

# Koncept elektronički upravljane prigušnice relaizirane eksperimentalnom pločicom LN S04204-7N

---

Živković, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:129501>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**KONCEPT ELEKTRONIČKI UPRAVLJANE  
PRIGUŠNICE REALIZIRANE EKSPERIMENTALNOM  
PLOČICOM LN SO4204-7N**

**Završni rad**

**Luka Živković**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 30.08.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Luka Živković
<b>Studij, smjer:</b>	Prediplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	R4303, 26.07.2018.
<b>OIB studenta:</b>	29399625667
<b>Mentor:</b>	Prof. dr. sc. Denis Pelin
<b>Sumentor:</b>	Andrej Brandis
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Koncept elektronički upravljane prigušnice relaizirane eksperimentalnom pločicom LN SO4204-7N
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	30.08.2021.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	08.09.2021.
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, 08.09.2021.

Ime i prezime studenta:	Luka Živković
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	R4303, 26.07.2018.
Turnitin podudaranje [%]:	8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Koncept elektronički upravljane prigušnice relaizirane eksperimentalnom pločicom LN SO4204-7N**

izrađen pod vodstvom mentora 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
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME .....	2
3. ANALIZA RADA JEDNOFAZNOG IZRAVNOG IZMJENIČNOG PRETVARAČA NAPONA – FAZNO UPRAVLJANJE.....	3
3.1. Analiza rada izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom.....	6
3.2. Koncept elektronički upravljane prigušnice – induktivno trošilo .....	10
4. EKSPERIMENTALNI DIO – KORIŠTENA OPREMA I MJERENJA NA RADNOM I INDUKTIVNOM TROŠILU .....	14
4.1. Mjerenje na izravnom izmjeničnom pretvaraču napona u slučaju radnog opterećenja..	16
4.2. Elektronički upravljana prigušnica – mjerenje na induktivnom trošilu .....	25
4.2.1. Prigušnica integrirana u eksperimentalnu karticu SO4203-4E .....	25
4.2.2. Vanjska prigušnica .....	31
4.3. Analiza rezultata mjerenja – promjena induktivnosti prigušnice .....	38
5. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43
SAŽETAK.....	44
ABSTRACT .....	45
ŽIVOTOPIS .....	46
PRILOG 1: Predložak za laboratorijsku vježbu.....	47
PRILOG 2: Rezultati mjerenja za laboratorijsku vježbu .....	58

## 1. UVOD

Izmjenični pretvarači napona energetske su pretvarači napona čija je svrha povezivanje dvaju izmjeničnih sustava tako da se dobiju željena svojstva i valni oblici napona i struja trošila pri čemu frekvencija pojne mreže odgovara frekvenciji trošila. Željene pretvaračke funkcije mogu se ostvariti na dva načina izvedbe izmjeničnih pretvarača napona kao izravna (jedan proces pretvorbe) i neizravna pretvorba (dvostruki proces pretvorbe) [1].

U završnom radu dana je detaljna analiza rada i provedena su mjerenja za dva granična slučaja opterećenja jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača pomoću didaktičko-multimedijalne opreme Lucas-Nülle i programa LabSoft kojim se prikazuju dobiveni valni oblici struje i napona trošila. Mjerenja i analiza rada biti će provedeni u slučajevima radnog i induktivnog opterećenja pretvarača. Pretvaračka komponentna korištena u procesu pretvorbe je antiparalelni spoj tiristora realiziran unutar eksperimentalne pločice koja se koristi u sklopu Lucas-Nülle opreme. Mijenjajući kut upravljanja (kut kašnjenja okidanja) tiristora može se upravljati valnim oblikom napona trošila što rezultira upravljanjem efektivnom vrijednošću struje trošila. U eksperimentalnom dijelu upravljat će se efektivnom vrijednošću napona i struje radnog i induktivnog trošila. Radno trošilo realizirano je serijskim spojem otpornika s eksperimentalne pločice dok je induktivno trošilo realizirano prigušnicom integriranom u eksperimentalnu pločicu te vanjskom prigušnicom. Na temelju mjerenja valnih oblika napona i struja u slučajevima induktivnog opterećenja cilj je odrediti ponašanje prigušnice u uvjetima promjene kuta upravljanja tiristora. Time se ostvaruje elektroničko upravljanje prigušnicom. Cilj je usporediti mjerenja provedena na radnom i induktivnom trošilu (prigušnici) te ih usporediti s teoretskom analizom. Na kraju će se dati predložak za laboratorijske vježbe iz kolegija Elektromagnetska kompatibilnost.

### 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je izvršiti analizu rada i odraditi mjerenja na jednofaznom izravnom izmjeničnom pretvaraču napona opterećenim radnim i induktivnim trošilom.

Koncept elektronički upravljane prigušnice nastoji se analitički pokazati i ostvariti promjenom induktivnosti prigušnice s pomoću induktivno opterećenog izmjeničnog pretvarača napona promjenom kuta okidanja tiristora. Na temelju provedenih mjerenja usporedit će se rezultati s onima dobivenim analitičkim postupcima.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Tema završnog rada jest ispitati promjenjivost induktivnosti prigušnice primjenom jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona. Promjena induktivnosti ostvaruje se promjenom kuta okidanja koji rezultira promjenom efektivne vrijednosti struje prigušnice.

Autor knjige [1] govori o osnovnim područjima primjene izravnih izmjeničnih pretvarača napona kao što su upravljanje snagom grijača, izgradnja elektronički upravljanih prigušnica, upravljanje brzinom vrtnje asinkronih motora i njihovo upuštanje, upravljanje intenzitetom rasvjete svjetiljki koje koriste žarnu nit i mijenjanje prijenosnog omjera transformatora.

Kassakian i ostali u knjizi su [2] opisali tiristor kao poluupravljivi elektronički ventil koji vodi struju samo u jednom smjeru te može poprimiti napon oba smjera. Uklapanje tiristora ostvaruje se osiguranjem pozitivne struje geita (upravljačke diode) s tim da je prethodno na tiristor narinut napon veći od nule,  $u_v > 0$ . Isklapanje tiristora nastupa padom struje na nulu te tiristor prelazi u stanje nevođenja. Antiparalelni spoj tiristora koristi se kao pretvaračka komponenta te je stoga važno znati princip rada samog tiristora kao pretvaračke komponente.

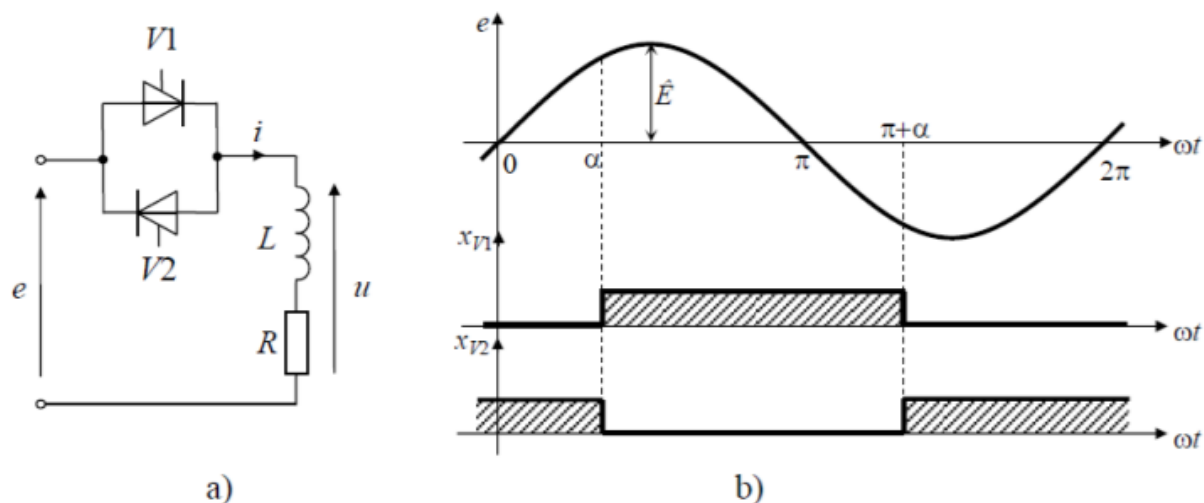
Kuzmanović u literaturi [3] objašnjava strujno-naponske odnose na radnom i induktivnom trošilu. Provedena je detaljna analiza valnih oblika napona i struje u ustaljenom stanju primjenom fazorskog računa kao temelj razumijevanja rada izmjeničnih pretvarača. Također, objašnjeno je određivanje prividne, jalove i radne snage na radnom i induktivnom trošilu.

Flegar u skripti [4] obrađuje zakone komutacije za induktivitet kao element mreže. Na nivou modela u svakom trenutku treba osigurati dobro definiranu mrežu u kojoj ne postoji induktivni čvor kako bi vrijedili Kirchhoffovi zakoni napona i struje. Važno je osigurati neprekidnost valnog oblika funkcije toka induktiviteta što predstavlja matematičku interpretaciju zakona o očuvanju toka. Iz navedenog se zaključuje da je struja elektronički upravljane prigušnice neskokovita.

U dokumentu [5] opisana je oprema koja se koristi u završnom radu s ciljem upoznavanja topologije i ograničenja jednofaznih izravnih pretvarača napona. Također, detaljno je opisana eksperimentalna kartica kojom je ostvarena prigušnica korištena u praktičnom dijelu.

### 3. ANALIZA RADA JEDNOFAZNOG IZRAVNOG IZMJENIČNOG PRETVARAČA NAPONA – FAZNO UPRAVLJANJE

Analiza rada jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona provedena je pod pretpostavkom da je između izmjenične pojne mreže napona  $e = \hat{E} \sin(\omega t)$  i radno-induktivnog trošila parametara otpornosti  $R$  i induktivnosti  $L$  spojena poluupravljljiva dvosmjerna sklopka frekvencije  $f_s = 2f = \omega/\pi$ . Poluupravljljiva dvosmjerna sklopka izvedena je antiparalelnim spojem dvaju tiristora  $V1$  i  $V2$ . Trajanje upravljačkog signala svakog od tiristora je  $180^\circ$ el. uz postojanje mogućnosti njihovog pomicanja „u desno“ za kut okidanja  $\alpha$  u području  $0 \leq \alpha \leq \pi$ . Time je ostvareno fazno upravljanje izmjeničnim pretvaračem. Ranije navede pretpostavke prikazane su na slici 3.1.



**Slika 3.1.** a) Shema analiziranog spoja jednofaznog izmjeničnog pretvarača napona[1]

b) Slijed upravljačkih signala trajanja  $180^\circ$ el. [1]

Pod pretpostavkom kratkog spoja tiristora i u proizvoljnom trenutku  $\omega t = \alpha$  priključenja radno-induktivnog trošila na jednofaznu izmjeničnu pojnu mrežu, struja trošila u početnom trenutku bit će jednaka nuli  $i(\alpha+0) = 0$ . Dobiveni strujni krug moguće je matematički opisati sljedećom jednačinom:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{E} \sin \omega t \quad (3-1)$$



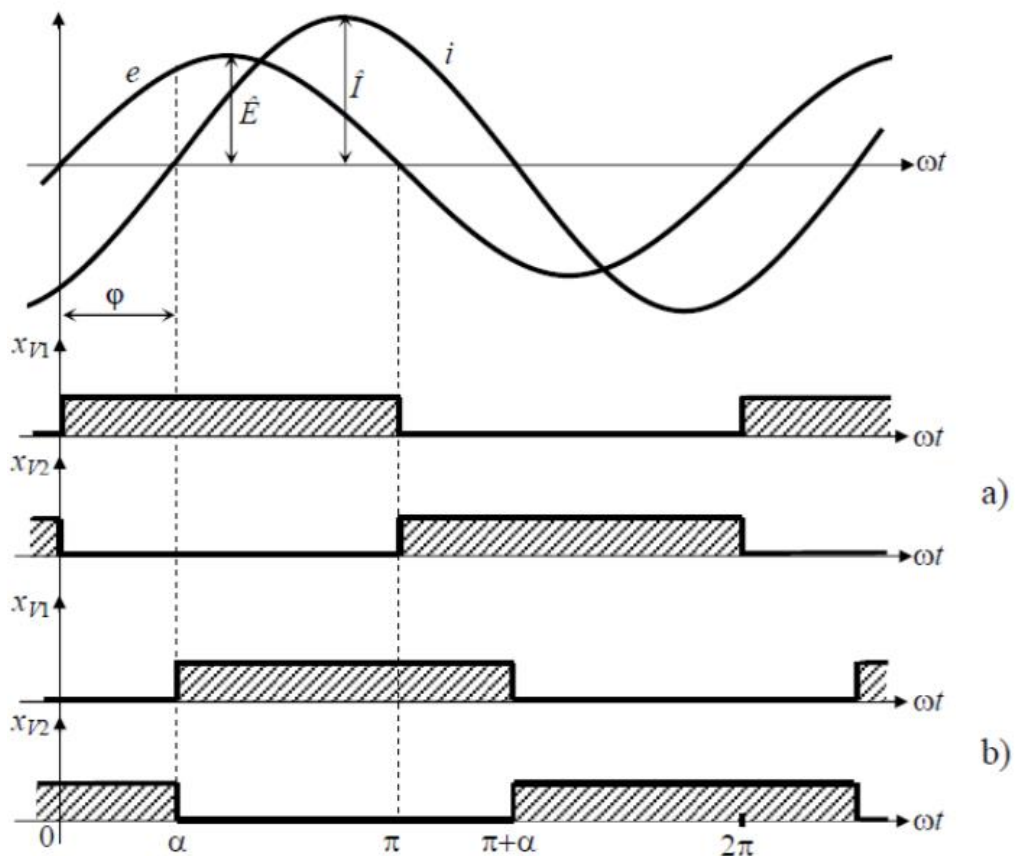
Rješavanjem jednadžbe (3-1) struja trošila predstavljena je izrazom (3-2):

$$i = \frac{\hat{E}}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-(\omega t - \alpha)/\tan \varphi}] \quad (3-2)$$

pri čemu  $Z$  predstavlja modul kompleksne impedancije radno-induktivnog trošila na frekvenciji određenoj izmjeničnim pojnom mrežom, a  $\varphi$  predstavlja kut trošila, odnosno fazni pomak u ustaljenom stanju između napona izmjenične mreže i struje trošila. Modul impedancije i kut trošila računaju se prema izrazima (3-3). Iz karaktera trošila proizlazi da u ustaljenom stanju napon izmjenične mreže prethodi struji trošila. Prema izrazu (3-2) drugi dio jednadžbe predstavlja prijelaznu pojavu koja isčezne nakon završetka te u ustaljenom stanju valni oblici napona i struje imaju iste oblike kao i poticaj[1].

