplituda:	75%
Mjerenja:	Frekvencijski spektar (0 – 3 kHz) izlaznog napona U *THDU* (Ukupno harmonijsko izobličenje napona)

Prema postavkama iz tablice 4.2. frekvencijski spektar izgledati će:

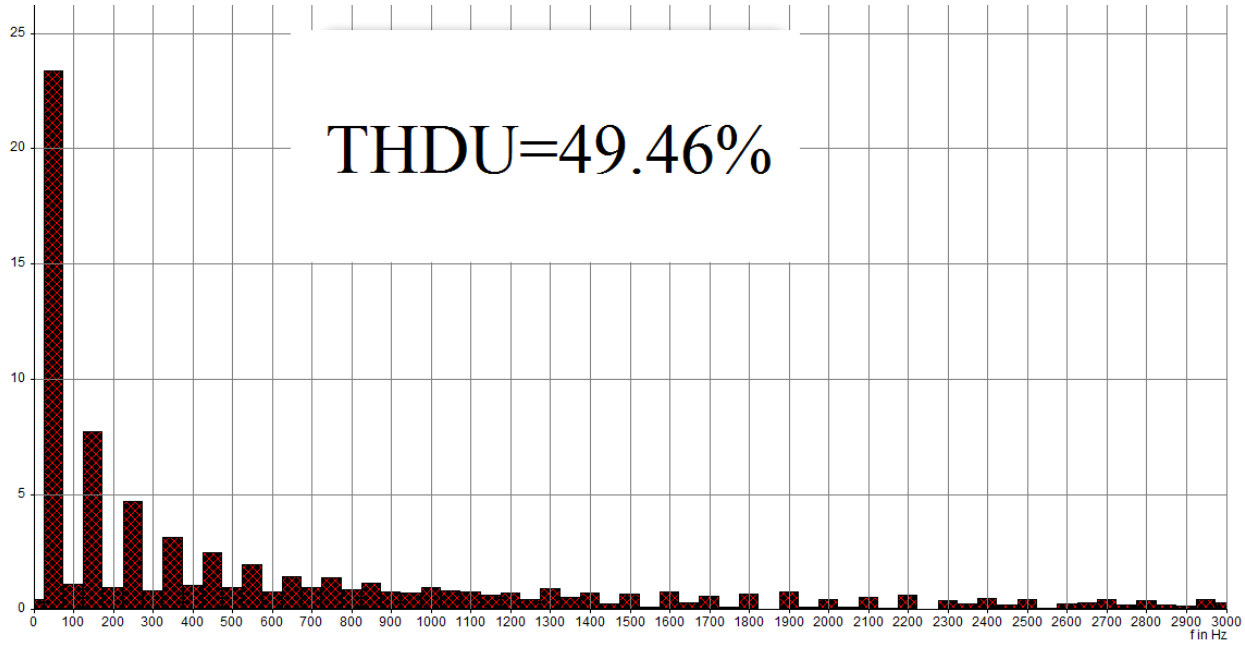


Slika 4.15. *Frekvencijski spektar izlaznog napona pri amplitudi 75%, i THDU pri nižoj sklopnoj frekvenciji*

Klikom na *Statistics* dobije se prikaz THDU-a. Prva vrijednost označava ukupno harmonijsko izobličenje u odnosu na osnovnu frekvenciju, dok druga vrijednost označava ukupno

harmonijsko izobličenje u odnosu na efektivnu vrijednost pripadne varijable. U radu će se promatrati samo prva vrijednost jer ona odgovara izrazu 3-5. Rezultati su izraženi u postocima. Sa slike 4.15. je vidljivo da je ukupno harmonijsko izobličenje napona za pravokutnu modulaciju, pri nižoj sklopnoj frekvenciji i pri amplitudi 75%, $THDU = 109{,}675\ \%$.

Na slici 4.16. prikazan je frekvencijski spektar pri amplitudi 100%, što odgovara neupravljivom naponskom zmjenjivaču.



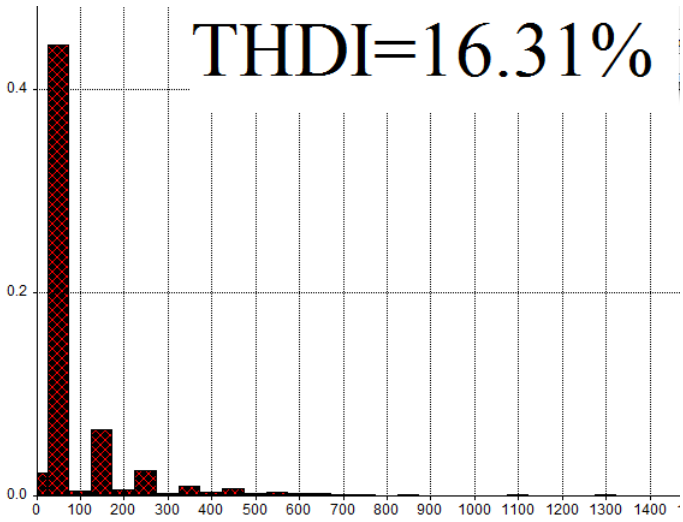
Slika 4.16. *Frekvencijski spektar izlaznog napona pri amplitudi 100%, i THDU pri nižoj sklopnoj frekvenciji*

Ova vrijednost može se usporediti sa vrijednosti THDU-a koja je izračunata u 3. Poglavlju pomoću analizatora snage, a iznosila je 44,40%. Vrijednosti su približno iste. Usporedbom slike 4.15. i 4.16. može se doći do zaključka kako je vrijednost osnovnog harmonika napona veća pri amplitudi 100%, te kako su pri toj istoj amplitudi, na svim ostalim frekvencijama harmonici napona zanemarivi, odnosno manji od osnovnog harmonika.

Pri amplitudi 75% nije ista situacija, smanjenjem amplitude smanjio se i osnovni harmonik, a može se primjetiti kako harmonici napona na nekim drugim frekvencijama imaju veći doprinos. Na sklopnoj frekvenciji harmonik napona ima znatno veći utjecaj nego pri amplitudi 100%.

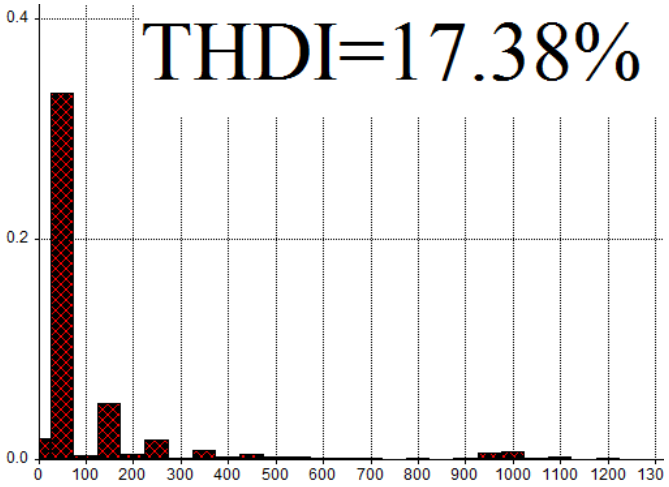
Iz razloga što je utjecaj viših harmonika veći pri amplitudi 75%, vrijednost THDU-a je manja pri amplitudi 100%.

Slična stvar trebala bi se događati i sa strujom. Frekvencijski spektar izlazne struje, a s njim i THDI prikazan je na slijedećoj slici, za amplitudu 100%.



Slika 4.17. *Frekvencijski spektar izlazne struje pri amplitudi 100%, i THDI pri nižoj sklopnoj frekvenciji*

Vrijednost THDI-a sa slike također se može usporediti s vrijednostima THDI-a iz 3. poglavlja, jer se radi o istim postavkama. Vidljivo je na slici da je $THDI = 16{,}31\%$ i ta vrijednost je veća za manje od 1% u odnosu na izračunatu vrijednost iz podataka dobivenih analizatorom snage. Slijedeća slika prikazuje THDI pri amplitudi 75%. Vidljivo je kako se smanjenjem amplitude povećao THDI.



Slika 4.18. *Frekvencijski spektar izlazne struje pri amplitudi 75%, i THDI pri nižoj sklopnoj frekvenciji*

Za druge amplitude i višu sklopnu frekvenciju vrijednosti THD-a su prikazane u slijedećim tablicama.

Tablica 4.3.*Ukupno harmonijsko izobličenje napona pravokutne modulacije*

Ukupno harmonijsko izobličenje napona THDU[%]								
	valni oblik				usrednjeni valni oblik			
Amplituda:	25%	50%	75%	100%	25%	50%	75%	100%
$f_S = 977Hz$	433,69	200,22	109,67	49,46	239,96	103,42	57,42	43,29
$f_S = 7810Hz$	427,55	195,34	105,73	48,32	45,11	43,98	43,62	43,22

Kod valnog oblika napona sklopna frekvencija nema velik utjecaj na promjenu THD-a, dok promjena amplitude, odnosno modulacijskog indeksa m_a, ima velik utjecaj. Kod usrednjenog napona THDU je manji kod obje sklopne frekvencije. Pri nižoj sklopnoj frekvenciji povećanjem amplitude, THDU se smanjuje, dok su kod više sklopne frekvencije isti trendovi promjene mijenjanjem modulacijskog indeksa, odnosno amplitude.