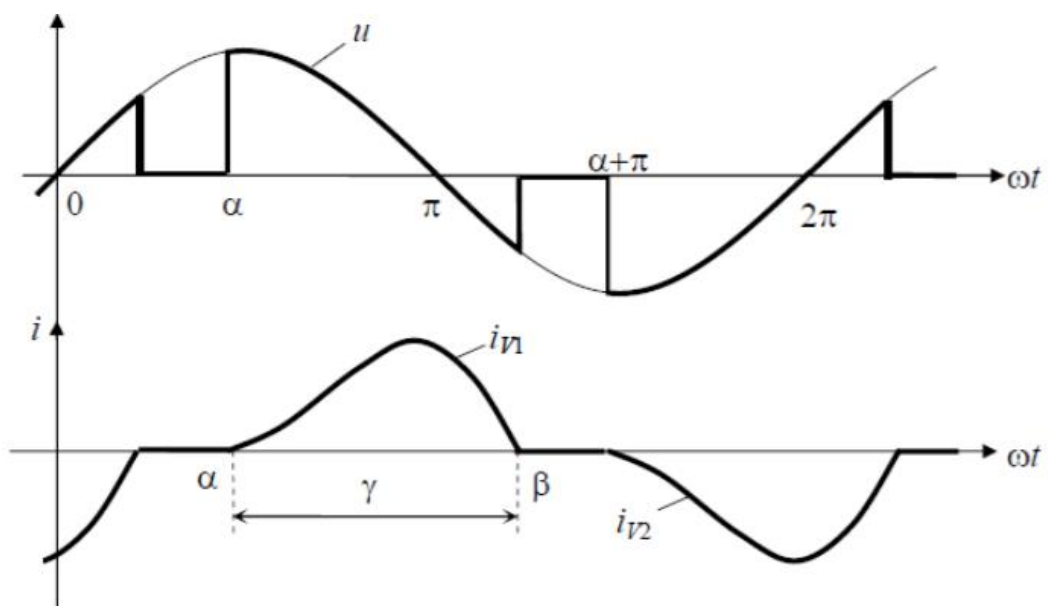
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (3-3)$$

Ako su u ustaljenom stanju kratko spojeni tiristori i istovremeno narinuti upravljački signali na tiristore s kutom okidanja  $\alpha = 0^\circ$  el. prema slici 3.2. valni oblici napona i struje trošila neće se promijeniti. Struja trošila je i dalje sinusna nepromijenjene amplitude iznosa  $\hat{I} = \hat{E}/Z$  te jednakog faznog pomaka  $\varphi$ . Povećanjem kuta okidanja tiristora  $\alpha$  do iznosa  $\alpha = \varphi$ , struja trošila ostaje nepromijenjena jednake amplitude i faznog pomaka. Povećanjem kuta okidanja  $\alpha$  iznad vrijednosti  $\varphi$  dobiva se diskontinuirana struja trošila. Struja trošila u pojedinim intervalima jednaka je nuli što je svojstvo diskontinuiranosti. Hipotetski da je kut okidanja manji od kuta trošila, tiristori se ponašaju kao da su kratko spojeni i odmah nakon pada struje tiristora  $V1$  provede tiristor  $V2$  čime se navedeni proces nastavlja. U slučaju da je kut okidanja veći od kuta trošila, kut vođenja pojedinog tiristora manji je od  $180^\circ$  el., što za posljedicu ima postojanje intervala u kojima ne vodi niti jedan tiristor. U tom je slučaju izmjenični pretvarač napona u diskontinuiranom režimu rada pri čemu je moguće upravljanje efektivnom vrijednošću struje trošila promjenom kuta okidanja iznad vrijednosti kuta trošila  $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ . Analiza rada jednofaznih izmjeničnih pretvarača nije jednostavna što se vidi prema slici 3.3. jer se kut  $\beta$  kada struja pojedinog tiristora padne na nulu određuje iz transcendentne jednadžbe kada se izraz (3-2) izjednači s nulom. U nastavku završnog rada, obaviti će se analiza rada i mjerenja na čistom radnom i induktivnom trošilu koje predstavlja koncept elektronički upravljane prigušnice.



**Slika 3.2.** Valni oblici napona i struje trošila za  $\alpha \leq \varphi$  te slijed upravljačkih signala za:

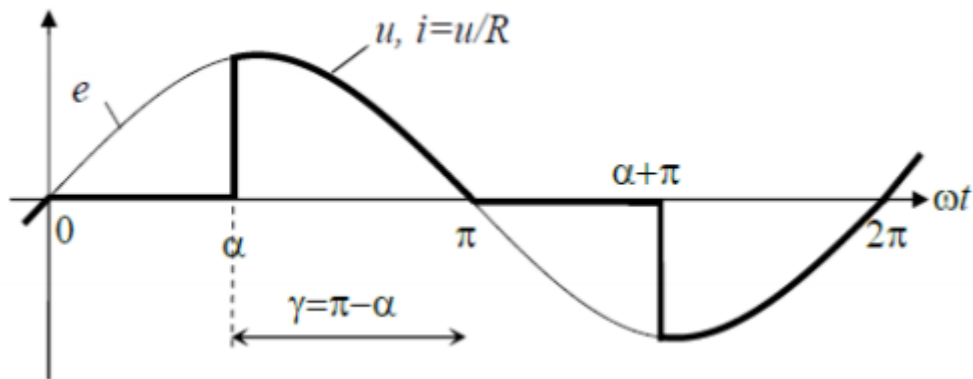
a)  $\alpha = 0^\circ$ el., b)  $\alpha = \varphi$  [1]



**Slika 3.3.** Valni oblik napona i struje trošila u diskontinuiranom načinu rada ( $\alpha > \varphi$ )[1]

### 3.1. Analiza rada izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom

U ovom je primjeru na jednofaznu pojnu mreže napona  $e = \hat{E} \sin(\omega t)$  i na antiparalelni spoj tiristora spojeno čisto radno trošilo otpornosti  $R$ . Kut trošila  $\varphi$  pri tome je jednak nuli, a valni oblik struje trošila jednak je valnom obliku napona trošila. Struja trošila padne na nulu u istom trenutku kao i napon trošila pri čemu se odnos struje trošila i napona dobije prema Ohmovom zakonu. Kut okidanja tiristora uvijek će biti veći od kuta trošila, što znači da neovisno o odabiru kuta okidanja, struja trošila uvijek će biti diskontinuirana.



**Slika 3.4.** Valni oblik napona i struje trošila u slučaju radnog trošila [1]

Prema slici 3.4. proizlazi da je kut vođenja pojedinog tiristora jednak  $\pi - \alpha$  te da valni oblik struje trošila prati valni oblik napona trošila. Efektivna vrijednost napona trošila dobije je primjenom općeg izraza za određivanje efektivnih vrijednosti. Sljedeći postupak prikazuje izračun efektivne vrijednosti napona trošila:

$$U = \sqrt{\frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} u(\omega t)^2 d\omega t}$$

$$U^2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \hat{E}^2 \sin(\omega t)^2 dt + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} \hat{E}^2 \sin(\omega t)^2 dt \right]$$

$$U^2 = \frac{\hat{E}^2}{2\pi} \left[ \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]$$

$$U = \hat{E} \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

Prema krajnjem izrazu (3-4) računa se efektivna vrijednost napona radnog trošila izmjeničnog pretvarača napona. Analogno naponu, računa se efektivna vrijednost struje trošila prema izrazu (3-5).

$$I = \frac{\hat{E}}{R} \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-5)$$

Rastavom valnog oblika struje trošila u Fourierov red vidi se da postoje svi viši neparni harmonici. Prema izrazima (3-6) i (3-7) određuju se koeficijenti Fourierova reda.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos \omega t \, dt \quad (3-6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin \omega t \, dt \quad (3-7)$$

Postupak izračuna koeficijenata osnovnog harmonika struje trošila prikazan je sljedećim postupkom:

$$a_1 = \frac{2}{T} \left[ \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{T}{2}} \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t \cos \omega t \, dt + \int_{\frac{\alpha+\pi}{\omega}}^T \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t \cos \omega t \, dt \right]$$

$$a_1 = \frac{\hat{E}}{\pi R} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t \cos \omega t \, d\omega t + \int_{\alpha+\pi}^{\pi} \sin \omega t \cos \omega t \, d\omega t \right]$$

$$a_1 = \frac{\hat{E}}{2\pi R} (\cos 2\alpha - 1) \quad (3-8)$$

$$b_1 = \frac{2}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t \sin \omega t dt + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t \sin \omega t dt \right]$$

$$b_1 = \frac{\hat{E}}{\pi R} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \omega t)^2 dt + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} (\sin \omega t)^2 dt \right]$$

$$b_1 = \frac{\hat{E}}{2\pi R} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \quad (3-9)$$

$$i(1) = \frac{\hat{E}}{2\pi R} (\cos 2\alpha - 1) \cos \omega t + \frac{\hat{E}}{2\pi R} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \sin \omega t \quad (3-10)$$

Kombiniranjem izraza (3-8) i (3-9) dobije se vremenski oblik osnovnog harmonika struje trošila prema izrazu (3-10). Pomoću izraza (3-10) računa se efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje trošila koja je jednaka izrazu (3-11).

$$I(1) = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\hat{E}}{2\pi R} [(\cos 2\alpha - 1)^2 + (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

Fazni pomak osnovnog harmonika struje trošila u odnosu na napon izmjenične pojne mreže dobije se prema izrazu (3-12).

$$\psi = \varphi[\dot{E}, i(1)] = \tan^{-1} \frac{\cos 2\alpha - 1}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (3-12)$$

Iz izraza (3-12) proizlazi da je kut  $\psi$  negativan neovisno o odabiru kuta okidanja te da se izmjenični pretvarač napona radno opterećen ponaša kao radno-induktivno trošilo u odnosu na izmjeničnu pojnu mrežu. Kut  $\psi$  mijenja se u području  $-\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq 0$ .

Preostaje odrediti djelatnu, jalovu i prividnu snagu te faktor snage radno opterećenog izmjeničnog pretvarača napona.

Djelatna snaga radno opterećenog izmjeničnog pretvarača napona je srednja vrijednost trenutne snage koja se računa prema izrazu (3-13).

$$P = \frac{1}{\omega T} \int_0^{\omega T} u(\omega t) i(\omega t) d\omega t \quad (3-13)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \hat{E} \sin \omega t \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t d\omega t + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} \hat{E} \sin \omega t \frac{\hat{E}}{R} \sin \omega t d\omega t \right]$$

$$P = \frac{\hat{E}^2}{R} \frac{1}{4\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \quad (3-14)$$

Uvrštavanjem trenutnih vrijednosti napona i struje trošila u jednadžbu (3-13) dobije se krajnji izraz za djelatnu snagu radno opterećenog izmjeničnog pretvarača prema izrazu (3-14).

Prividna snaga radno opterećenog izmjeničnog pretvarača napona računa se kao umnožak efektivnih vrijednosti napona i struje trošila izmjeničnog pretvarača prema izrazu (3-15).

$$S = UI \quad (3-15)$$

Izračun faktora snage izmjeničnog pretvarača napona prikazuje sljedeći postupak:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{\frac{\hat{E}}{R} \frac{1}{4\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha)}{\frac{\hat{E}}{\sqrt{2}} \frac{\hat{E}}{R} \left[ \frac{1}{4\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (3-16)$$

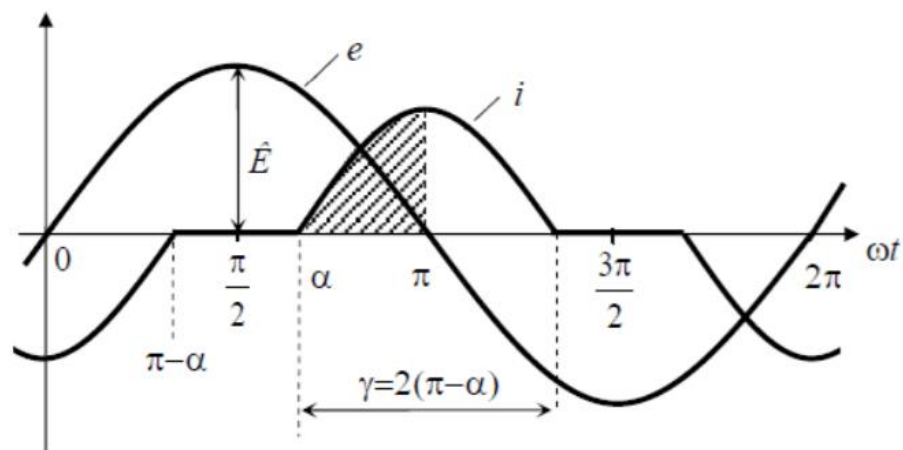
Prema izrazu (3-16) računa se faktor snage radno opterećenog izmjeničnog pretvarača napona.

### 3.2. Koncept elektronički upravljane prigušnice – induktivno trošilo

Elektronički upravljane prigušnice moguće je ostvariti s pomoću induktivno opterećenog pretvarača napona. Spajanjem induktivnog trošila (prigušnice) na antiparalelni spoj tiristora i jednofaznu pojnu mrežu napona efektivne vrijednosti  $E$  te promjenom kuta okidanja mijenja se efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje induktivnog trošila  $I(1)$ . Struja trošila pri tome je diskontinuirana. Na taj način može se utjecati na induktivnost prigušnice priključene izmjeničnom pretvaraču napona. Induktivnost prigušnice je promjenjiva i ovisi o efektivnoj vrijednosti napona pojne mreže i efektivnoj vrijednosti osnovnog harmonika struje trošila prema izrazu (3-17).

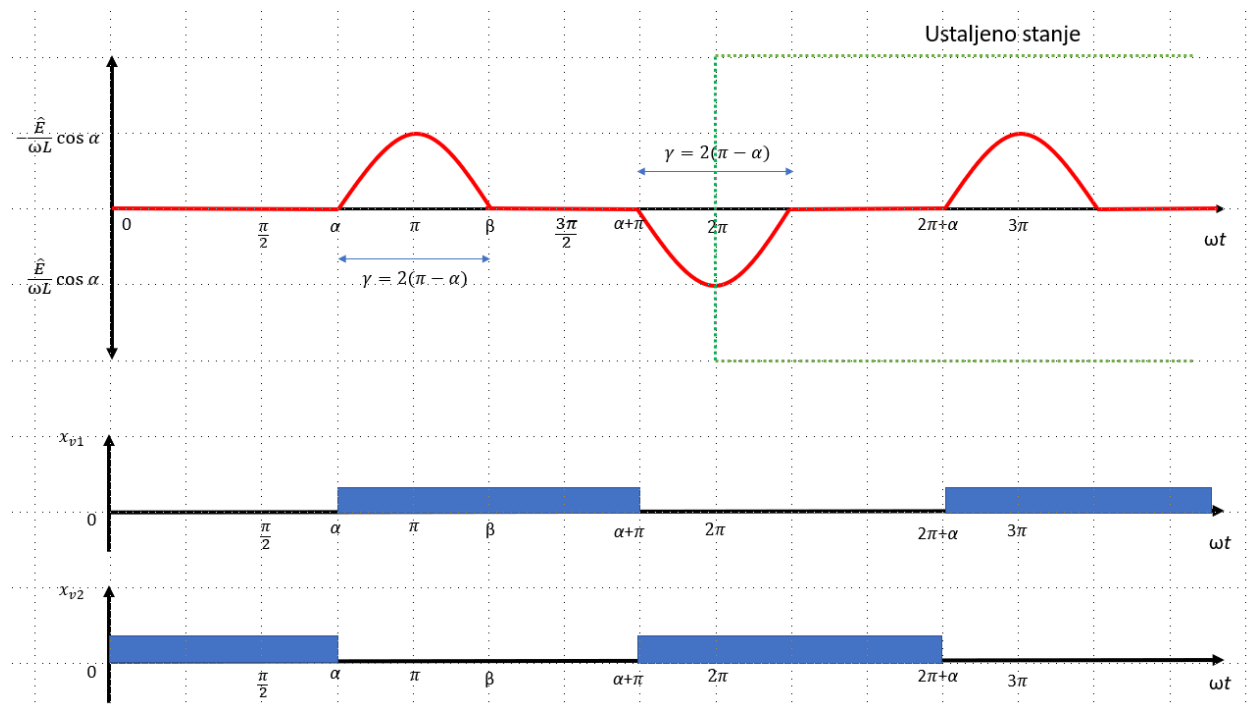
$$L_{ekv}(\alpha) = \frac{E}{\omega I(1)} \quad (3-17)$$

Otpornost prigušnice kojom je opterećen izmjenični pretvarač napona obično je zanemarivo mala pa se u analizi rada utjecaj otpornosti može zanemariti. Zbog nepostojanja otpornosti prigušnice, proizlazi da je kut trošila  $\varphi$  jednak  $\pi/2$  odnosno  $90^\circ$ el. Da bi bilo moguće upravljati efektivnom vrijednošću struje trošila, kut okidanja mora biti veći od kuta trošila. Proizlazi da je za upravljanje efektivnom vrijednosti struje trošila potrebno odabrati kut okidanja u području  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  [1].



Slika 3.5. Valni oblik napona i struje elektronički upravljane prigušnice [1]

Slika 3.5. prikazuje valne oblike napona i struje prigušnice u ustaljenom stanju pri čemu je kut vođenja pojedinog tiristora  $2(\pi - \alpha)$ .



Slika 3.6. Valni oblik struje prigušnice tijekom prijelaznog stanja te sljed upravljačkih signala

Prijelazno stanje struje prigušnice prema slici 3.6. prethodi ustaljenom stanju prema slici 3.5. i dobije se analizom rada uz pretpostavku da je početna struja prigušnice jednaka nuli.

Valni oblik struje prigušnice u ustaljenom stanju prema slici 3.5. jednak je

$$i_L(t) \begin{cases} -\frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \omega t - \frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \alpha & 0 \leq \omega t \leq \pi, \quad \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \\ 0 \text{ A} & \pi - \alpha \leq \omega t \leq \alpha, \quad 2\pi - \alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha \\ -\frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \omega t + \frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \alpha & \alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha \end{cases} \quad (3-18)$$



Na temelju valnog oblika struje prigušnice i primjene izraza (3-6) i (3-7) lako se odrede koeficijenti osnovnog harmonika struje prigušnice. Struja prigušnice parna je funkcija pa se odmah može zaključiti da je koeficijent  $b_1$  jednak nuli. Koeficijent  $a_1$  različit je od nule i određuje se prema izrazu (3-19).

$$a_1 = -\frac{\hat{E}}{\pi\omega L} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \quad (3-19)$$

Kombinacijom dobivenih koeficijenata osnovnog harmonika struje prigušnice odredi se efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje prigušnice koja je jednaka izrazu (3-20).

$$I(1) = \frac{E}{\omega L} \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi} = \frac{E}{\omega L_{ekv}(\alpha)} \quad (3-20)$$

Iz izraza (3-20) proizlazi da je nadomjesna induktivnost elektronički upravljane prigušnice jednaka izrazu (3-21) pri čemu je kut okidanja u području  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ .

$$L_{ekv}(\alpha) = L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (3-21)$$

Prema valnom obliku struje prigušnice računa se efektivna vrijednost struje prigušnice koja je jednaka

$$I_L^2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi-\alpha} \left( -\frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \omega t - \frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \alpha \right)^2 d\omega t + \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \left( -\frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \omega t + \frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \alpha \right)^2 d\omega t + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \left( -\frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \omega t - \frac{\hat{E}}{\omega L} \cos \alpha \right)^2 d\omega t \right]$$

$$I_L = \frac{E}{\omega L} \left[ \frac{2(\pi - \alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3 \sin 2\alpha}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-22)$$

Iz izraza (3-22) određuje se efektivna vrijednost struje elektronički upravljane prigušnice.

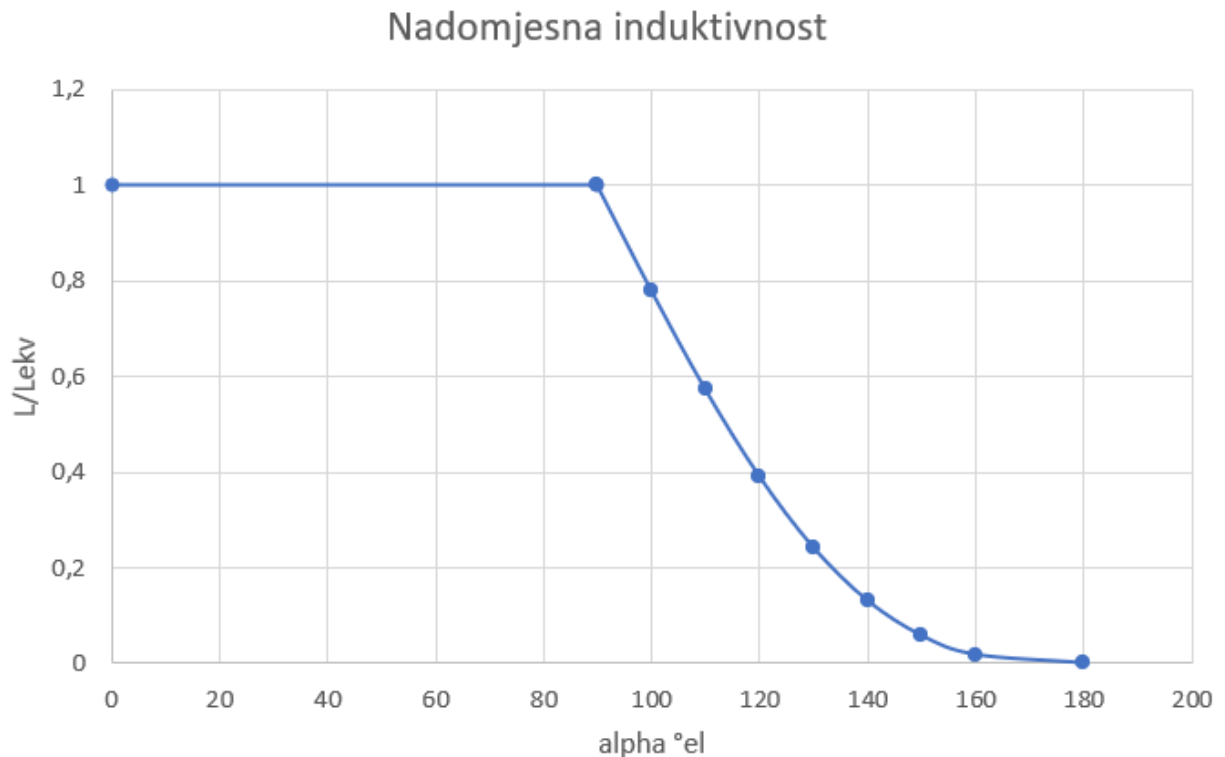
Djelatna snaga elektronički upravljane prigušnice jednaka je nuli ( $P_L = 0$ ) jer su istosmjerna snaga i izmjenična snaga prigušnice jednake nuli, a njihova suma čini djelatnu snagu. Zbog nepostojanja djelatne snage, faktor snage sklopa jednak je nuli prema izrazu (3-23)

$$\lambda = \frac{P_L}{S} = 0 \quad (3-23)$$

pri čemu je prividna snaga prigušnice određena izrazom (3-24).

$$S = EI_L = \frac{\hat{E}^2}{2\omega L} \left[ \frac{2(\pi - \alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3 \sin 2\alpha}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-24)$$

Na temelju izraza (3-21) analizirani sklop ponaša se kao elektronički upravljana prigušnica čija induktivnost ovisi o odabiru kuta okidanja u području upravljanja  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ . Induktivnost prigušnice, prikazana na slici 3.7., konstantna je do kuta trošila  $\pi/2$ , a zatim se mijenja prema izrazu (3-21).



**Slika 3.7.** Nadomjesna induktivnost elektronički upravljane prigušnice

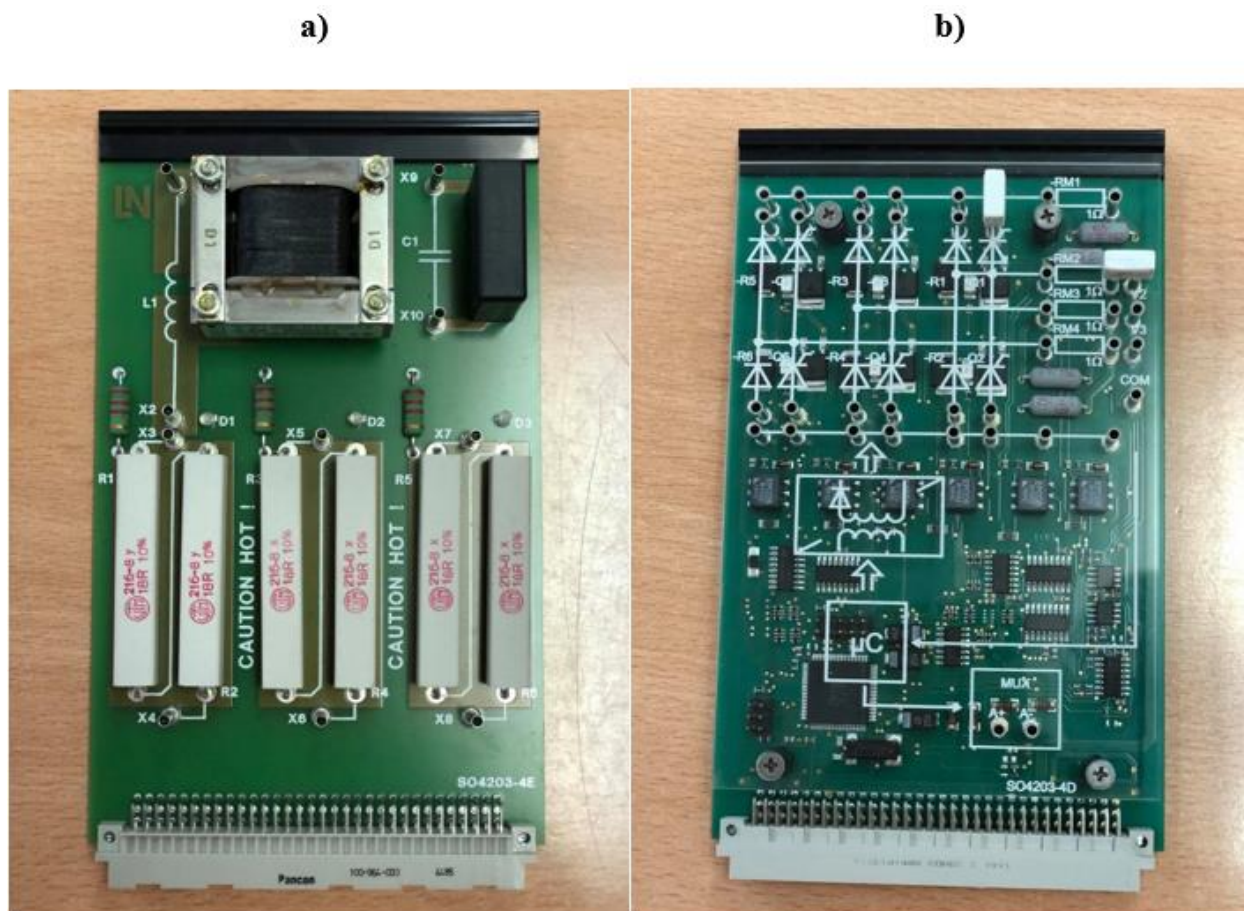
#### 4. EKSPERIMENTALNI DIO – KORIŠTENA OPREMA I MJERENJA NA RADNOM I INDUKTIVNOM TROŠILU

U eksperimentalnom dijelu završnog rada upotrebljava se didaktičko-multimedijalna oprema proizvođača Lucas-Nülle. Lucas-Nülle, tvrtka je sa sjedištem u Njemačkoj koja razvija i proizvodi sustave obuke za tehnologije u područjima kao što su elektrotehnika, elektronika, automatika, mehatronika, strojarstvo i komunikacijska tehnologija. Uz didaktičko-multimedijalnu opremu Lucas-Nülle, potrebno je instalirati program LabSoft na računalu pomoću kojeg se prikazuju rezultati pokusa i upravlja samim pokusima. LabSoft ima mogućnosti korištenja virtualnih mjernih instrumenata poput voltmetra, ampermetra, vatmetra i virtualnog osciloskopa. Program LabSoft nalazi se na CD-u koji se dobije u sklopu opreme. Povezivanje opreme i računala vrši se pomoću USB konekcije, a didaktičko-multimedijalna oprema sastoji se od UniTrain sučelja i dva eksperimentatora koji sadrže utore za eksperimentalne kartice. Slika 4.1. preuzeta je iz [5] i prikazuje korištenu opremu.



Slika 4.1. Didaktičko-multimedijalna oprema (UniTrain sučelje)

Korištene eksperimentalne kartice sadrže poluvodičke komponente i različite vrste trošila, a prikazane su na slici 4.2.



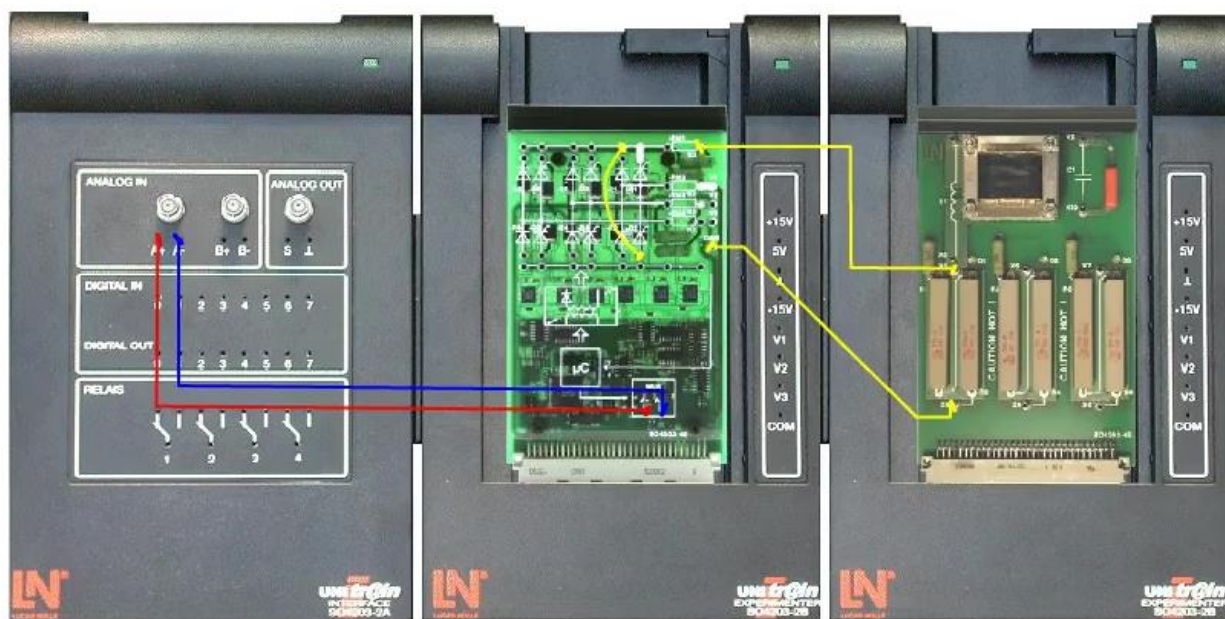
**Slika 4.2.** a) kartica SO4203-4E, pasivno RLC trošilo

b) kartica SO4203-4D, poluvodičke sklopne komponente

Eksperimentalna kartica SO4203-4E sadrži tri skupine otpornika otpornosti  $36 \Omega$  i prigušnicu induktivnosti 200 mH koji će se koristiti za potrebe pokusa. Eksperimentalna kartica SO4203-4D sadrži poluvodičke sklopne komponente (tiristore i diode) i upravljačke sklopove kojima će biti realiziran antiparalelni spoj tiristora. U nastavku su prikazana mjerenja na radnom i induktivnom trošilu.