Tablica 4.4. *Ukupno harmonijsko izobličenje struje pravokutne modulacije*

Ukupno harmonijsko izobličenje struje THDI[%]				
Amplituda:	25%	50%	75%	100%
$f_S = 977Hz$	32,67	20,68	17,38	16,32
$f_S = 7810Hz$	28,87	19,67	17,62	15,99

Iz tablice 4.4. može se zaključiti da promjena amplitude ima isti utjecaj na struju kao i na napon, smanjenjem amplitude THDI je veći.

Smanjenjem amplitude napona i mjenjanjem sklopne frekvencije, THD pri pravokutnoj modulaciji nije se smanjivao u odnosu na naupravljivi izmjenjivač, iz tog razloga ova modulacija nije dovoljno dobra. U slijedećem poglavlju biti će opisana sinusna pulsno-širinska modulacija prikazima valnih oblika i mjerenjima THD-a gdje će se vidjeti njene prednosti u odnosu na neupravljivi naponski izmjenjivač i izmjenjivač upravljan pravokutnom pulsno-širinskom modulacijom.

4.3. Bipolarna sinusna pulsno-širinska modulacija

U dosadašnjim metodama pretvaranja istosmjernog u izmjenični napon izlazne varijable bile su pravokutnog valnog oblika. Pravokutni valni oblik sadrži više harmonike. Za optimalno upravljanje izmjeničnim električnim rotacijskim strojevima, potrebna je struja sinusoidnog valnog oblika.

Bipolarna pulsno-širinska modulacija dobiva se na način da se perioda rada *T* podijeli na *N* jednakih dijelova trajanja sklopne periode T_s. Za *k*-tu sklopnu periodu ($k = 1,2,3,4 \ldots . . N$) vrijedi:

$$x_{V1} = \begin{cases} 0 & t_{k-1} \leq t \leq t_{k-1} + \Delta t_k \\ 1 & t_{k-1} + \Delta t_k \leq t \leq t_k \end{cases} \tag{4-3}$$

gdje se trajanje vođenja upravljivog ventila Δt_k mijenja prema izrazu:

$$\frac{\Delta t_k}{T_s} = \frac{1}{2} \cdot (1 + m_a \cdot \sin \omega t) \qquad t_{k-1} \leq t \leq t_k \tag{4-4}$$

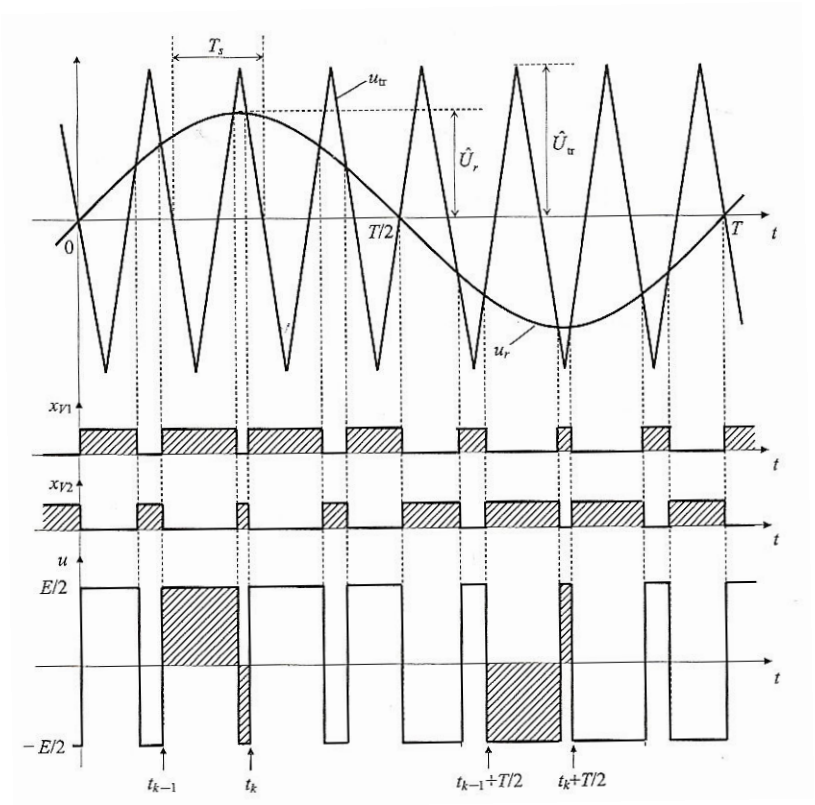
Faktor m_a je modulacijski indeks ili faktor modulacije a računa prema izrazu:

$$m_a = \frac{\widehat{U}_1(1)}{E/2} \qquad 0 \leq m_a \leq 1 \tag{4-5}$$

gdje su:

- $\widehat{U}(1)$ – vršna vrijednost napona osnovnog harmonika [V]
- E – napon izvora [V]

Modulacijski indeks definira se kao odnos modulacijskog signala i nemoduliranog nositelja. Uzevši u obzir izraz (4-3) te izraz (4-4), zajamčeno je da će se i narinute voltsekunde na trošilo tijekom periode *T* mijenjati po sinusnome zakonu [1].



Slika 4.19. *Karakteristični valni oblici napona i upravljačkih signala za* $m_f = 7, m_a = 0{,}75$

Na slici 4.19. prikazani su karakteristični valni oblici upravljačkih signala i napona za sinusno bipolarno pulsno-širinsku modulaciju izmjenjivača u polumosnom spoju. Valni je oblik napona na trošilu zrcalno simetričan ako je modulacijski omjer frekvencija m_f neparan broj. Napon trošila u takvome slučaju ne sadrži parne harmonike i prema tome, harmonijski sadržaj je puno povoljniji nego da je modulacijski omjer frekvencija paran broj. U praksi se stoga kod bipolarno pulsno-širinske modulacije, modulacijski omjer frekvencija m_f bira kao neparni broj [1]. Što je frekvencija sklapanja veća, valni oblik napona bliži je čistom sinusoidnom valu. Eksperimentalna kartica *Lucas Nuelle* u režimu rada kao jednofazni naponski izmjenjivač sadrži dvije frekvencije sklapanja koje su prikazane u tablici.

Tablica 4.5. *Frekvencije sklapanja i sklopne periode eksperimentalne kartice Lucas Nuelle u izmjenjivačkom režimu rada*

Frekvencija sklapanja f_s	Sklopna perioda T_s	m_f
977 Hz	1023 µs	19,54
7810 Hz	128 µs	156,2

Efektivna vrijednost napona trošila kod bipolarne pulsno-širinske modulacije ne ovisi o modulacijskome indeksu i iznosi $E/2$, a efektivna vrijednost osnovnog harmonika trošila iznosi:

$$U(1) = m_a \cdot \frac{E}{2 \cdot \sqrt{2}} \qquad (4-6)$$

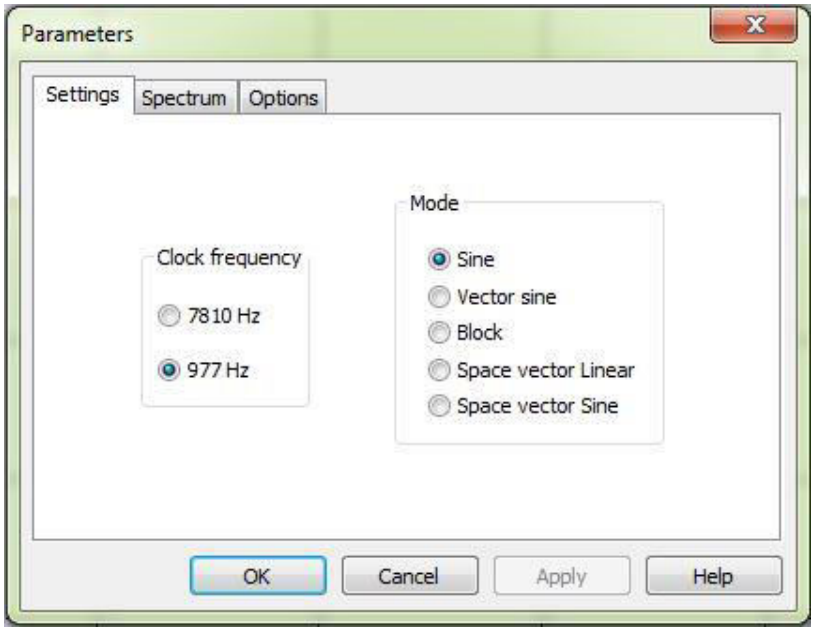
Ukupno harmonijsko izobličenje napona kod bipolarne pulsno-širinske modulacije iznosi:

$$THDU = \sqrt{\frac{2}{{m_a}^2} - 1} \qquad (4-7)$$

4.3.1. Određivanje modulacijskog indeksa m_a i snimanje valnih oblika struje i napona

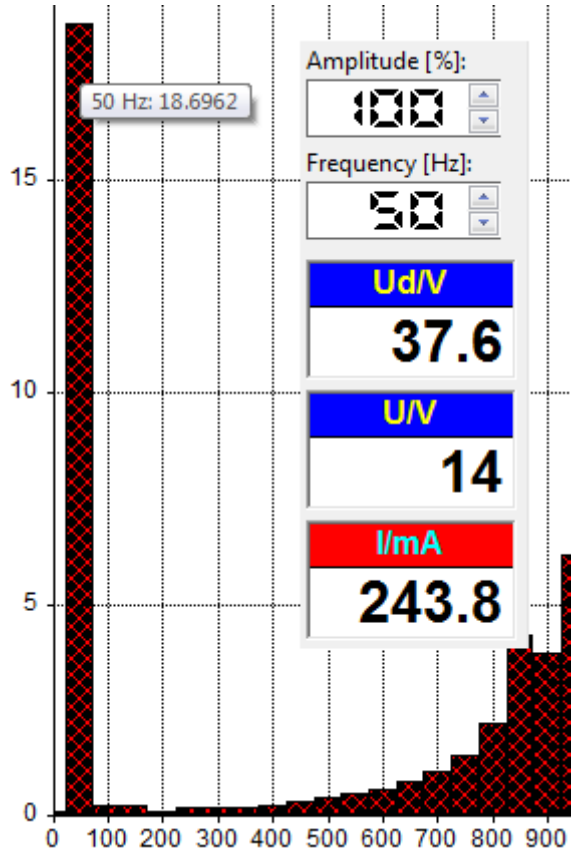
U ovom poglavlju biti će prikazano kako se određuje spomenuti modulacijski indeks m_a pomoću programa *LabSoft*.

Određivanje modulacijskog indeksa vrši se u izborniku „Three-phase power inverter“. Da bi se odredio modulacijski indeks potrebno je prikazati frekvencijski spektar sinusne pulsno-širinske modulacije. Postupak je isti kao i kod pravokutne modulacije osim što se u prozoru za promjenu modulacije i sklopne frekvencije odabire „*Sine*“ slika 4.20.



Slika 4.20. *Prozor za promjenu sklopne frekvencije i vrstu modulacije*

Nakon što se prikaže frekvencijski spektar, postavljanjem pokazivača na osnovni harmonik prikaže se vršna vrijednost tog harmonika $\widehat{U}_1$ i na kojoj frekvenciji se on nalazi. Na slici 4.21. prikazano je kako to izgleda.



Slika 4.21. *Prikaz vršne vrijednosti osnovnog harmonika i frekvencije na kojoj se nalazi*

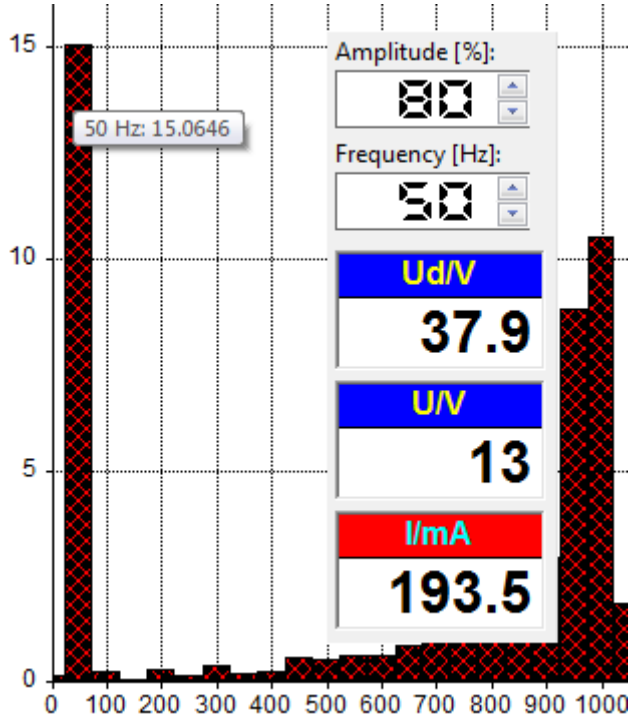
Iznos vršne vrijednosti osnovnog harmonika napona za frekvencijski spektar sa slike 4.21. iznosi: $\widehat{U}_1 = 18{,}69V$

Prema izrazu: $m_a = \frac{\widehat{U}_1(1)}{E/2}$

Modulacijski indeks iznosi $m_a = \frac{18.69}{37.6/2} = 0{,}99 \approx 1$

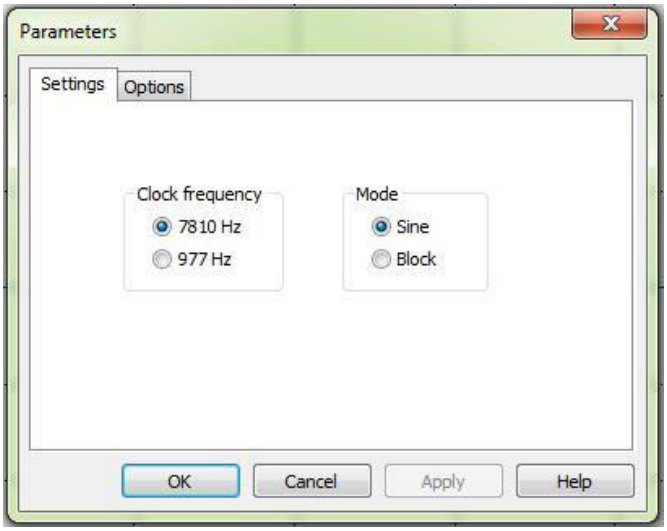
Prema iznosu modulacijskog indeksa može se zaključiti kako je on povezan sa iznosom amplitude. Ako je iznos amplitude 100% modulacijski indeks m_a iznosi 1. Kod amplitude 80% vršna vrijednost napona osnovnog harmonika iznosi: $\widehat{U}_1 = 15{,}06$, a napon $E = 37{,}9$ slika 4.22. Prema tome m_a iznosi: $m_a = \frac{15.06}{37.9/2} = 0{,}79 \approx 0{,}8$. Ovisnost modulacijskog indeksa je ista i za

ostale amplitude. U nastavku će se umjesto amplitude koristiti modulacijski indeks m_a kao glavni parametar.



Slika 4.22. *Prikaz vrijednosti osnovnog harmonika pri amplitudi 80%*

Snimanje valnih oblika struje i napona vrši se u izborniku „AC-converter“ kao i kod pravokutne modulacije, potrebno je samo promijeniti vrstu modulacije na „*Sine*“ slika 4.23.



Slika 4.23. *Prozor za odabir vrste modulacije*

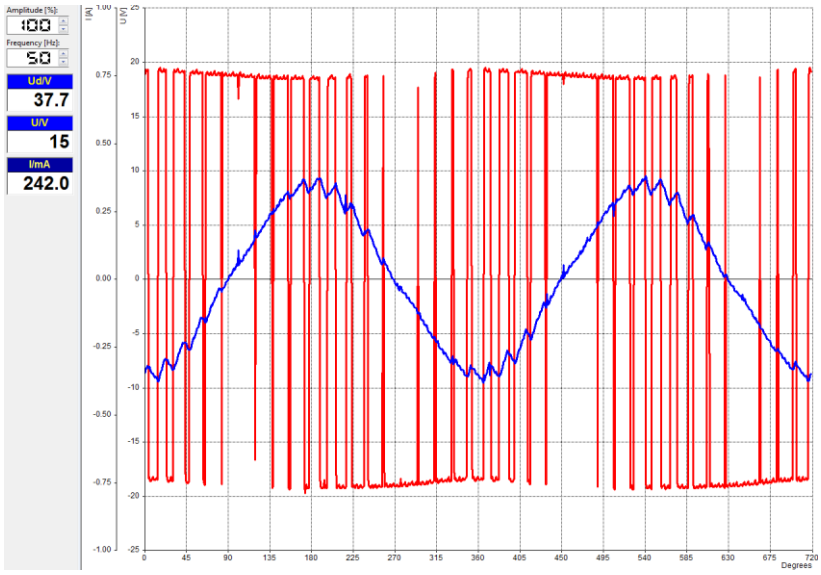
U ovoj vježbi također je mjereno za dva modulacijska omjera frekvencija m_f, odnosno dvije sklopne frekvencije $f_{s1} = 977Hz\ i\ f_{s2} = 7810Hz$

Shema spoja za snimanje valnih oblika struje i napona pri bipolarnoj pulsno-širinskoj modulaciji ostaje ista kao i u dosadašnjim mjerenjima. U vremenskom dijagramu izabiru se slijedeće postavke .