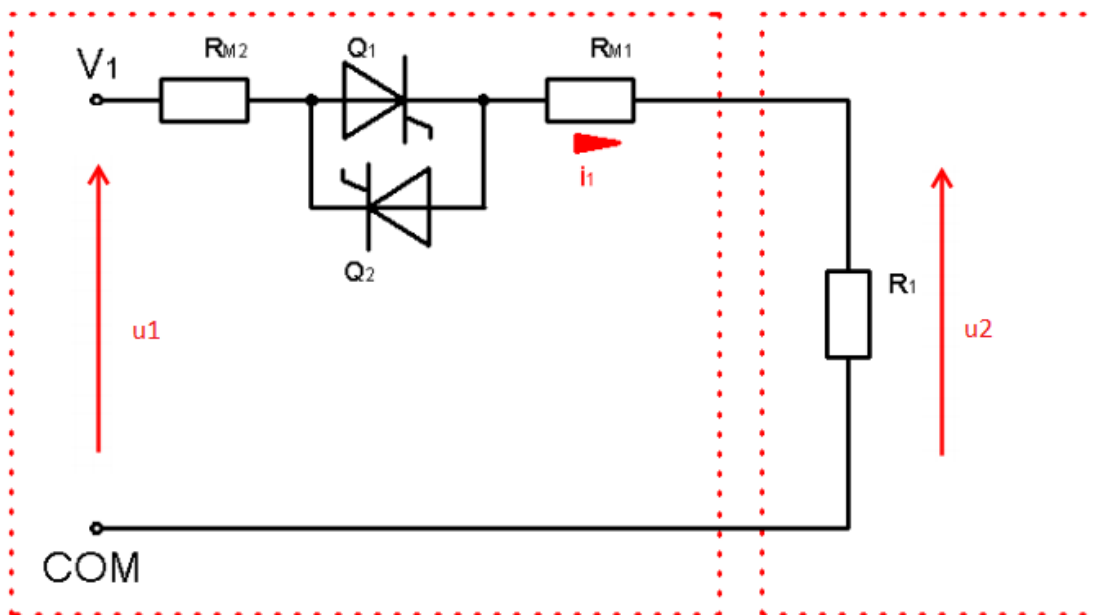
#### 4.1. Mjerenje na izravnom izmjeničnom pretvaraču napona u slučaju radnog opterećenja

U ovom potpoglavlju opisana su mjerenja na jednofaznom izravnom izmjeničnom pretvaraču napona opterećenim radnim trošilom korištenjem navedene didaktičko-multimedijalne opreme Lucas-Nülle i programa LabSoft. Analiza rada jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom provedena je u potpoglavlju 3.1. te se na osnovi mjerenja nastoje provjeriti matematički proračuni provedeni za navedeno trošilo. Prije početka mjerenja, opremu je potrebno povezati s računalom putem USB konekcije i ubaciti eksperimentalne kartice na za to predviđena mjesta u dva eksperimentatora. Zatim, povezati vodičima eksperimentalne kartice i UniTrain sučelje prema slici 4.3. te uključiti napajanje makete pritiskom na tipku Power sa stražnje strane UniTrain sučelja.



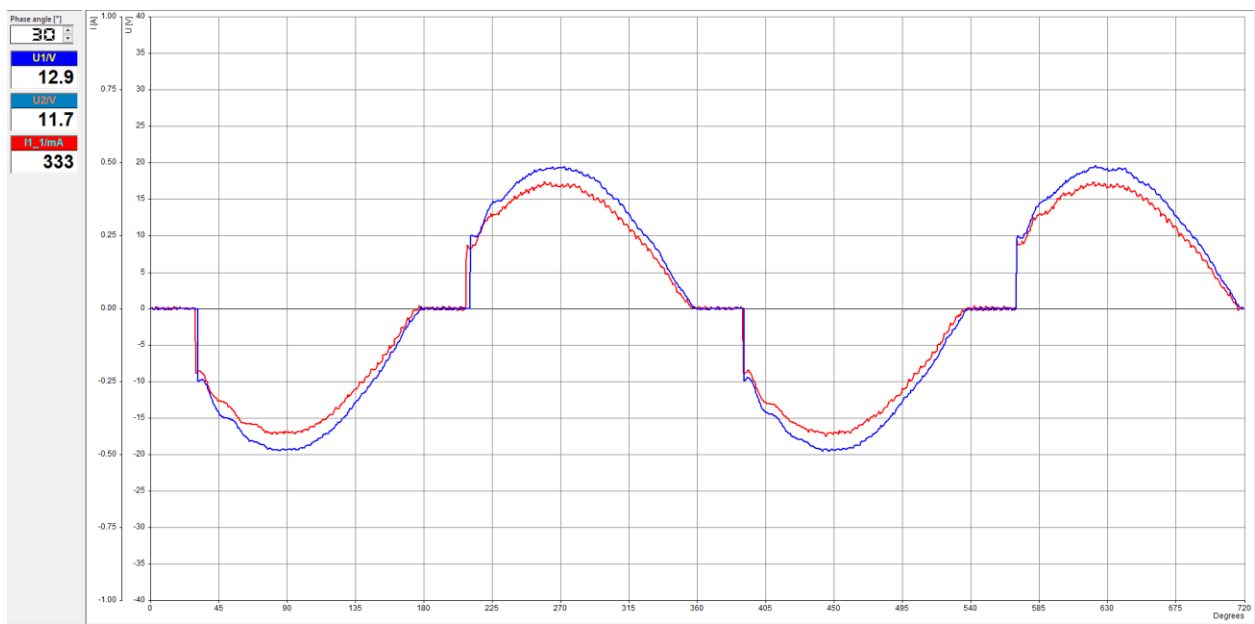
Slika 4.3. Način povezivanja opreme u slučaju radnog opterećenja [6]

Na slici 4.3. prikazan je način spajanja u slučaju prve skupine otpora otpornosti  $36 \Omega$  na eksperimentalnoj kartici SO4203-4E. Eksperimentalna kartica SO4203-4D sadrži dva otpora otpornosti jednog ohma koje treba uzeti u obzir pri izračunu ukupne otpornosti radnog trošila. Shema dobivenog spoja izmjeničnog pretvarača prikazana je prema slici 4.4.

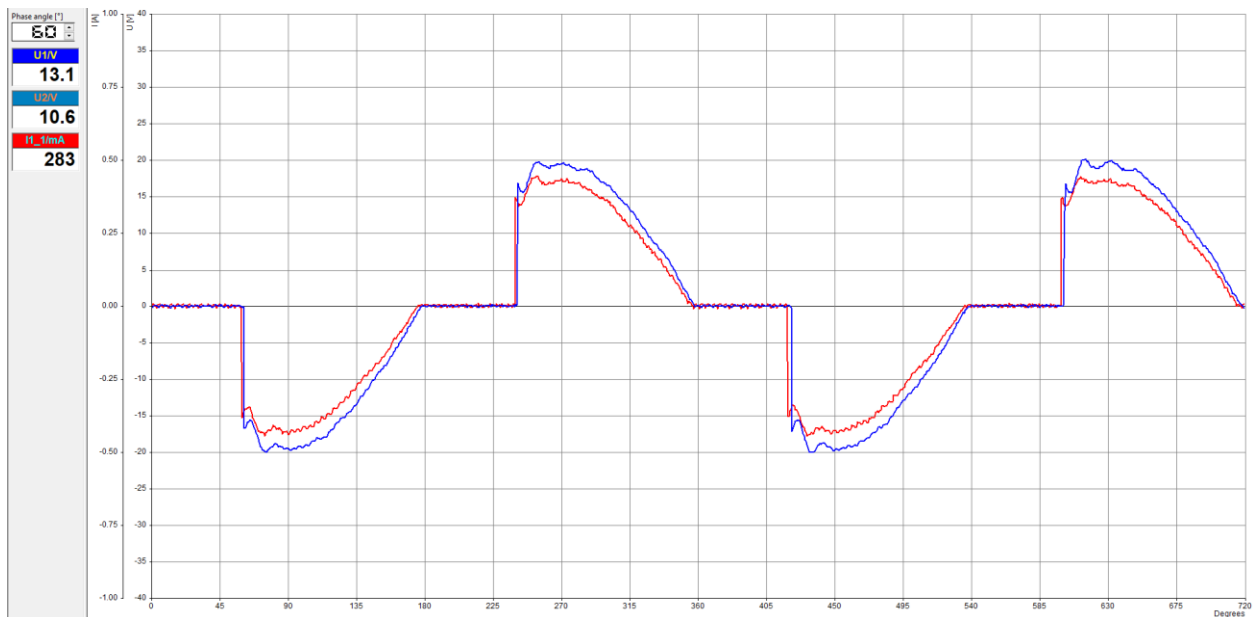


**Slika 4.4.** Shema spoja izravnog izmjeničnog pretvarača napona s radnim trošilom [6]

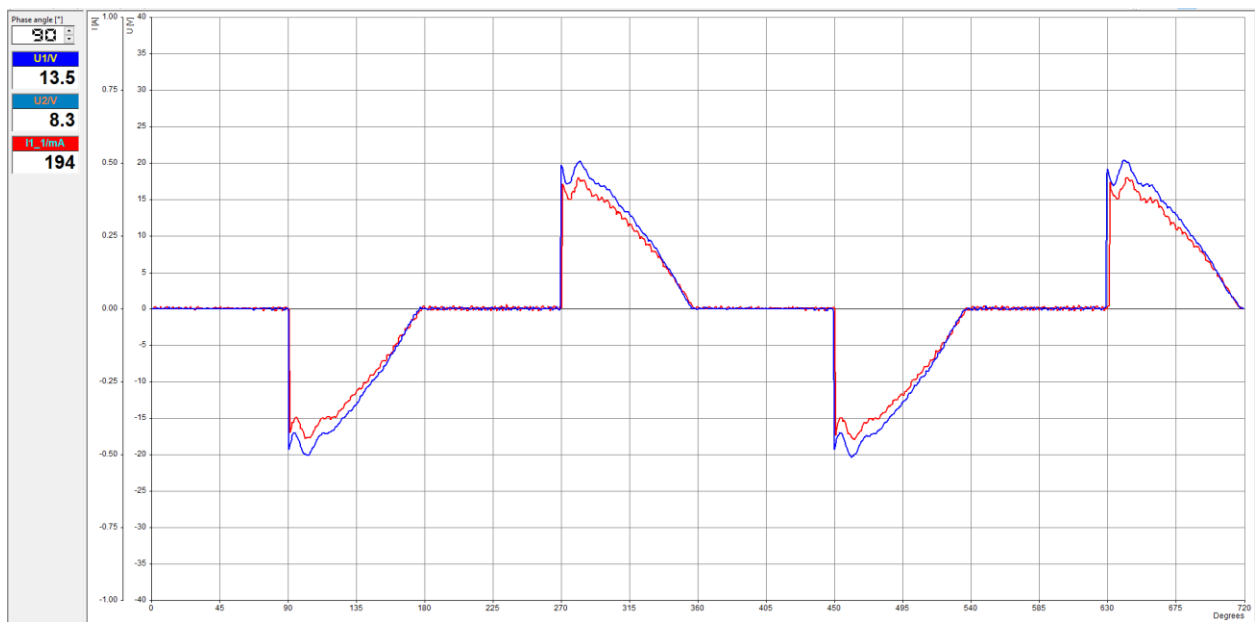
Prema slici 4.4.,  $R_{M1}$  i  $R_{M2}$  predstavljaju dodatne otpore otpornosti jednog ohma, a  $R_1$  otpornost radnog trošila koje u ovom slučaju iznosi  $36 \Omega$ . Nakon spajanja opreme, potrebno je otvoriti program LabSoft na računalu pomoću kojeg se upravlja maketom i prikazuju rezultati mjerenja. Mjerenja se provode promjenom kuta okidanja čime se dobivaju različiti valni oblici napona i struje trošila. Uz valne oblike napona i struje trošila, program nudi izračun različitih parametara signala kao što su efektivne i srednje vrijednosti, faktor snage, harmonijsku analizu i mnoge druge. Mjerenje se započinje odabirom odgovarajućeg kuta okidanja te pritiskom na tipku Start unutar programa LabSoft. U nastavku, prikazani su rezultati mjerenja za pet kutova okidanja ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ). Crveni valni oblik predstavlja struju trošila dok plavi valni oblik predstavlja napon trošila.



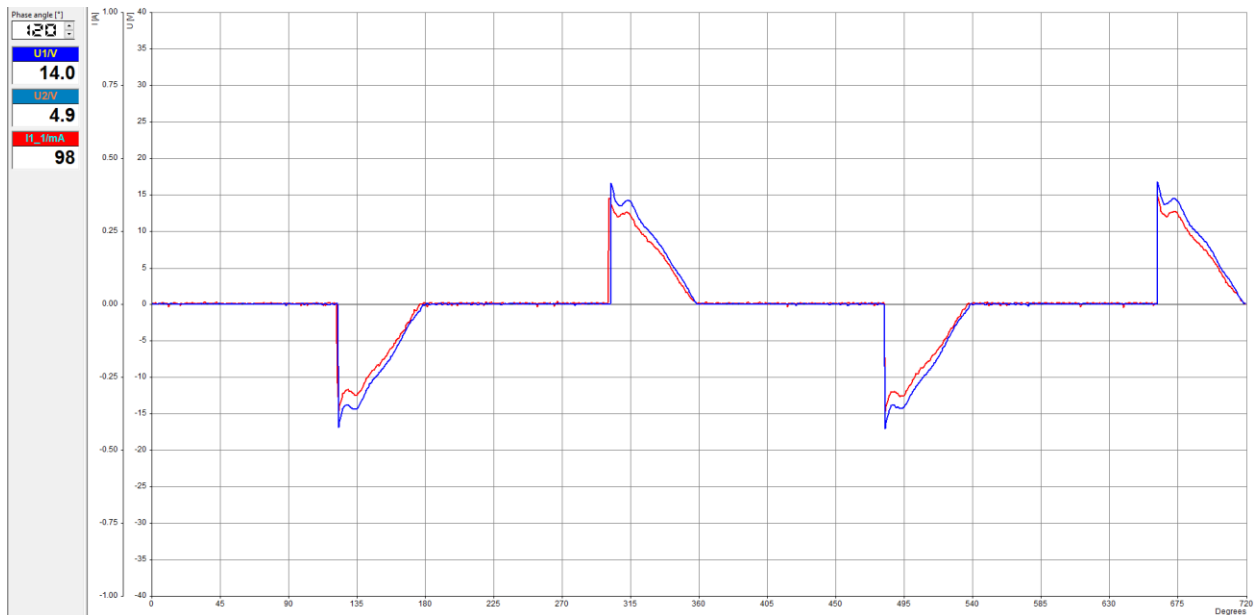
**Slika 4.5.** Valni oblici napona i struje radnog trošila pri kutu okidanja  $30^\circ$