Tablica 4.6. *Postavke jednofaznog naponskog izmjenjivača s radno-induktivnim opterećenjem i sinusnom bipolarnom pulsno-širinskom modulacijom*

Alat:	Vremenski dijagram; Izmjenični regulator
Opterećenje:	Radno-induktivno
Temeljna frekvencija:	50 Hz
Mjerenja:	Valni oblici izlazne struje i napona
m_a:	1,00
Frekvencija sklapanja:	977 Hz
Mjerenja:	Valni oblici izlazne struje i napona

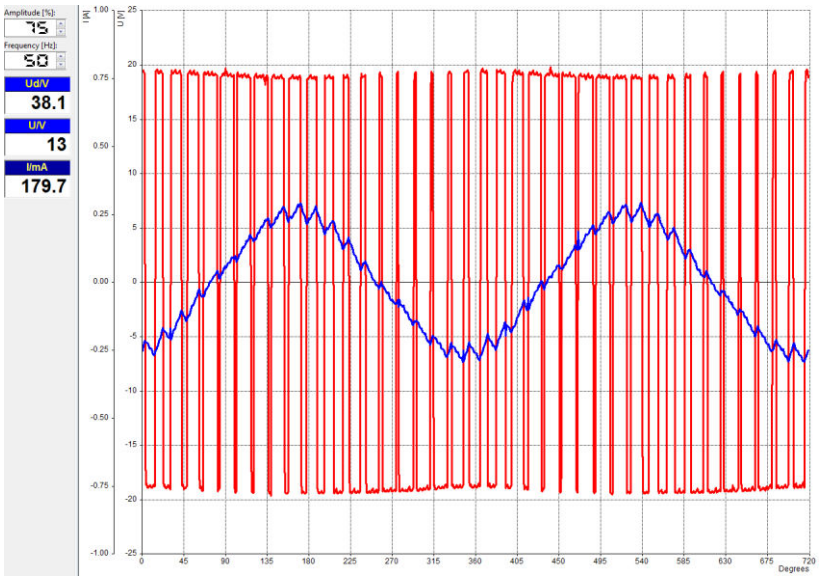
Klikom na *Start/Stop* dobivaju se slijedeći valni oblici:



Slika 4.24. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača, $m_a = 1$, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 977 Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*

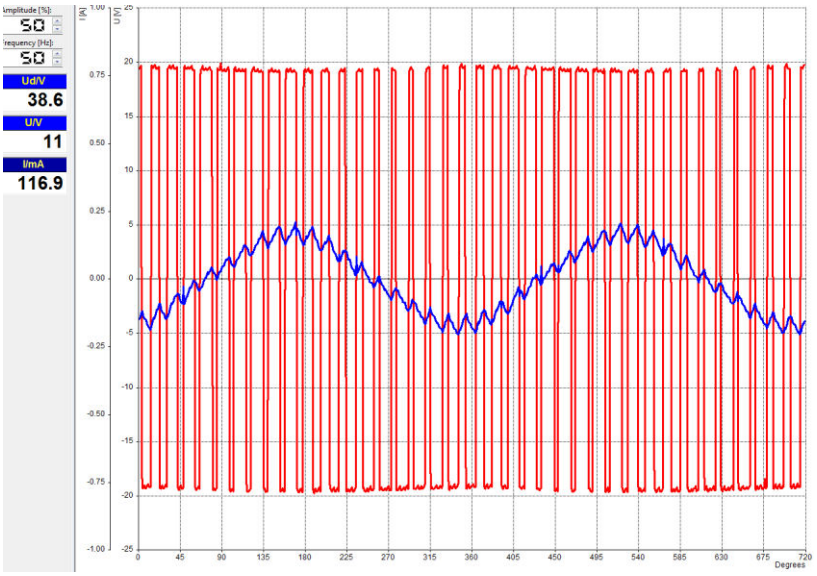
Kao i što se moglo očekivati, struja u ovom slučaju prati sinusni valni oblik, što je prednost u odnosu na pravokutnu modulaciju, a struja sinusnog valnog oblika je zahtjev s obzirom na izmjenične karakteristike pojne mreže. Izlazna struja i napon su manji u odnosu na nepravljivi izmjenjivač, ali struja sinusnog valnog oblika i mogućnost upravljanja naponskim izmjenjivačem daju veliku prednost bipolarnoj pulsno-širinskoj modulaciji.

U slijedećem slučaju modulacijski indeks je smanjen na $m_a = 0{,}75$



Slika 4.25. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača,* $m_a = 0{,}75$*, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 977 Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*

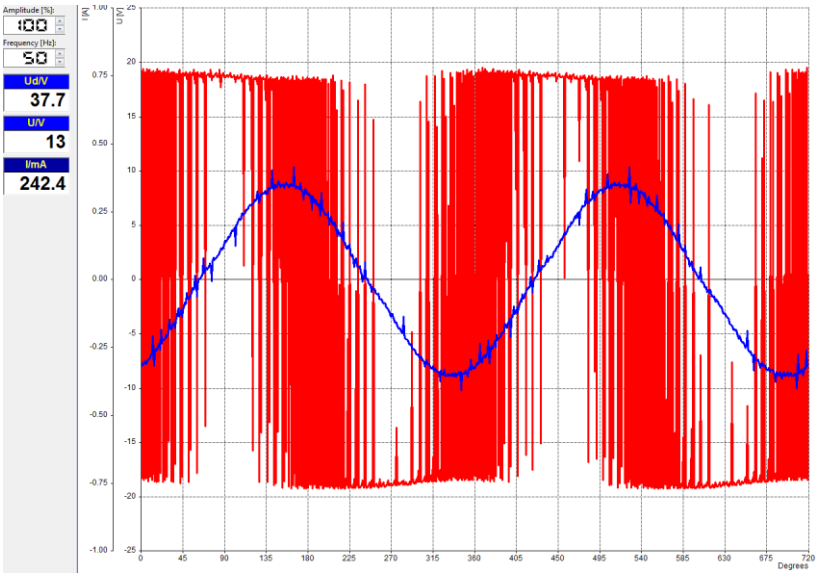
Uspoređujući sliku 4.24. i sliku 4.25. da se primijetiti kako se smanjenjem modulacijskog indeksa pozitivne i negativne voltsekunde postupno izjednačavaju, čime se na izlazu izmjenjivača dobiva sve niži napon. Efektivna vrijednost struje na trošilu također se smanjuje.



Slika 4.26. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača,* $m_a = 0{,}5$*, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 977 Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*

Isto kao i kod modulacijskog indeksa $m_a = 0{,}75$ na slici 4.26. također se može primjetiti da se smanjenjem modulacijskog indeksa smanjuju izlazna struja i napon.

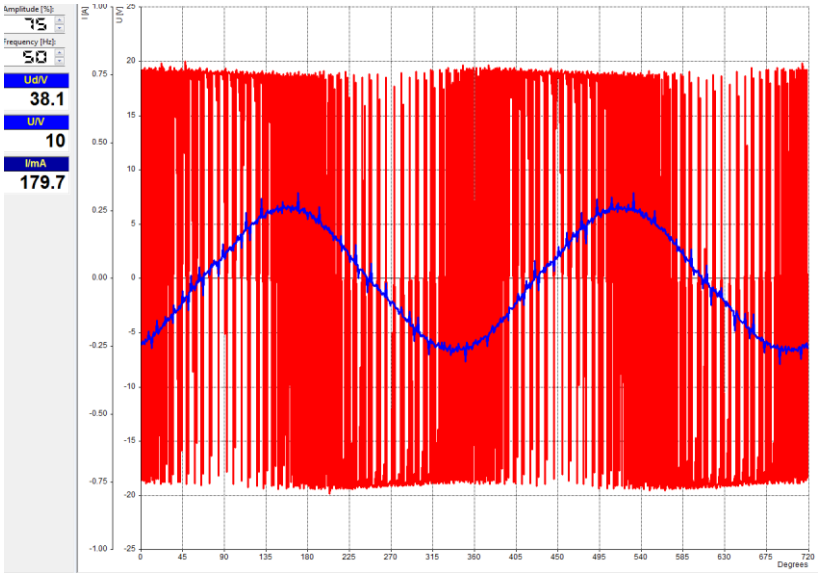
U slijedećim mjerenjima biti će prikazani valni oblici kod više sklopne frekvencije f_{s2} za iste modulacijekse indekse. Slijedeća slika prikazuje valne oblike struje i napona pri modulacijskom indeksu $m_a = 1$



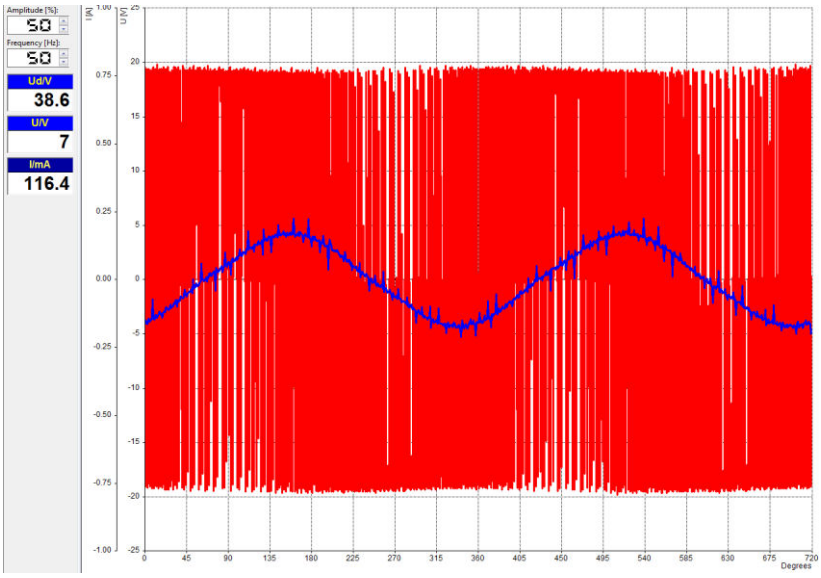
Slika 4.27. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača,* $m_a = 1$*, frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*

Iz dobivenih rezultata mjerenja vidljivo je da što je sklopna frekvencija veća, valni oblik struje je više sinusoidnog oblika sa smanjenim udjelom viših harmonika. Kod više sklopne frekvencije smanjila se efektivna vrijednost osnovnog harmonika napona u odnosu na nižu sklopnu frekvenciju, pri istoj amplitudi.