**Slika 4.6.** Valni oblici napona i struje radnog trošila pri kutu okidanja  $60^\circ$

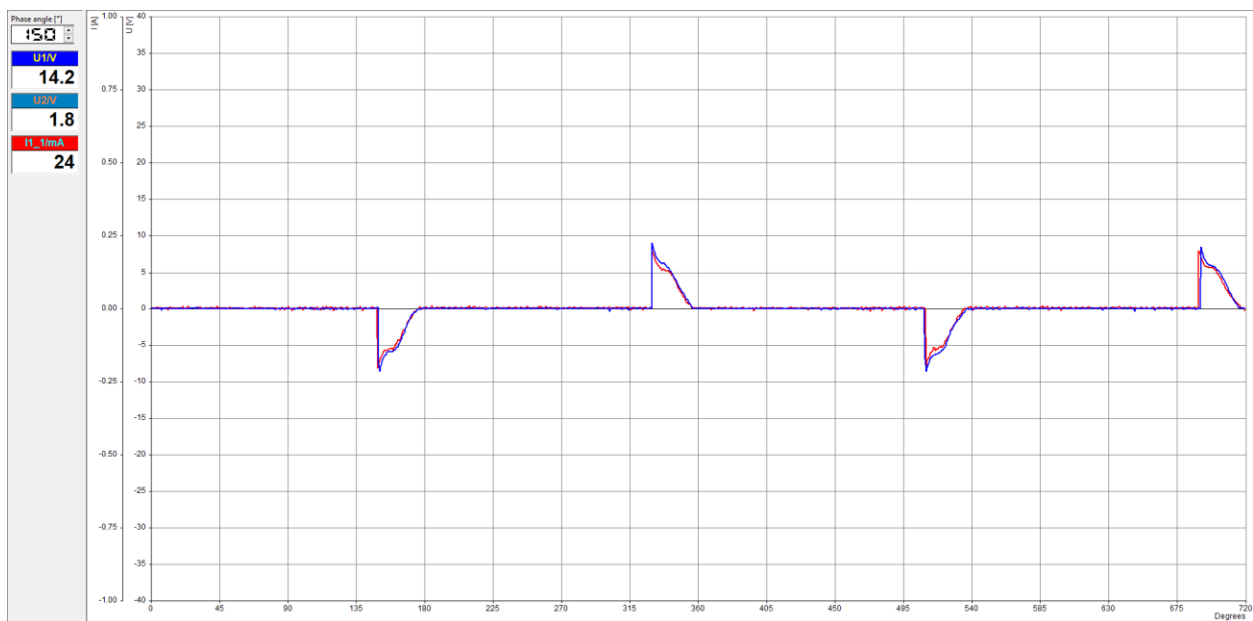


**Slika 4.7.** Valni oblici napona i struje radnog trošila pri kutu okidanja  $90^\circ$



**Slika 4.8.** Valni oblici napona i struje radnog trošila pri kutu okidanja  $120^\circ$





**Slika 4.9.** Valni oblici napona i struje radnog trošila pri kutu okidanja  $150^\circ$

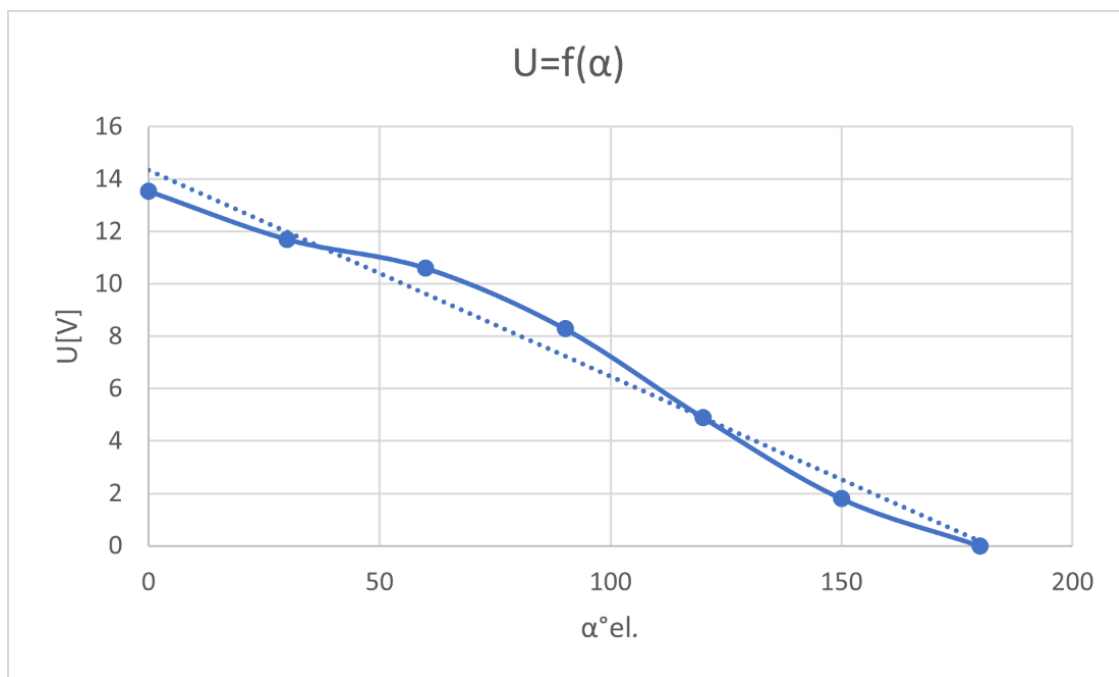
Na temelju priloženih slika od 4.5. do 4.9. koje prikazuju valne oblike napona i struje trošila može se zaključiti da se povećanjem kuta okidanja smanjuje efektivna vrijednost napona i struje trošila. Površina koju zatvaraju valni oblici napona i struje trošila s vremenskom osi smanjuje se što dovodi do smanjenja efektivnih vrijednosti.

**Tablica 4.1.** Izmjerene efektivne vrijednosti napona trošila u ovisnosti o kutu okidanja

$\alpha^\circ$ el.	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$150^\circ$	$180^\circ$
$U_\alpha$ [V]	13,54	11,7	10,6	8,3	4,9	1,8	0

U tablici 4.1. prikazano je smanjenje efektivne vrijednosti napona trošila u slučaju povećanja kuta okidanja. Odabirom različitih kutova okidanja moguće je upravljati intenzitetom rasvjete i grijačima u kojima se upotrebljavaju radno opterećeni pretvarači napona.

Veza između efektivne vrijednosti napona trošila i kuta okidanja dana je slikom 4.10. Grafički prikaz moguće je približno opisati pravcem.



**Slika 4.10.** Ovisnost efektivne vrijednosti napona trošila o kutu okidanja

Izmjerena efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje trošila pri kutu okidanja  $60^\circ$  el. jednaka je 283 mA. Na temelju (3-11) može se utvrditi točnost proračuna

$$I_{30^\circ}(1) = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{13,1\sqrt{2}}{2\pi 38} \left[ \left( \cos 2\frac{\pi}{3} - 1 \right)^2 + \left( 2\left(\pi - \frac{\pi}{3}\right) + \sin 2\frac{\pi}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 289,2939 \text{ mA} \quad (4-1)$$

pri čemu je ukupna otpornost  $38 \Omega$ , vršna vrijednost napona pojne mreže  $13,1\sqrt{2}$  i kut okidanja  $\pi/3$  radijana. Prema (4-1), izračunata vrijednost osnovnog harmonika struje trošila odgovara izmjerenoj vrijednosti uz minimalnu pogrešku što govori o točnosti provedene analize rada.

Faktor snage radno opterećenog pretvarača napona dobije primjenom izraza (3-16).

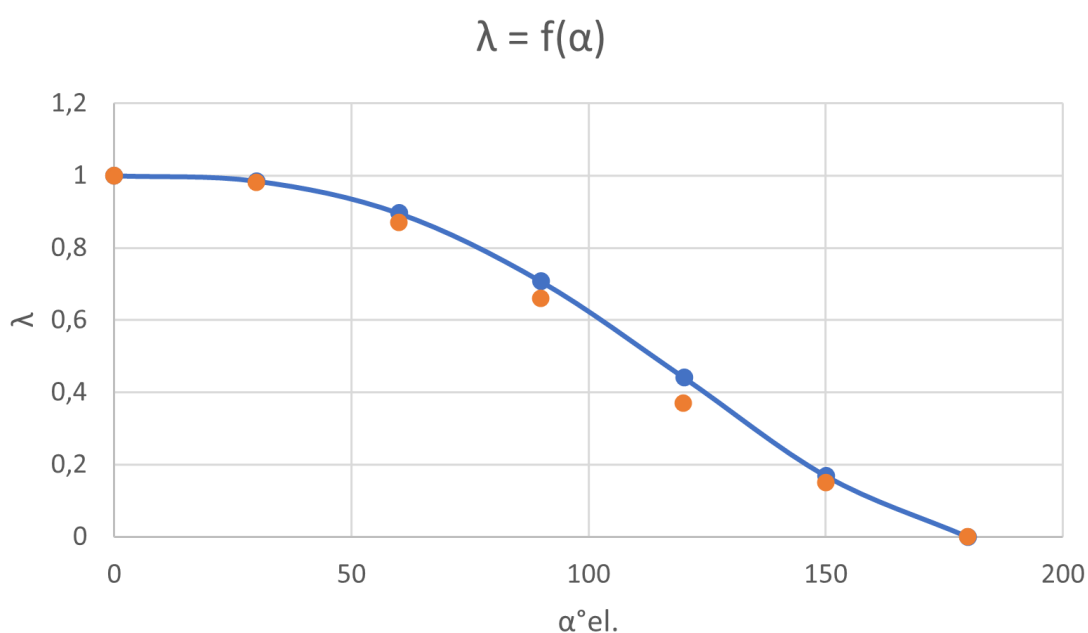
$$\lambda = \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}}$$

U tablici 4.2. prikazani su izračunati faktori snage radno opterećenog pretvarača napona za korištene kutove okidanja.

**Tablica 4.2.** Izračunate vrijednosti faktora snage za različite kutove okidanja

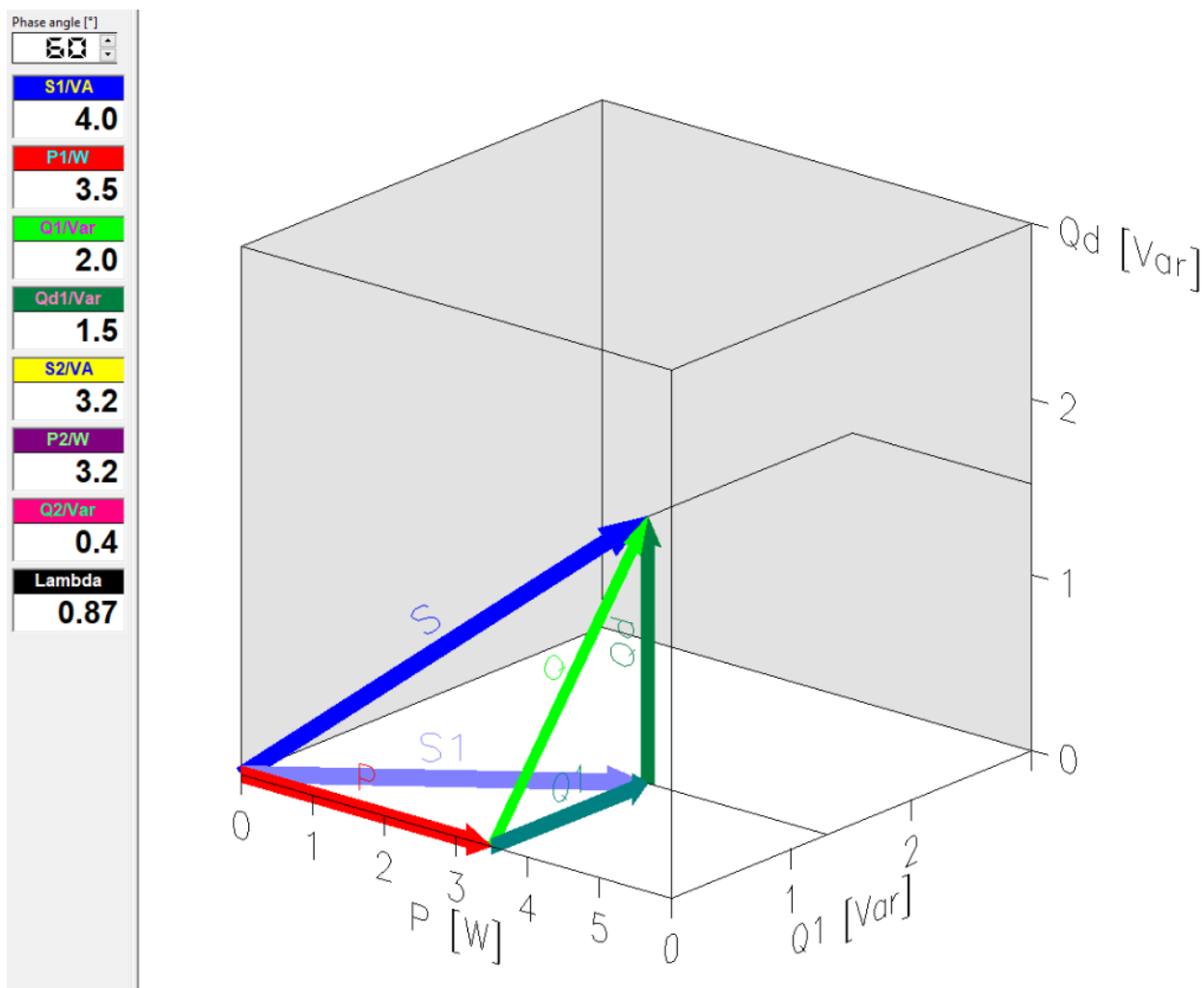
$\alpha$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$\lambda$	1	0,985	0,896	0,707	0,442	0,169	0

Iz tablice 4.2. vidljivo je smanjenje faktora snage radno opterećenog izravnog izmjeničnog pretvarača napona uslijed povećanja kuta okidanja. Faktor snage najveći je u slučaju kratkog spoja tiristora, a najmanji u slučaju kuta okidanja 180° el. pri čemu tiristori nikada ne uklapaju.



**Slika 4.11.** Faktor snage  $\lambda$  u ovisnosti o kutu okidanja  $\alpha$  za jednofazni regulator napona

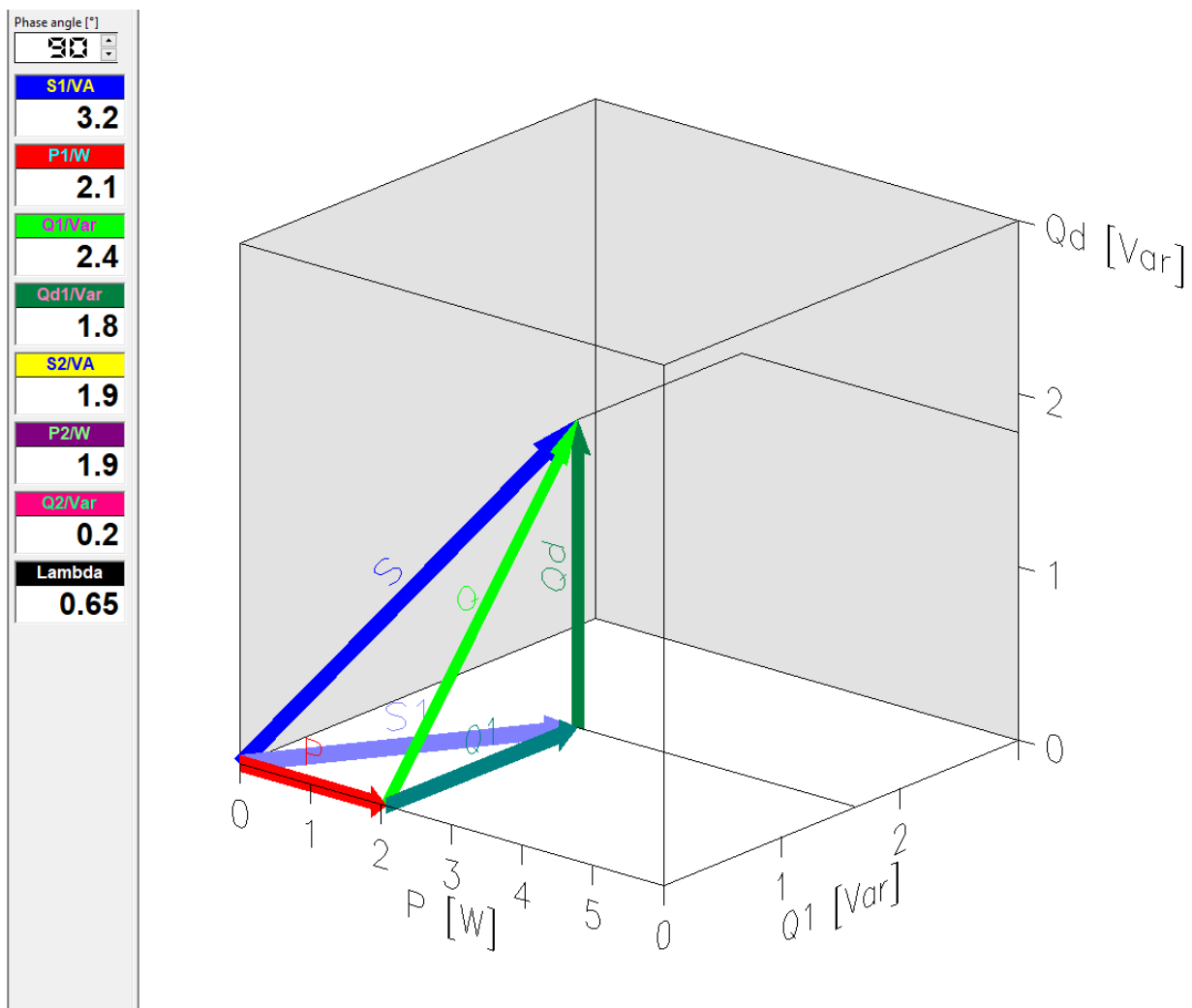
Na slici 4.11. prikazana je ovisnost faktora snage radno opterećenog izravnog izmjeničnog pretvarača napona o odabiru kuta okidanja tiristora dobivena primjenom izraza (3-16). Narančaste točke predstavljaju izmjerene faktore snage pri promjeni kuta okidanja.



**Slika 4.12.** Trodimenzionalni prikaz snaga radno opterećenog izmjeničnog pretvarača  $\alpha=60^\circ$

Na slici 4.12. trodimenzionalni je prikaz snaga pri kutu okidanja  $\pi/3$ . Također, prikazan je iznos prividne, radne i jalove snage te faktor snage  $\lambda$ .

Prema izrazu (3-16) faktor snage pretvarača pri kutu  $60^\circ$  el. je  $\lambda = 0,896$  dok je izmjereni faktor snage  $\lambda = 0,87$ . Do odstupanja dolazi zbog nesavršenosti mjerne opreme i parazitnih otpora koji utječu na rezultate mjerenja.



**Slika 4.13.** Trodimenzionalni prikaz snaga radno opterećenog izmjeničnog pretvarača  $\alpha=90^\circ$

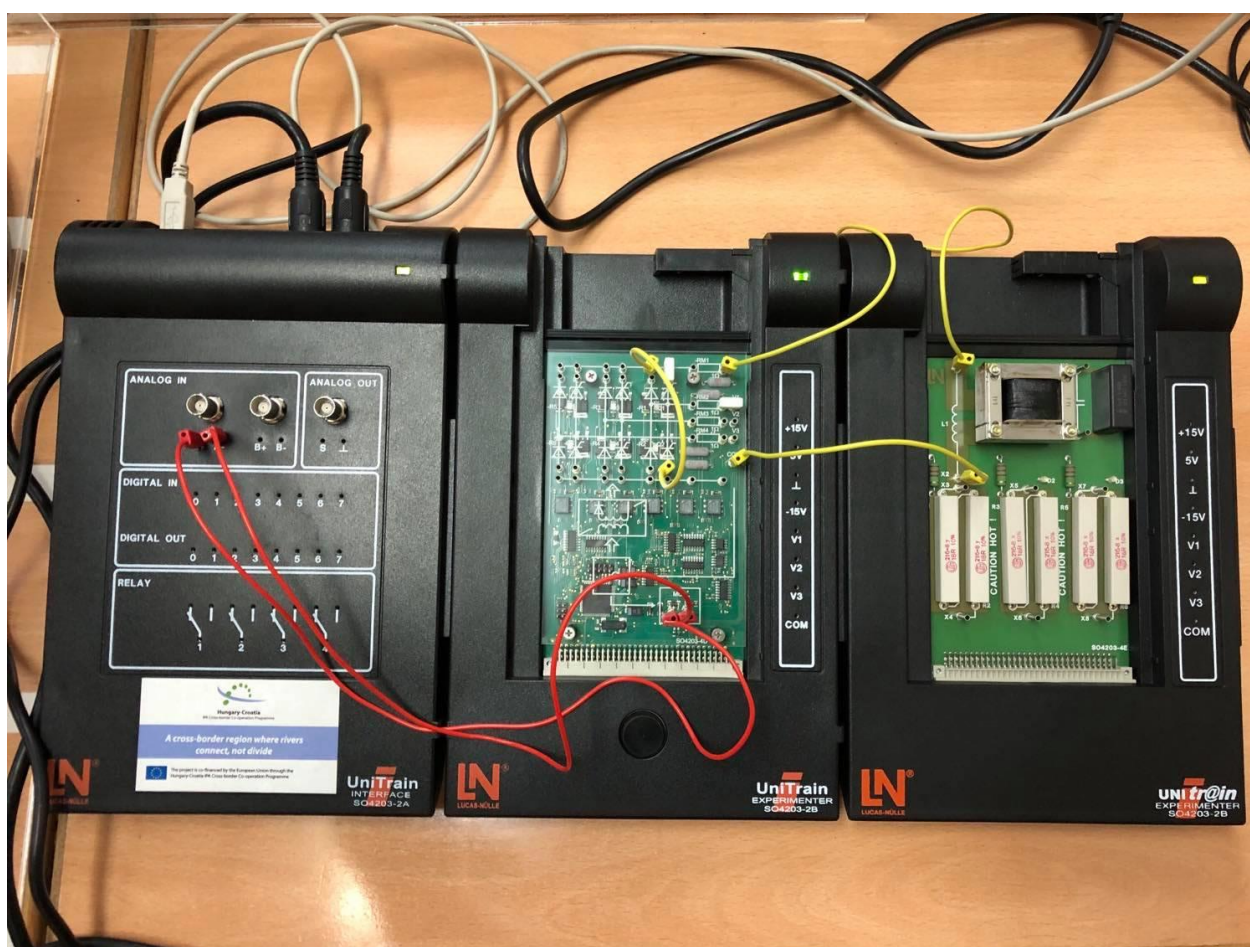
Smanjenje efektivnih vrijednosti napona i struja trošila uslijed povećanja kuta okidanja utječe na prividnu i radnu snagu pretvarača napona. Slika 4.13. koja prikazuje trodimenzionalan prikaz snaga pretvarača u slučaju kuta okidanja  $\pi/2$ , ukazuje na smanjenje prividne, radne i jalove snage pretvarača. Također, smanjuje se faktor snage koji odstupa od izračunate vrijednosti navedenoj u tablici 4.2.

## 4.2. Elektronički upravljana prigušnica – mjerenje na induktivnom trošilu

Korištena mjerna oprema i postupak mjerenja na induktivnom trošilu, analogni su mjerenju u slučaju radnog trošila, samo što se umjesto radnog trošila koristi induktivno trošilo u obliku prigušnice integrirane unutar eksperimentalne kartice SO4203-4E i vanjske prigušnice. Mjerenja se provode za dvije različite prigušnice kako bi se elektronički upravljalo induktivnošću prigušnice i usporedili dobiveni valni oblici. Analiza rada jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona induktivno opterećenog provedena je i detaljno opisana u potpoglavlju 3.2.

### 4.2.1. Prigušnica integrirana u eksperimentalnu karticu SO4203-4E

Prije početka mjerenja na integriranoj prigušnici potrebno je odrediti induktivnost prigušnice  $L$  i ohmski otpor prigušnice  $R$ . Radi se o realnoj prigušnici pa njezin otpor nije zanemariv.



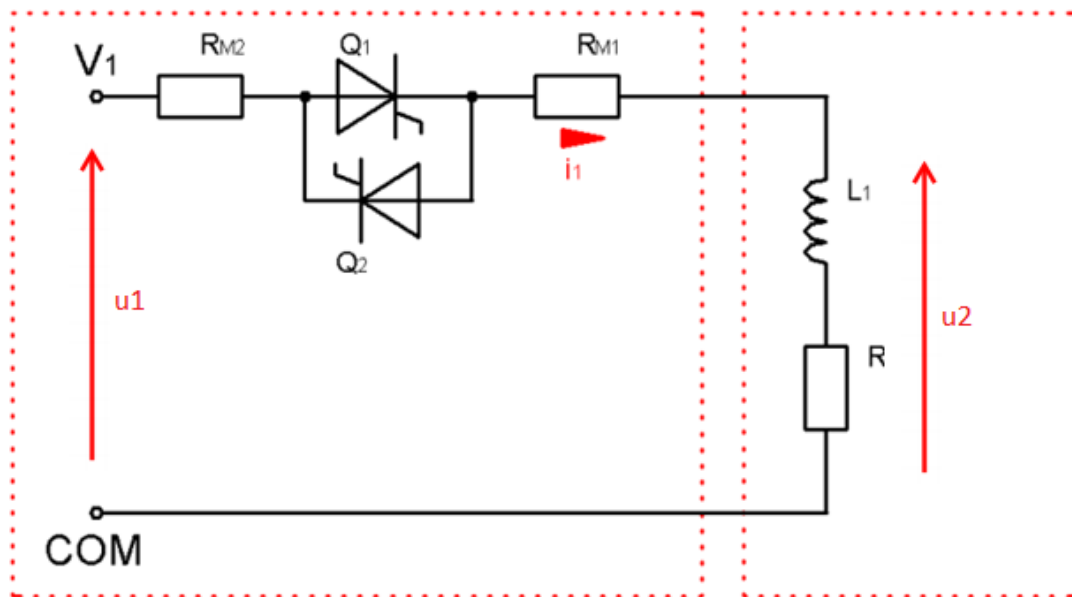
Slika 4.14. Način povezivanja opreme u slučaju integrirane prigušnice

Na slici 4.14. prikazan je način spajanja opreme u slučaju opterećenja pretvarača prigušnicom integriranom u eksperimentalnu karticu. Induktivnost integrirane prigušnice  $L$  napisana je na samoj prigušnici i jednaka je 200 mH, a otpor prigušnice  $R$  ne piše na prigušnici, već se može odrediti korištenjem digitalnog multimetra. Priključenjem digitalnog multimetra na prigušnicu određuje se otpornost prigušnice  $R$ .



**Slika 4.15.** *Proces određivanja otpornosti prigušnice  $R$*

Prema slici 4.15. izmjerena otpornost integrirane prigušnice iznosi  $12 \Omega$ . Nakon što su poznati parametri prigušnice potrebno je odrediti kut trošila. U slučaju idealne prigušnice kut trošila jednak je  $90^\circ$ . Korištena prigušnica realna je zbog postojanja ohmskog otpora pa je kut trošila manji od  $90^\circ$ .



**Slika 4.16.** Shema spoja izravnog izmjeničnog pretvarača napona s induktivnim trošilom [6]

Na slici 4.16. prikazana je shema spoja induktivno opterećenog pretvarača pri čemu je važno uzeti u obzir dodatne otpore  $R_{M1}$  i  $R_{M2}$  otpornosti jednog ohma, a  $R_L$  predstavlja otpornost integrirane prigušnice. Kut trošila određuje se pomoću (3-3) pri čemu je ukupan otpor jednak zbroju svih otpora u seriji. Ukupan otpor serije  $R$  jednak je  $14 \Omega$ . Prema tome, kut trošila jednak je

$$R = 1 + 1 + 12 = 14 \Omega \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = 77,438726^\circ$$

gdje je  $R$  ukupan otpor serije otpornika, a  $L$  induktivnost prigušnice. Iz ranije provedene analize rada u potpoglavlju 3.2. proizlazi da kut okidanja tiristora mora biti veći od kuta trošila kako bi se mogla mijenjati efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje induktivnog trošila  $I(1)$ . Prema tome, kut okidanja tiristora mora biti veći od  $77,438726^\circ$  i manji od  $180^\circ$  kako bi bilo moguće mijenjati efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje pri čemu se induktivno opterećeni izmjenični pretvarač napona ponaša kao prigušnica promjenjive induktivnosti. U navedenom području kuta okidanja struja trošila je diskontinuirana te je moguće mijenjati efektivnu vrijednost struje trošila. U intervalu kuta okidanja  $0^\circ \leq \alpha \leq 77,438726^\circ$  struja trošila je kontinuirana i sinusna pri čemu struja zaostaje za naponom upravo za vrijednost kuta trošila. Mjerenje se provodi postupnim povećanjem kuta okidanja prijelazom iz kontinuiranog u diskontinuirano područje.

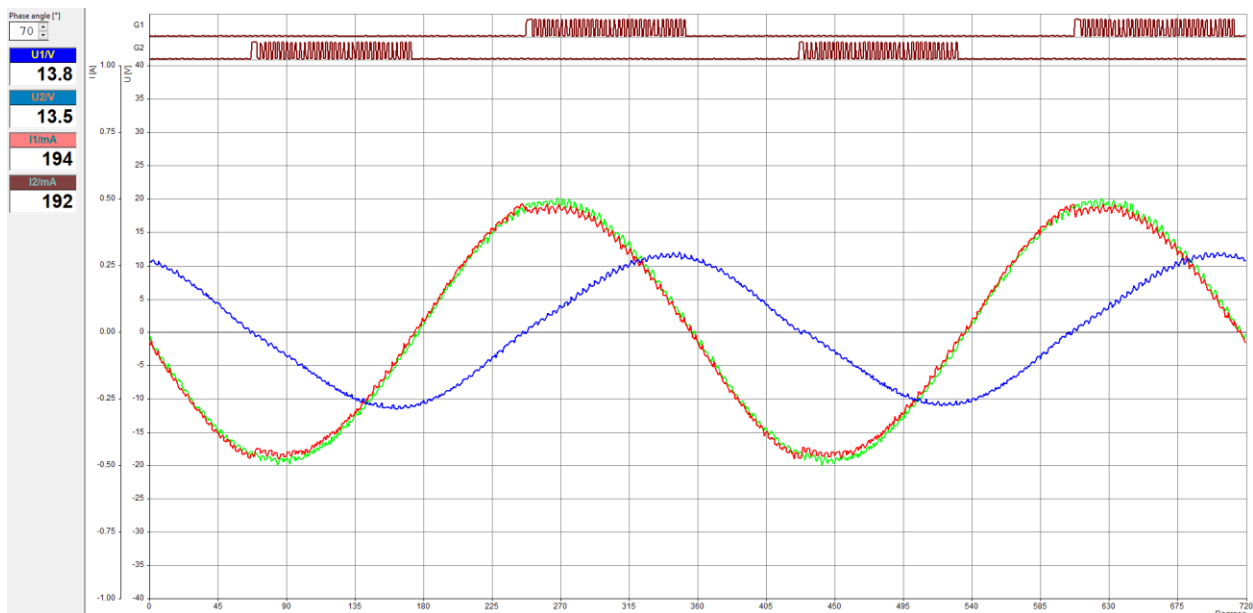
U nastavku, prikazani su rezultati mjerenja u slučaju induktivnog opterećenja.