Na slijedećim slikama biti će prikazani valni oblici struje i napona pri modulacijskim indeksima 0,75 i 0,5



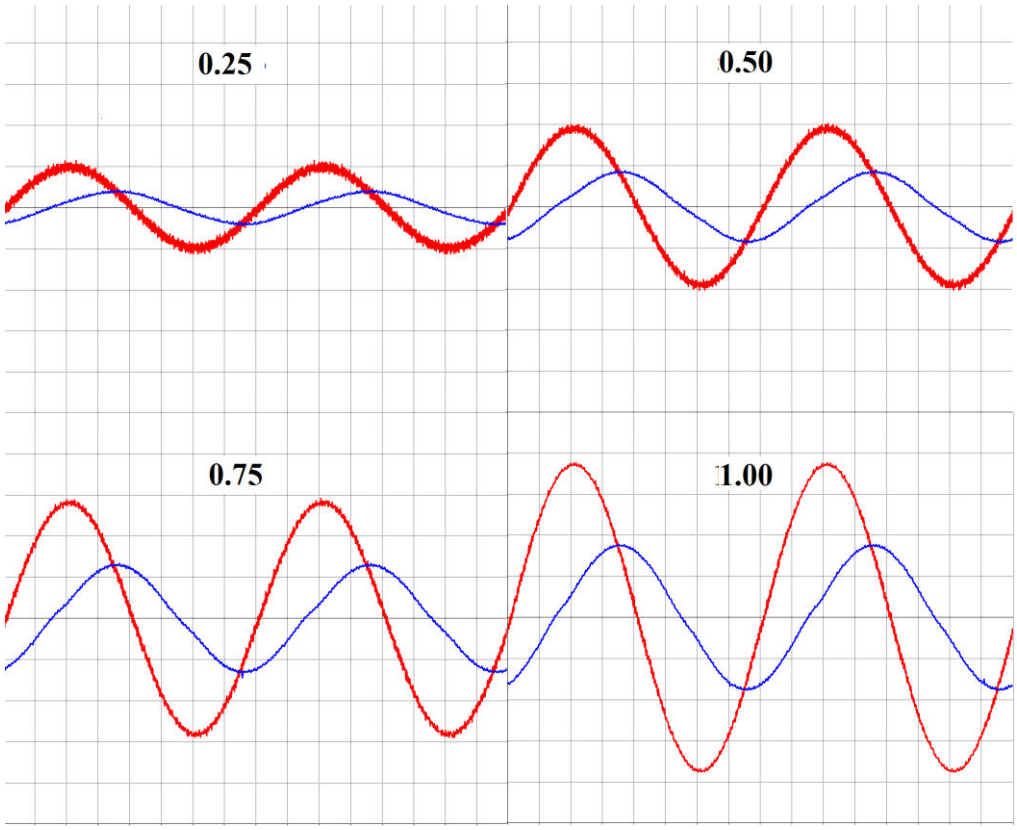
Slika 4.28. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača,* $m_a = 0{,}75$ *frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*



Slika 4.29. *Valni oblici struje i napona izmjenjivača,* $m_a = 0{,}5$ *frekvencija 50 Hz, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 7810Hz, bipolarna sinusna PWM modulacija*

Na slikama 4.28. i 4.29. može se zaključiti da kao i u dosadašnjim mjerenjima, smanjenjem modulacijskog indeksa se smanjuju struja i napon

Na slici 4.30. prikazani su valni oblici usrednjenog napona i usrednjene struje pri višoj sklopnoj frekvenciji



Slika 4.30. *Usrednjeni valni oblici struje i napona izmjenjivača pri četiri različita modulacijska indeksa, frekvencija* 50 Hz*, radno-induktivno opterećenje, sklopna frekvencija 977 Hz, sinusna bipolarna pulsno-širinska modulacija*

U slijedećem dijelu biti će prikazan frekvencijski spektar i mjerenje THD-a sinusne pulsno-širinske modulacije

4.3.2. Frekvencijski spektar i mjerenje THD-a

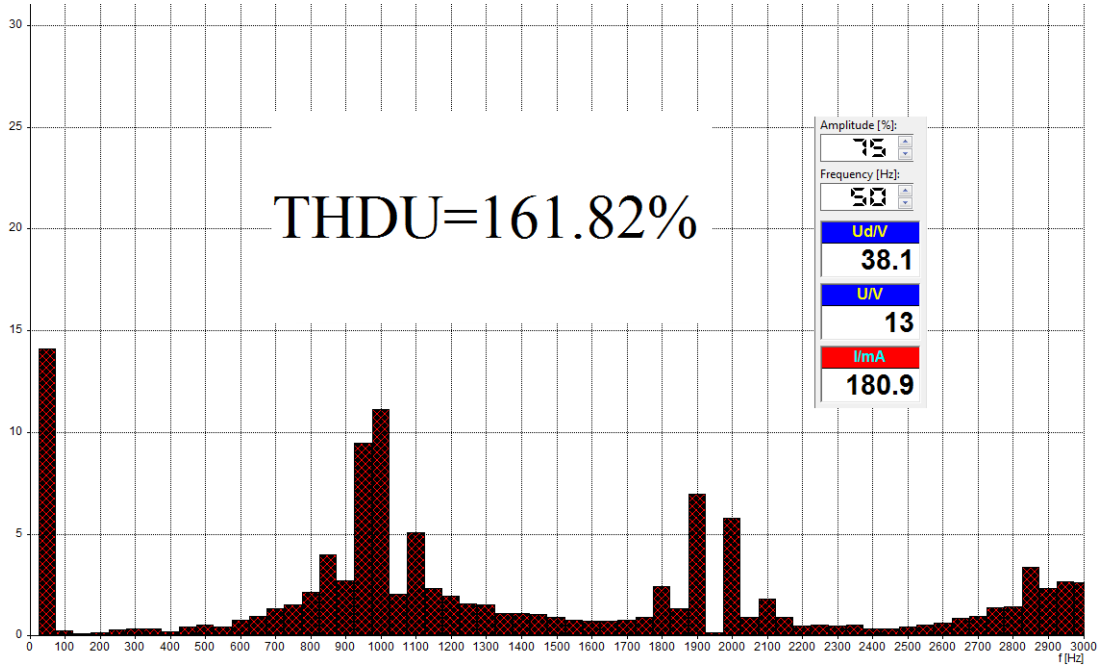
Postavke prvog mjerenja su slijedeće:

Tablica 4.7. *Postavke trofaznog izmjenjivača u svrhu analize frekvencijskog spektra*

Alat:	Spektralna analiza, sinusna modulacija
Opterećenje:	Radno-induktivno
Osnovna frekvencija:	50 Hz
Frekvencija sklapanja:	977 Hz
m_a:	0,75
Mjerenja:	Frekvencijski spektar (0 – 10 kHz) izlaznog napona U *THDU* (Ukupno harmonijsko izobličenje napona)

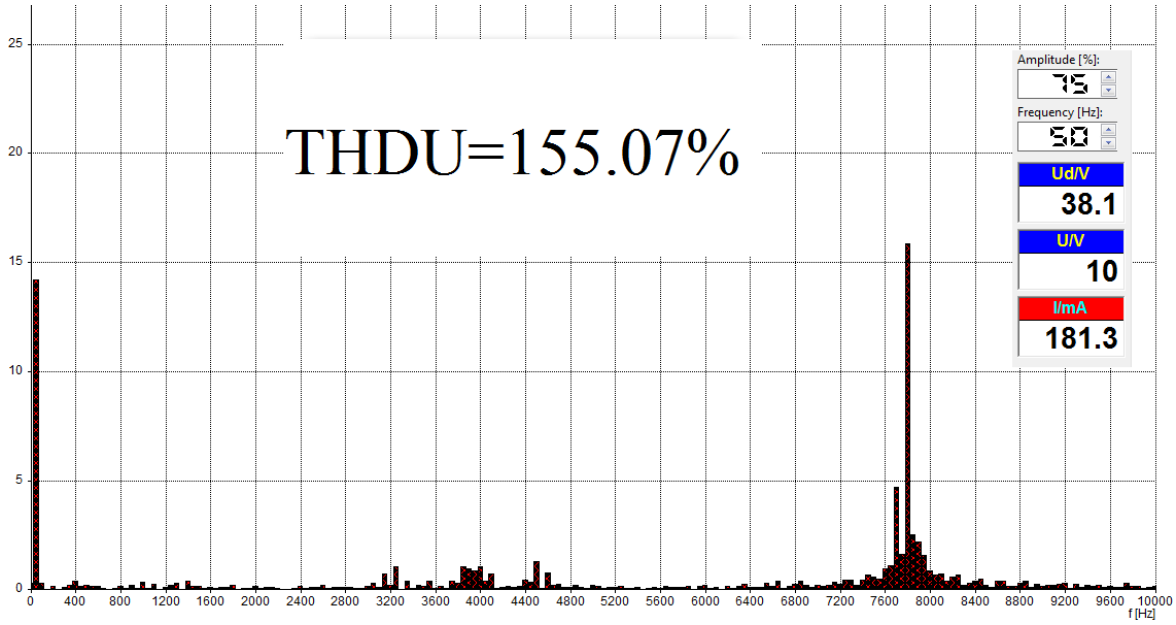
Parametri koji će se mijenjati prilikom mjerenja su: sklopna frekvencija i m_a

Frekvencijska analiza i THDU izgleda ovako:



Slika 4.31. *Frekvencijski spektar napona pri m_a=0,75 i THDU pri nižoj sklopnoj frekvenciji, sinusna modulacija*

Sa slike se može očitati kako je $THDU = 161{,}82\%$ što je veći iznos od THDU-a kod pravokutne modulacije, ali kod sinusne modulacije se dobila struja sinusnog valnog oblika i samim time sinusna modulacija je povoljnija. Osnovni harmonik napona izračeniji je od harmonika na nekim drugim frekvencijama. Nakon osnovnog harmonika slijedeći najznačajniji je na sklopnoj frekvenciji. Na slijedećoj slici promijenjena je sklopna frekvencija, sa niže na višu.



Slika 4.32. *Frekvencijski spektar napona pri m_a=0,75 i THDU pri višoj sklopnoj frekvenciji, sinusna modulacija*

Na slici 4.32. može se primjetiti kako se povećanjem sklopne frekvencije iznos THDU-a nešto smanjila, ali ne znatno. Vršna vrijednost napona osnovnog harmonika nije najdominantnija. Vrijednost napona harmonika koji se nalazi na sklopnoj frekvenciji ima veći utjecaj.

U slijedećoj tablici biti će prikazane vrijednosti THDU-a kod sinusne pulsno-širinske modulacije.

Tablica 4.8. *THDU sinusne pulsno-širinske modulacije*

Ukupno harmonijsko izobličenje napona THDU[%]								
	valni oblik				usrednjeni valni oblik			
m_a	0,25	0,5	0,75	1	0,25	0,5	0,75	1
$f_S = 977Hz$	549,70	259,3	161,82	101,59	318,44	139,87	78,77	48,21
$f_S = 7810Hz$	546,36	258,68	155,06	97,30	13,39	5,99	3,35	2,09

Kao i kod pravokutne modulacije, povećanjem amplitude odnosno modulacijskog indeksa povećava se THDU. Kada je $m_a = 1$, kod sinusne modulacije je THDU veći za 50% u odnosu na isti m_a kod pravokutne modulacije. Usrednjeni oblik ima manje vrijednosti THDU-a. Sklopna frekvencija nema utjecaj na THDU kod pravog oblika.

Pomoću izraza (4-7) THDU se može izračunati kako bi se usporedio sa vrijednostima iz tablice. Izraz vrijedi samo za pravi oblik napona, ne odgovara za usrednjeni. THDU će se izračunati za dva modulacijska indeksa: 0.5 i 0. 75.

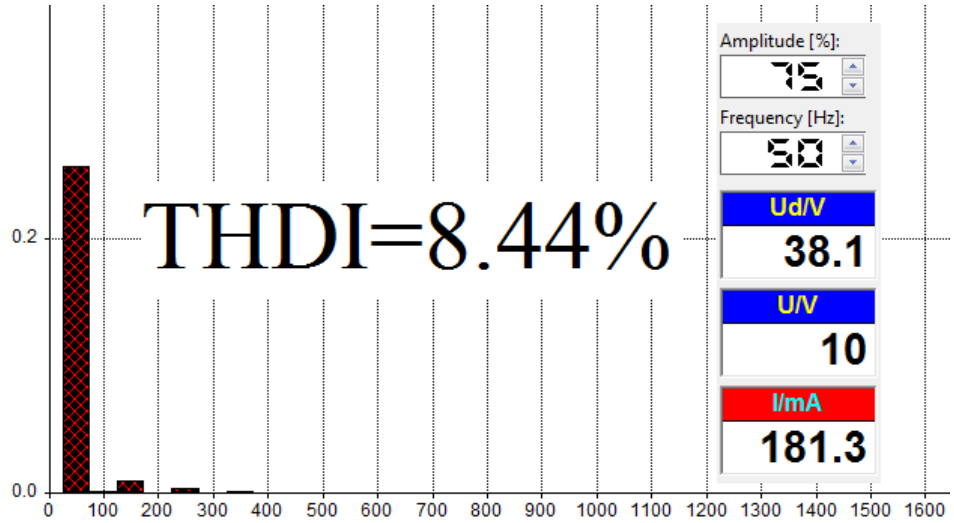
$$THDU = \sqrt{\frac{2}{{m_a}^2} - 1} = \sqrt{\frac{2}{0.5^2} - 1} = 2{,}64 \cdot 100\%$$

Iz tablice se može vidjeti kako su pri modulacijskom indeksu 0.5 vrijednosti THDU-a približno jednake izračunatoj vrijednosti: $264\% \approx 259{,}3\% \approx 258{,}68\%$

$$THDU = \sqrt{\frac{2}{{m_a}^2} - 1} = \sqrt{\frac{2}{0.75^2} - 1} = 1{,}59 \cdot 100\%$$

I kod $m_a = 0{,}75$ vrijednosti THDU-a su približno jednake, što potvrđuje ispravnost programa *LabSoft.*

Slijedeća slika prikazuje frekvencijski spektar struje sinusne modulacije i iznos THDI-a



Slika 4.33. *Frekvencijski spektar struje pri m_a=0,75 i THDI pri višoj sklopnoj frekvenciji, sinusna modulacija*

Iz frekvencijskog spektra može se vidjeti kako je harmonik struje na osnovnoj frekvenciji najdominantniji, nakon njega ostali harmonici su neznačajni. Kao i kod napona na sklopnoj frekvenciji bi se trebao pojaviti harmonik koji je izraženiji, ali na ovoj slici nije prikazan. Slijedeća tablica prikazati će ostale vrijednosti THDI-a.

Tablica 4.9. *Vrijednosti THDI-a sinusne modulacije*

Ukupno harmonijsko izobličenje struje THDI[%]				
m_a	0,25	0,5	0,75	1
$f_S = 977Hz$	37,44	16,42	9,58	6,39
$f_S = 7810Hz$	28,78	12,91	8,44	6,60

U tablici je vidljivo kako sklopna frekvencija nema velik utjecaj na promjenu THDI-a kada je iznos modulacijskog indeksa blizu 1. Kada je $m_a = 0{,}25$ iznos THDI-a je veći pri nižoj sklopnoj frekvenciji za 8,66; što znači da je pri modulacijskom ideksu bližem nuli THDI veći kod niže sklopne frekvencije. Također se može vidjeti znatno manji iznos THDI-a u odnosu na pravokutnu modulaciju.

Slijedeća vježba odnosno mjerenje u ovom poglavlju vezano je uz frekvencijski spektar. Prema [1], postoji tablica za bipolarno sinusnu pulsno-širinsku modulaciju, odnosno tablica

modulacijskih indeksa za više harmonike. Dio te tablice čije će se vrijednosti uspoređivati sa vrijednostima izračunatim i dobivenim pomoću *LabSoft*-a izgleda ovako:

Tablica 4.10. *Normirane vrijednosti amplituda harmonika* $\widehat{U}(n)/(E/2)$ *za* $m_f \geq 9$

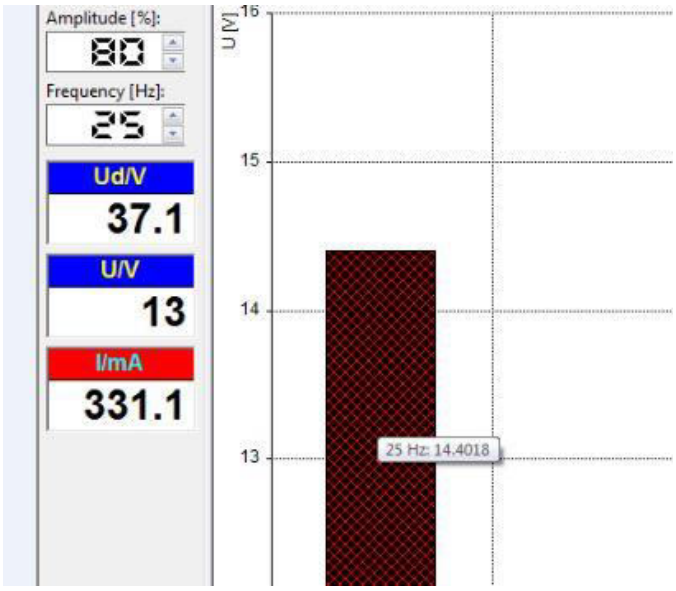
Vrijednosti iz tablice		
Red harmonika	Modulacijski indeks	
	0,4	0,8
1	0,4	0,8
mf	1,15	0,818
mf ± 2	0,061	0,22
2mf ± 1	0,326	0,314
2mf ± 3	0,024	0,139
2mf ± 5		0,013
3mf	0,123	0,171
3mf ± 2	0,139	0,176
3mf ± 4	0,012	0,104
3mf ± 6		0,016
4mf ± 1	0,157	0,105
4mf ± 3	0,07	0,115
4mf ± 5		0,084
4mf ± 7		0,017

Kako je iznad tablice postavljen uvjet da je $m_f \geq 9$, sklopna frekvencija postavljena je na nižu, a izlazna na 25Hz, kako bi se dobio što veći m_f. Modulacijski omjer frekvencija u tom slučaju iznosi $m_f = 39{,}08$, što zadovoljava uvjet $39{,}08 > 9$. Način određivanja modulacijskog indeksa je već prikazan u radu, pa će se istim postupkom određivati i u ovom slučaju samo za navedeni m_f. Namještanjem amplitude na 80% i modulacijskog omjera frekvencija na 39,08; iznos vršne vrijednosti osnovnog harmonika dobije se kao što je prikazano na slici 4.34. Pomoću te vrijednosti računa se modulacijski indeks m_a. Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona iznosi: $\widehat{U}_1 = 14{,}4018V$

Prema izrazu: $m_a = \frac{\widehat{U}_1(1)}{E/2}$

Modulacijski indeks iznosi $m_a = \frac{14{,}4018}{37{,}1/2} = 0{,}776$

Ova vrijednost prikazana je u tablici 4.11. zajedno sa ostalim vrijednostima, i označena je crvenom bojom.