Crveno – valni oblik napona trošila

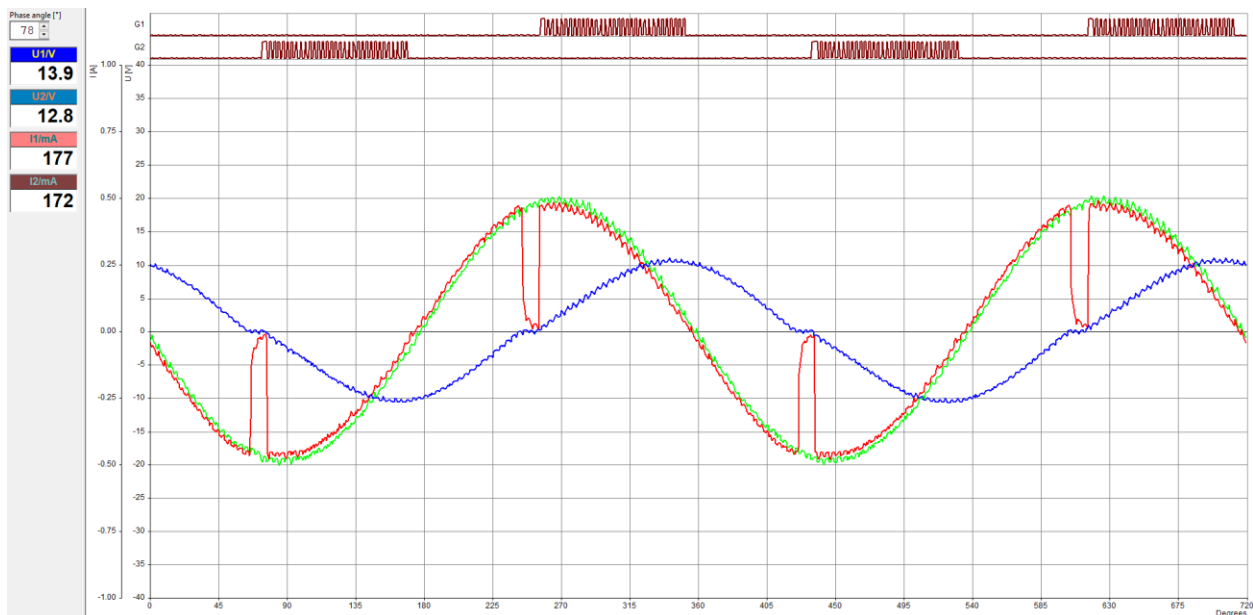
Plavo – valni oblik struje trošila

Zeleno – valni oblik napona pojne mreže



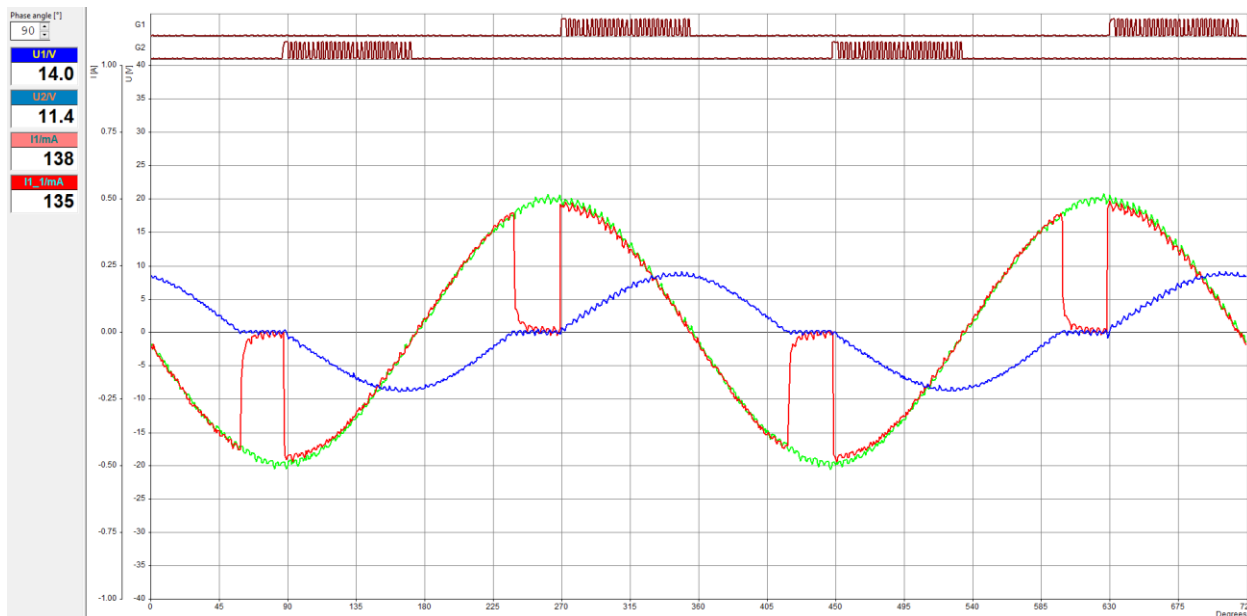
**Slika 4.17.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $70^\circ$

Prema slici 4.17. struja trošila je kontinuirana i sinusna te zaostaje za naponom za kut trošila  $\varphi$ .

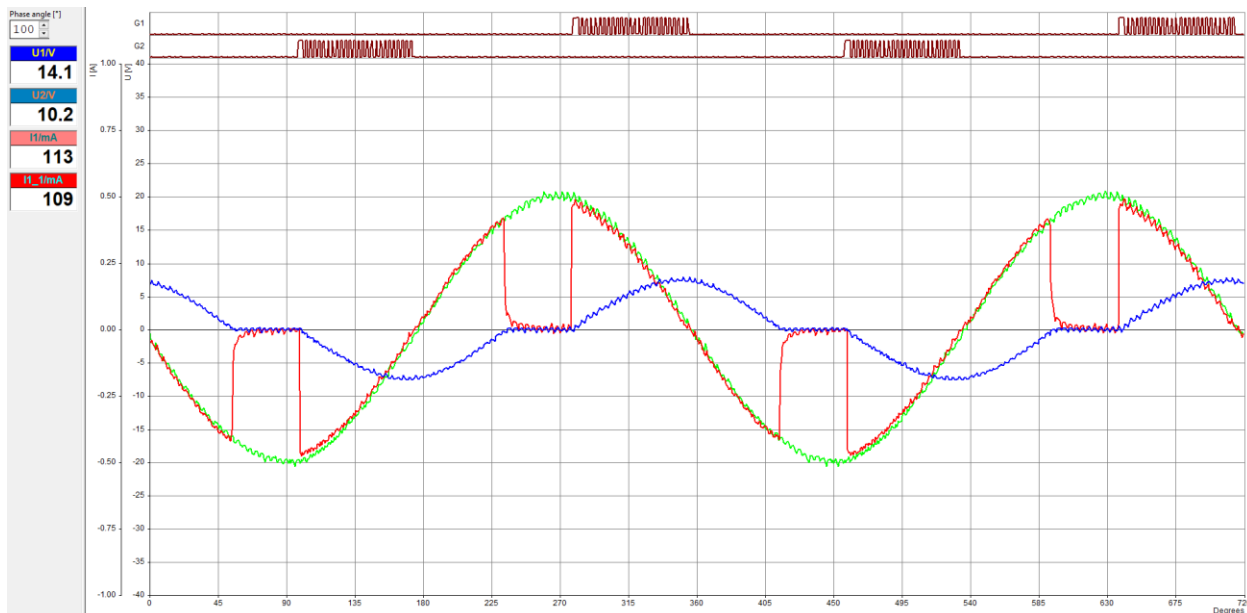


**Slika 4.18.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $78^\circ$

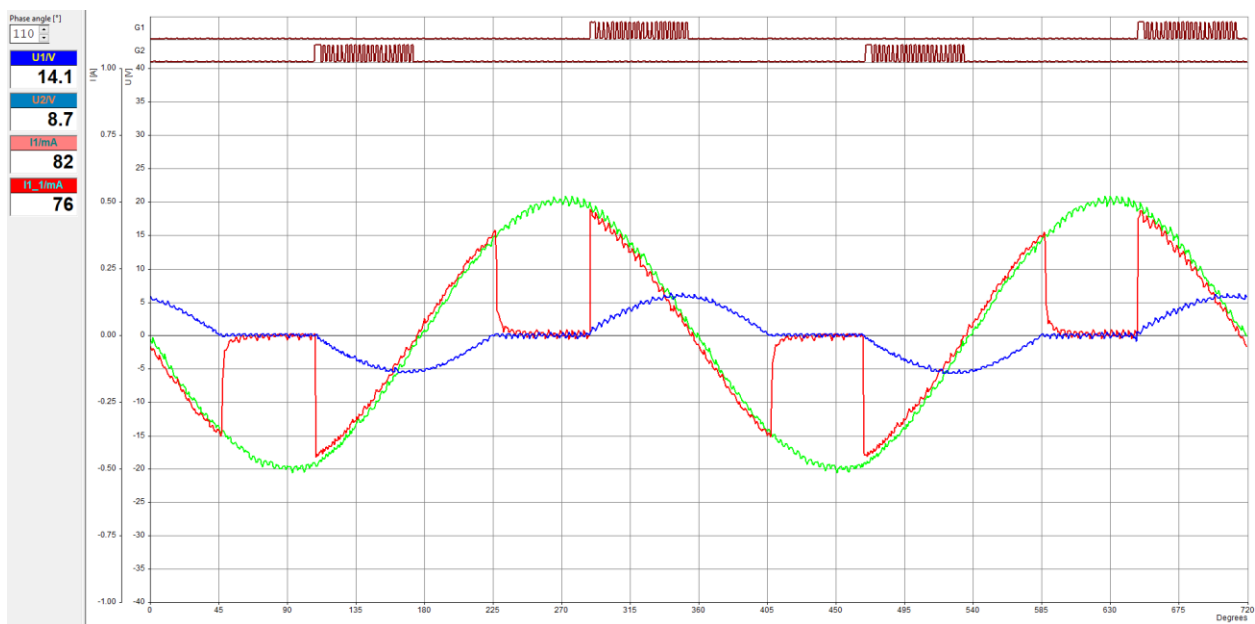
Slika 4.18. prikazuje valne oblike napona i struja u slučaju graničnog kuta okidanja koji je jednak kutu trošila  $\varphi$ . Struja trošila je kontinuirana i sinusna.



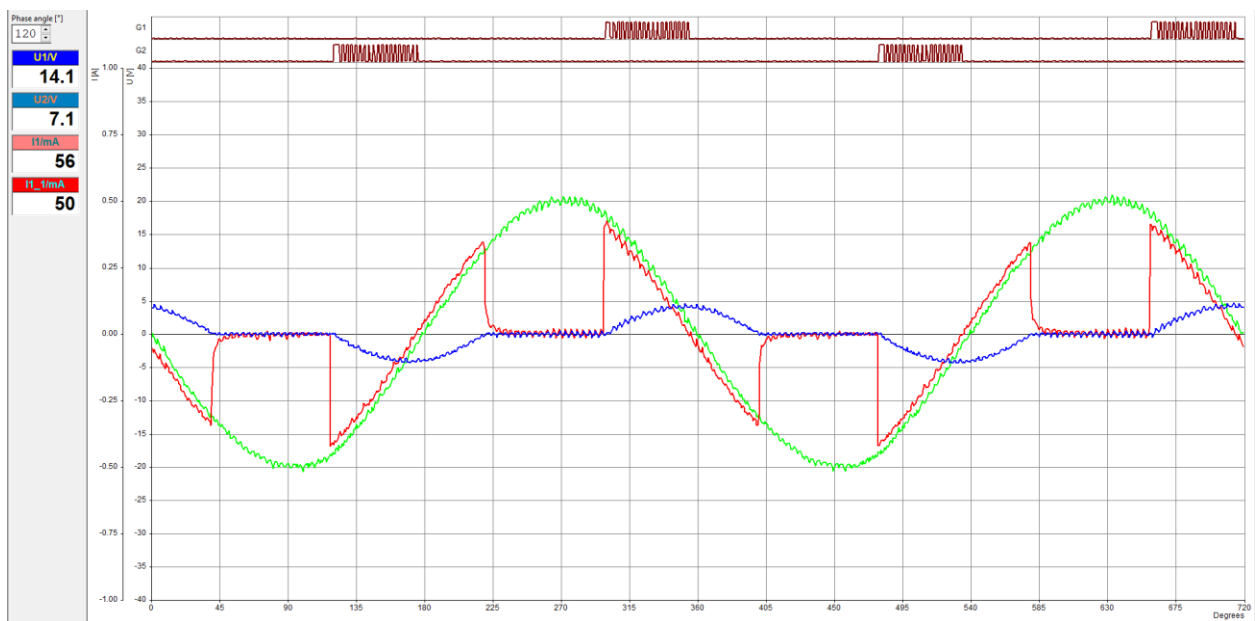
**Slika 4.19.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $90^\circ$



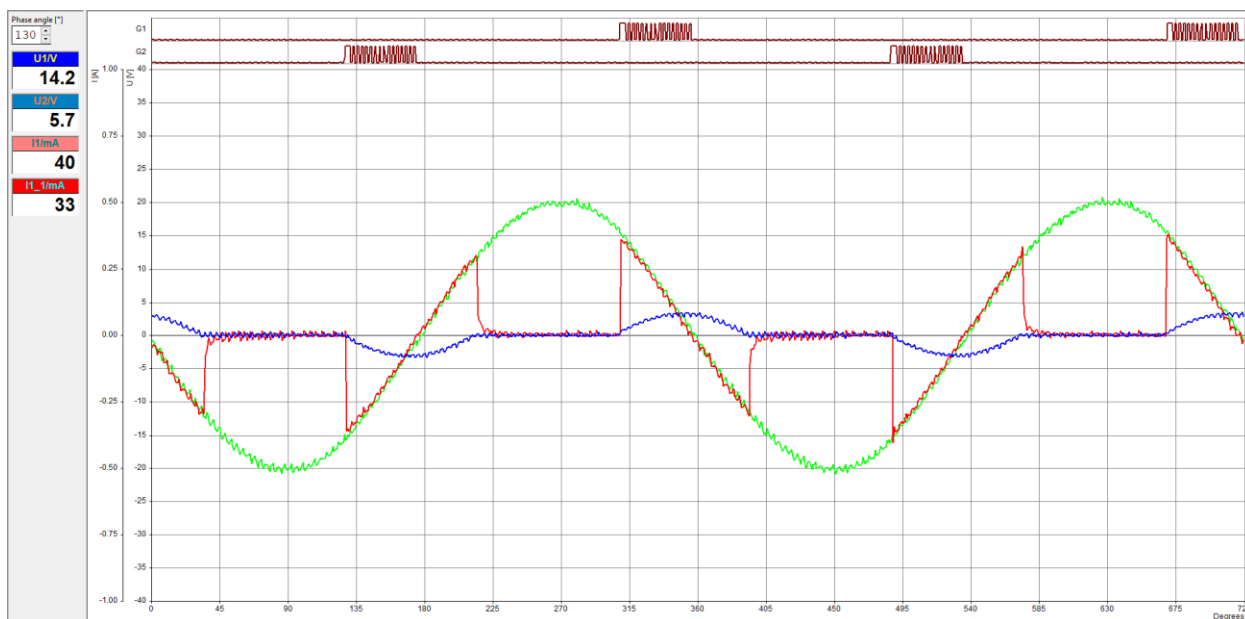
**Slika 4.20.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $100^\circ$