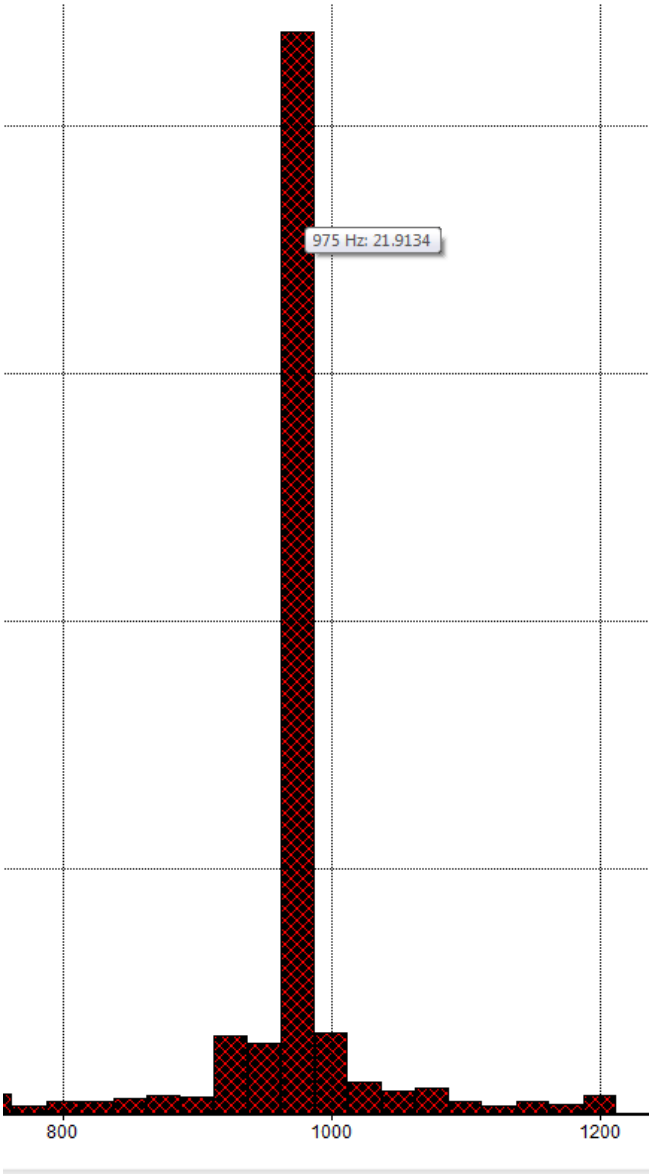
Slika 4.34. *Vršna vrijednost osnovnog harmonika napona, amplituda 80%,* m_f*=39,08*

Tablica 4.11. prikazuje ostale izračunate vrijednosti pomoću prikazanog frekvencijskog spektra

Tablica 4.11. *Izračunate vrijednosti* m_a

Izračunate vrijednosti		
Red harmonika	Modulacijski indeks	
	0,4	0,8
1	0,386	**0,776**
mf	**1,153**	0,823
mf ± 2	0,067	0,235
2mf ± 1	0,34	0,331
2mf ± 3	0,041	**0,132**
2mf ± 5		0,021
3mf	0,125	0,172
3mf ± 2	0,141	0,171
3mf ± 4	0,016	0,101
3mf ± 6		0,019
4mf ± 1	0,179	0,114
4mf ± 3	0,077	0,121
4mf ± 5		0,082
4mf ± 7		0,028

Broj označen zelenom bojom u tablici je iznos modulacijskog indeksa harmonika koji se nalazi na sklopnoj frekvenciji, njegova vršna vrijednost prikazana je na slijedećoj slici.



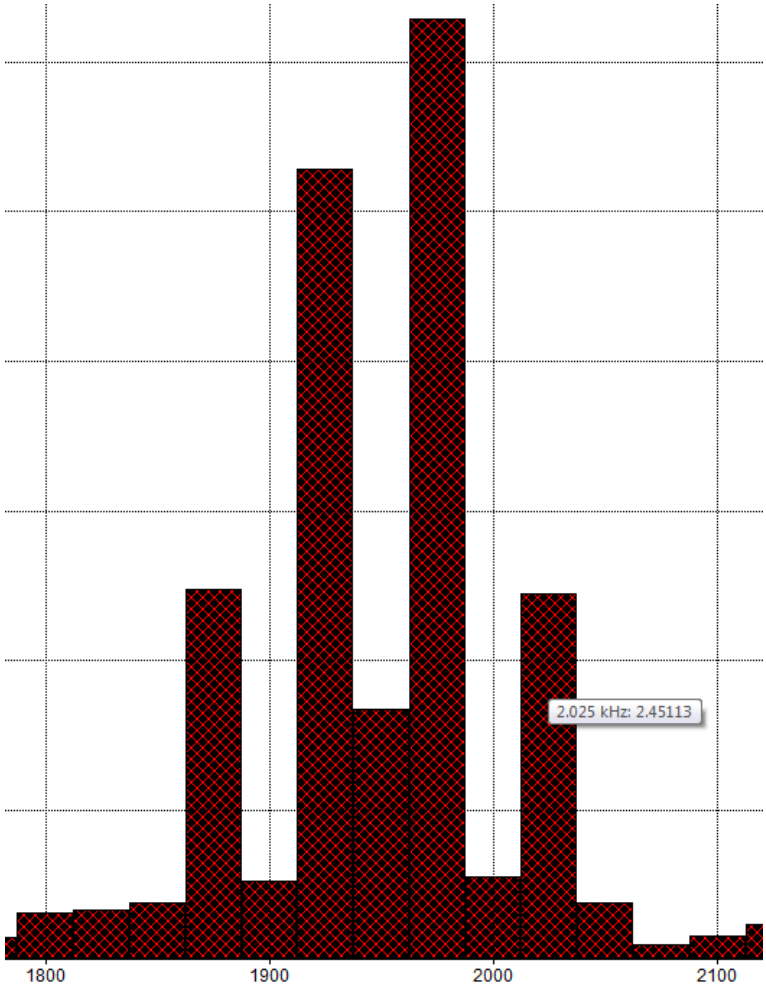
Slika 4.35. *Harmonik na sklopnoj frekvenciji*

Iznos vršne vrijednosti napona harmonika na sklopnoj frekvenciji može se vidjeti na slici, a iznosi: $\widehat{U}_{m_f} = 21{,}9134V$ Prema tome modulacijski indeks iznosi $m_a = \frac{21{,}9134}{38/2} = 1{,}153$

Vrijednost označena smeđom bojom u tablici odnosi se na harmonik drugog reda, odnosno $2m_f + 3$. Njegova vršna vrijednost napona iznosi: $\widehat{U}_{2m_f+3} = 2{,}45113$

Modulacijski indeks iznosi $m_a = \frac{2{,}45113}{37/2} = 0{,}132$

Taj harmonik i njegove vrijednosti prikazane su na slijedećoj slici.



Slika 4.36. *Prikaz harmonika drugog reda*

Usporedbom tablica 4.10 i 4.11. odnosno normiranih i izračunatih vrijednosti može se doći do zaključka kako su vrijednosti približno iste, što bi značilo da se pomoću programa *LabSoft* mogu dobiti točne vrijednosti. Razlog nepoklapanja nekih rezultata je taj što se u programu *LabSoft* vrijednosti mijenjanju u odnosu na trenutak zaustavljanja mjerenja.

U slijedećoj vježbi biti će promatran THD mijenjanjem izlazne i sklopne frekvencije, a fiksiranjem modulacijskog indeksa.

4.3.3. Mjerenje THD-a pri promjeni izlazne i sklopne frekvencije

U ovoj vježbi mijenjana je izlazna frekvencija f, na tri različite vrijednosti 50, 75 i 100Hz. Modulacijski indeks m_a je fiksiran, a uz mijenjanje izlazne frekvencije mijenjana je i sklopna. Način prikaza valnih oblika i mjerenje THD-a u programu *LabSoft* prikazano je u dosadašnjim vježbama. Vrijednosti ukupnog harmonijskog izobličenja biti će prikazane u dvije tablice, za nižu i višu sklopnu frekvenciju. Ako je mjerenje vršeno za tri izlazne frekvencije, na dvije različite sklopne, postojat će šest različitih modulacijskih omjera frekvencija:

$$m_{f1} = \frac{f_{s1}}{f_1} = \frac{977Hz}{50Hz} = 19{,}54$$

$$m_{f2} = 13{,}01;\ m_{f3} = 9{,}77;\ m_{f4} = 156{,}2;\ m_{f5} = 104{,}13;\ m_{f6} = 78{,}1$$

Prema modulacijskim omjerima frekvencija poredane su i vrijednosti THD-a u slijedećim tablicama:

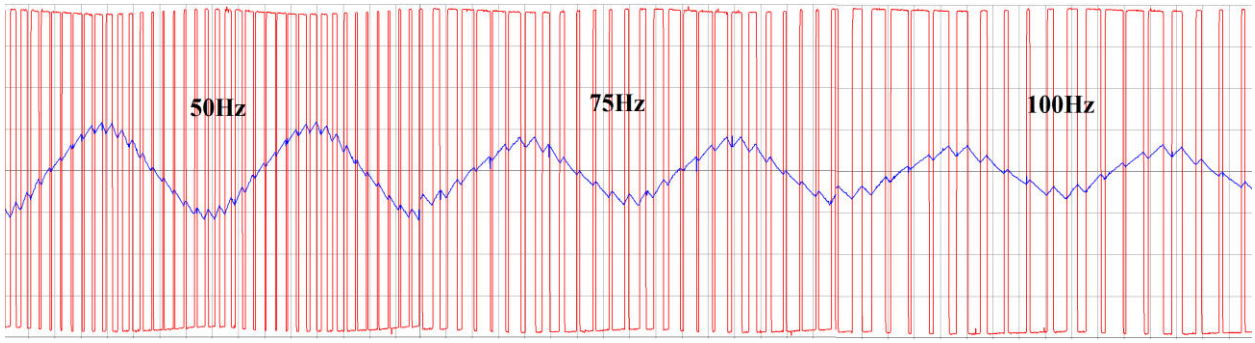
Tablica 4.12. *Vrijednosti THD-a sinusne modulacije, niža sklopna frekvencija, pri* $m_a = 0{,}75$

Ukupno harmonijsko izobličenje THD[%]			
Osnovna frekvencija:	50Hz	75Hz	100Hz
THDU[%]:	160,84	161,82	159,93
THDU[%]usrednjeni:	78,47	70,08	80,54
THDI[%]:	9,65	13,78	18,48
THDI[%]usrednjena:	6,37	8,81	11,41

Tablica 4.13. *Vrijednosti THD-a sinusne modulacije, viša sklopna frekvencija, pri* $m_a = 0{,}75$

Ukupno harmonijsko izobličenje THD[%]			
Osnovna frekvencija:	50Hz	75Hz	100Hz
THDU[%]:	154,1	154,66	155,59
THDU[%]usrednjeni:	3,35	3,34	3,33
THDI[%]:	9,08	12,65	16,3
THDI[%]usrednjena:	4,05	4,47	4,41

Vidljivo je iz tablica, da je THD veći pri nižoj sklopnoj fekvenciji tj. pri manjem modulacijskom omjeru frekvencija. Povećanjem izlazne, odnosno smanjenjem modulacijskog omjera frekvencija THDU ostaje nepromjenjiv dok THDI raste. Na slici 4.37. prikazani su valni oblici koji su povezani sa tablicom 4.12. odnosno nižom sklopnom frekvencijom.



Sllika 4.37. *Valni oblici struje i napona sinusne modulacije pri nižoj sklopnoj frekvenciji*

Kao i u tablici 4.12. moguće je zamijetiti kako se vrijednost THDI povećava povećanjem izlazne frekvencije izmjenjivača.

5. ZAKLJUČAK

Pomoću didaktičko-multimedijalne opreme *Lucas Nelle* student se može lakše usavršiti i steći nova znanja iz područja upravljanja naponskim izmjenjivačima. Na jednostavan način opisani su načini upravljanja jednofaznim naponskim izmjenjivačem zahvaljujući računalnoj podršci, odnosno programu *LabSoft* koji nudi niz mogućnosti.

Trošila na eksperimentalnoj kartici korištena za mjerenja nisu imala dovoljno velike vrijednosti induktiviteta da bi trošilo bilo slično trošilima u primjeni, iz tog razloga je korišteno dodatno vanjsko trošilo induktiviteta $L = 330mH$ i otpora $R = 2\Omega$.

Kod neupravljivog naponskog izmjenjivača nema mogućnosti promjene amplitude i sklopne frekvencije, velik utjecaj imaju harmonici najbliži osnovnom harmoniku (treći i peti), pa ih je bilo potrebno odmaknuti na više frekvencije, što je učinjeno pulsno-širinskom modulacijom.

Modulacija širine impulsa je metoda smanjivanja THD izlaznih struja premještanjem harmonika na više frekvencije. Smanjivanjem amplitude kod pravokutne modulacije harmonici se odmiču na više frekvencije, ali valni oblik struje i napona i dalje ostaje pravokutan. Slijedeći značajniji harmonik nakon osnovnog nalazi se na sklopnoj frekvenciji.

Sinusnom pulsno-širinskom modulacijom dobiva se sinusni valni oblik struje i harmonici su odmaknuti. Osim pravih valnih oblika i iznosa THD-a, za te valne oblike, program *LabSoft* ima mogućnost prikaza usrednjenih valnih oblika kod kojih su i iznosi THD-a imali manje vrijednosti. Tako je najmanj iznos THDU-a bio kod sinusne modulacije pri amplitudi 100% i pri višoj sklopnoj frekvenciji a iznosi: 2,09%. Pri nižoj amplitudi iznosio je: 13,39%, što govori da je prema iznosima THD-a sinusna modulacija najpogodnija i to pri usrednjenim valnim oblicima, a takve vrijednosti trošilo i uzima u obzir. Iznosi THDI-a također su najmanji kod sinusne modulacije usrednjenog valnog oblika, pri amplitudi 100%, a iznosi 6,39%. Sklopna frekvencija nije imala velik utjecaj na promjenu THDI-a kod modulacijskog indeksa kojemu je iznos blizu jedan. Kako se modulacijski indeks, odnosno amplituda bližila nuli, mogao se primjetiti veći utjecaj sklopne frekvencije na iznose THDI-a.

Povećanjem sklopne frekvencije rastu sklopni gubici u izmjenjivaču, a smanjuju se harmonički gubici u trošilu i amplitude harmonika nižeg reda se smanjuju, a amplitude harmonika višeg reda se povećavaju, međutim amplitude harmonika višeg reda stvaraju zanemarive gubitke u krugovima s induktivitetima.

LITERATURA

[1] Ivan Flegar, Elektronički energetski pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.

[2] http://www.lucas-nuelle.com/

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisani su tipični načini upravljanja jednofaznim izmjenjivačima pomoću didaktičko mulitmedijalne opreme Lucas Nuelle, koja se u laboratoriju koristi u svrhu odrađivanja vježbi iz energetske elektronike. Opisana je analiza rada jednofaznog naponskog izmjenjivača u mosnom i polumosnom spoju. Nakon izmjenjivača opisana je didaktičko multimedijalna oprema i njeni podsustavi. U programu LabSoft objašnjeno je kako se dobivaju karakteristični valni oblici neupravljivog naponskog izmjenjivača. Izračunato je ukupno harmonijsko izobličenje neupravljivog naponskog izmjenjivača, a zatim opisani postupci smanjivanja ukupnog harmonijskog izobličenja u koje spadaju pravokutna i sinusna pulsno širinska modulacija. Snimljeni su valni oblici i frekvencijski spektri pravokutne i sinusne pulsno širinske modulacije pri raznim postavkama izmjenjivača, a uz frekvencijske spektre prikazane su i vrijednosti THD-a za obje modulacije.

Ključne riječi: Jednofazni naponski izmjenjivač, mosni spoj, polumosni spoj, ukupno harmonijsko izobličenje, THD, pulsno širinska modulacija, frekvencjski spektar, modulacijski indeks, *LabSoft, UniTrain-I, LucasNuellen*

ABSTRACT

Title: Typically controll circuits for single phase voltage inverter carried out by using Lucas-Nuelle didactic-multimedial equipment.

In this graduate thesis are described the typical ways of controlling AC converters with didactic multimedia equipment Lucas Nuelle, which is used in laboratory for the purpose of doing practice in the field of energy electronics. The analysis of AC converter's work in bridge and semi-bridge connection is described. After the described analysis of AC converter's work, the didactic multimedia equipment is described. In the *LabSoft* computer program it is explained how to produce karakteristic wave shaped, and then are described ways of reducing the overall harmonial distortion, which are rectangular and sinus pulse width modulation. Recorded are the wave shapes and frequency spectres of rectangular and sinus PWM modulation at different settings of the converter, and with the frequency spectres are shown the values of THD for both modulations.

Keywords: AC converter, bridge conection, semi-bridge conection, total harmonic distorsion, PWM modulation, frequency spectres , modulation index, *LabSoft, UniTrain-I, LucasNuellen*

ŽIVOTOPIS

Matija Babić rođen je 04. kolovoza 1991. godine u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu završio je u Babinoj Gredi. Nakon završene osnovne škole, upisuje Tehničku školu u Slavonskom Brodu, smjer tehničar za mehatroniku, koju završava 2010. godine. Iste godine upisuje stručni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku kojeg završava 2013. godine. Nakon stručnog studija, 2013. godine upisuje razlikovnu godinu, a nakon nje 2014. upisuje diplomski studij na istom fakultetu.