Slika 4.21. Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $110^\circ$



Slika 4.22. Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $120^\circ$

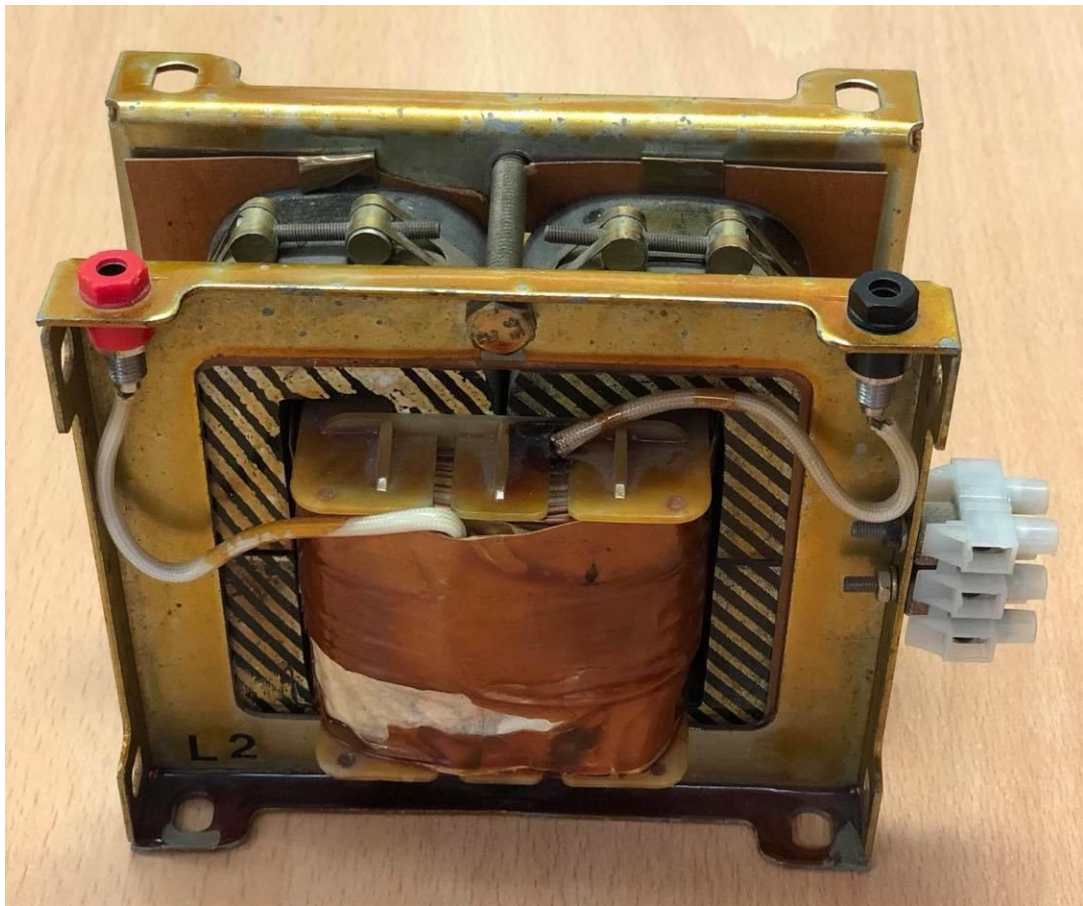


**Slika 4.23.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $130^\circ$

Povećanjem kuta okidanja iznad kuta trošila (kako je prikazano na slikama od 4.19. do 4.23.) valni oblici napona i struje trošila postaju diskontinuirani pri čemu se efektivna vrijednost napona i struje trošila smanjuje.

#### 4.2.2. Vanjska prigušnica

Prije početka mjerenja na vanjskoj prigušnici potrebno je izmjeriti induktivnost prigušnice  $L$  i ohmski otpor prigušnice  $R$  kako bi se mogao odrediti kut trošila. Također, radi se o realnoj prigušnici pa njezin otpor nije zanemariv. Postupak određivanja otpornosti  $R$  vanjske prigušnice jednak je određivanju otpornosti integrirane prigušnice pomoću digitalnog multimetra. Izmjerena vrijednost otpornosti vanjske prigušnice jednaka je  $R_1 = 2 \Omega$ . Nadalje, podatak o induktivnosti integrirane prigušnice naveden je na samoj prigušnici te ga nije bilo potrebe izmjeriti dok kod vanjske prigušnice nije bio naveden. Za određivanje induktivnosti vanjske prigušnice koristit će se Ohmov zakon pomoću kojeg se na temelju izmjerenih efektivnih vrijednosti napona i struje trošila može odrediti induktivnost  $L$  vanjske prigušnice. Shema analiziranog spoja s vanjskom prigušnicom prikazana je na slici 4.16. te se prema njoj računa induktivnost prigušnice. Na slici 4.24. prikazana je vanjska prigušnica koja se koristi kao induktivno trošilo i čija induktivnost se određuje.



**Slika 4.24.** Vanjska prigušnica kao induktivno trošilo

Zatim, potrebno je izmjeriti efektivne vrijednosti struje i napona trošila pomoću digitalnog multimetra pri kutu okidanja nula stupnjeva. Pri kutu okidanja nula stupnjeva, struja i napon trošila sinusnog su valnog oblika jer je kut trošila sigurno veći od kuta okidanja. Sve dok je kut okidanja manji od kuta trošila postiže se kontinuirana struja trošila, a diskontinuirani način rada nastupa u slučaju postizanja većeg kuta okidanja od kuta trošila. Dakle, moguće je koristiti Ohmov zakon za određivanje induktivnosti vanjske prigušnice. Za određivanje efektivne vrijednosti napona prigušnice potrebno je spojiti paralelno digitalni voltmetar, a za određivanje efektivne vrijednosti struje prigušnice serijski se spaja digitalni ampermetar s prigušnicom. Slika 4.25. prikazuje rezultate mjerenja koji se koriste u postupku izračuna. Dobivene efektivne vrijednosti potrebno je uvrstiti u Ohmov zakon kako bi se dobila induktivna reaktancija  $X_L$  prigušnice na temelju koje se računa induktivnost  $L$ . U nastavku je prikazan izračun induktivnosti prigušnice.



Slika 4.25. Izmjerene efektivne vrijednosti struje (lijevo) i napona (desno) prigušnice

Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti u Ohmov zakon prema relaciji (4-2) računa se induktivna reaktancija  $X_L$ :

$$X_L = \frac{U_{ef}}{I_{ef}} \quad (4-2)$$

gdje je  $U_{ef}$  efektivna vrijednost napona prigušnice, a  $I_{ef}$  efektivna vrijednost struje prigušnice.

Prema tome, induktivna reaktancija prigušnice jednaka je:

$$X_L = \frac{14,89}{0,1505} = 98,9368 \Omega$$

Iz izračunate reaktancije, moguće je odrediti induktivnost vanjske prigušnice prema izrazu (4-3).

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (4-3)$$

Proizlazi da je induktivnost  $L$  vanjske prigušnice jednaka

$$L = \frac{98,9368}{100\pi} = 314,92586 \text{ mH}$$

Preostaje još odrediti kut trošila koji se računa na temelju sheme spoja prema slici 4.16.

Ukupan otpor trošila jednak je zbroju svih otpora u seriji pri čemu treba uzeti u obzir otpornost prigušnice  $R_1$ , a induktivnost trošila jednaka je izmjerenoj induktivnosti prigušnice.

$$R = 1 + 1 + 2 = 4 \Omega \quad L = 314,92586 \text{ mH}$$

Kut trošila računa se prema relaciji (3-3) i jednak je

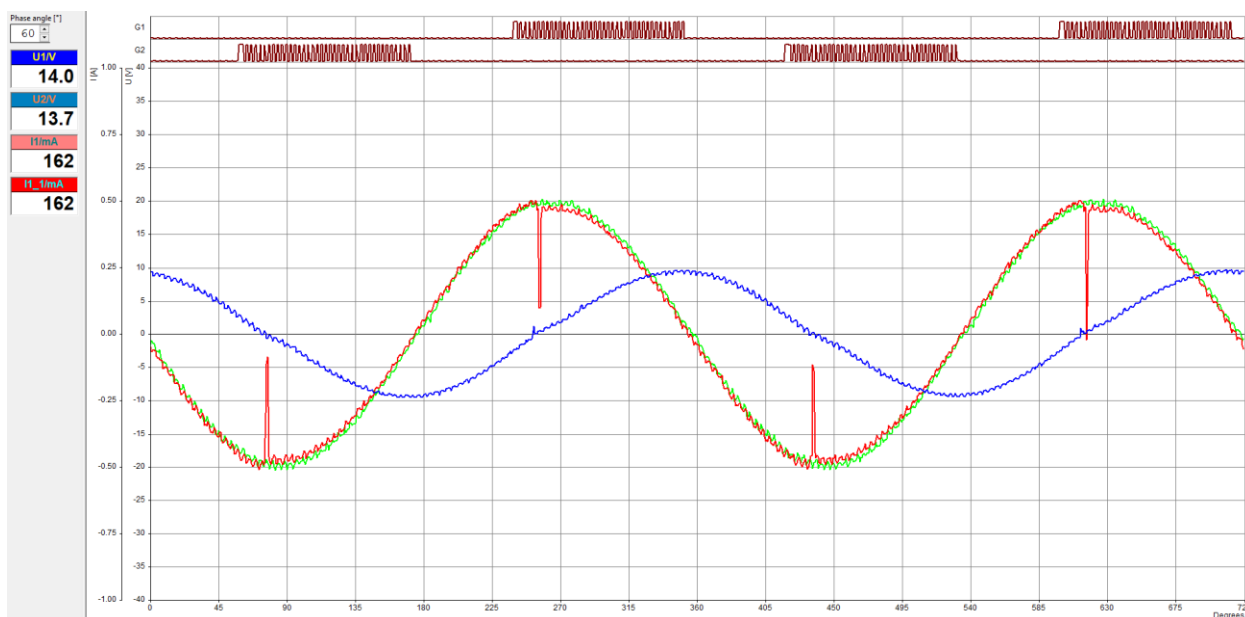
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{100\pi \cdot 0,31492586}{4} = 87,68480^\circ$$

Na temelju rezultata izračunatog kuta trošila, upravljanje efektivnom vrijednošću struje trošila moguće je promjenom kuta okidanja u području  $88^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ . Također, u ovom intervalu kuta okidanja vanjska prigušnice ponaša se kao prigušnica promjenjive induktivnosti. Rezultati mjerenja valnih oblika napona i struje trošila prikazani su u nastavku pri čemu se kut okidanja postupno povećava počevši s kutom okidanja manjim od kuta trošila.

Crveno – valni oblik napona trošila

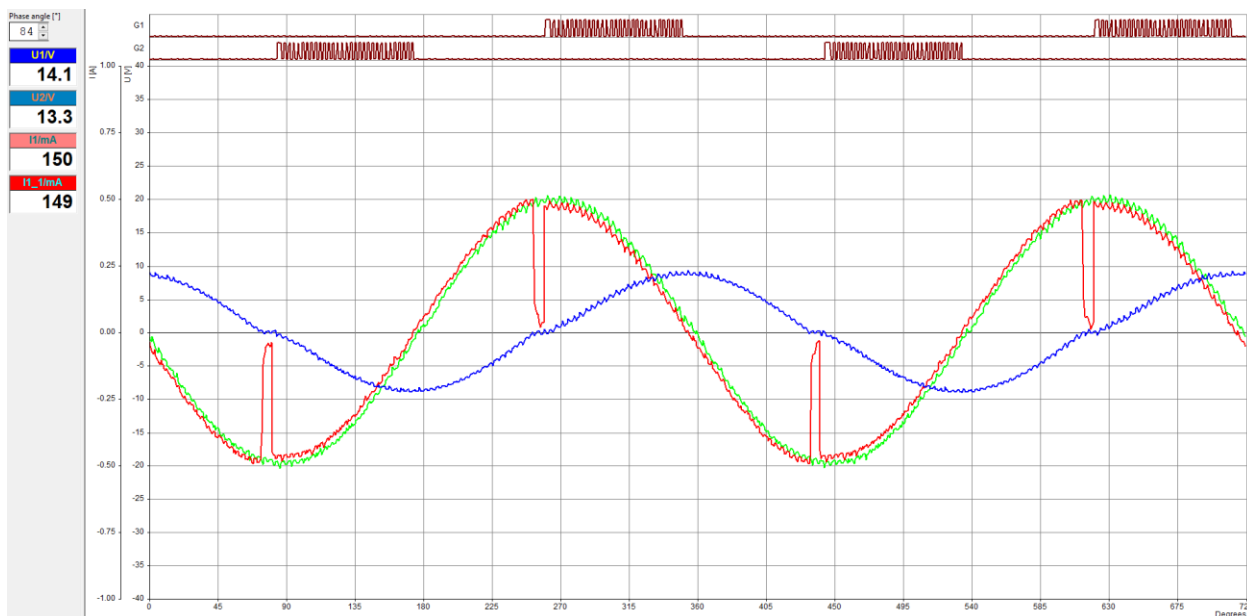
Plavo – valni oblik struje trošila

Zeleno – valni oblik napona pojne mreže



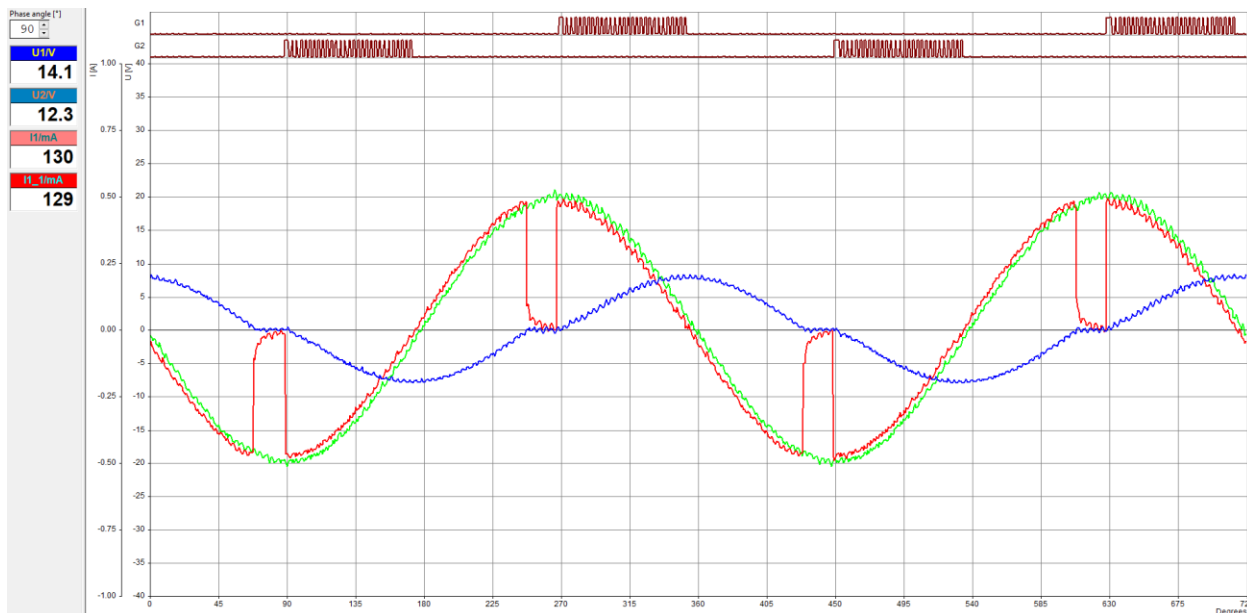
**Slika 4.26.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $60^\circ$

Prema slici 4.26. struja trošila je kontinuirana i sinusna te zaostaje za naponom za kut trošila  $\varphi$ .



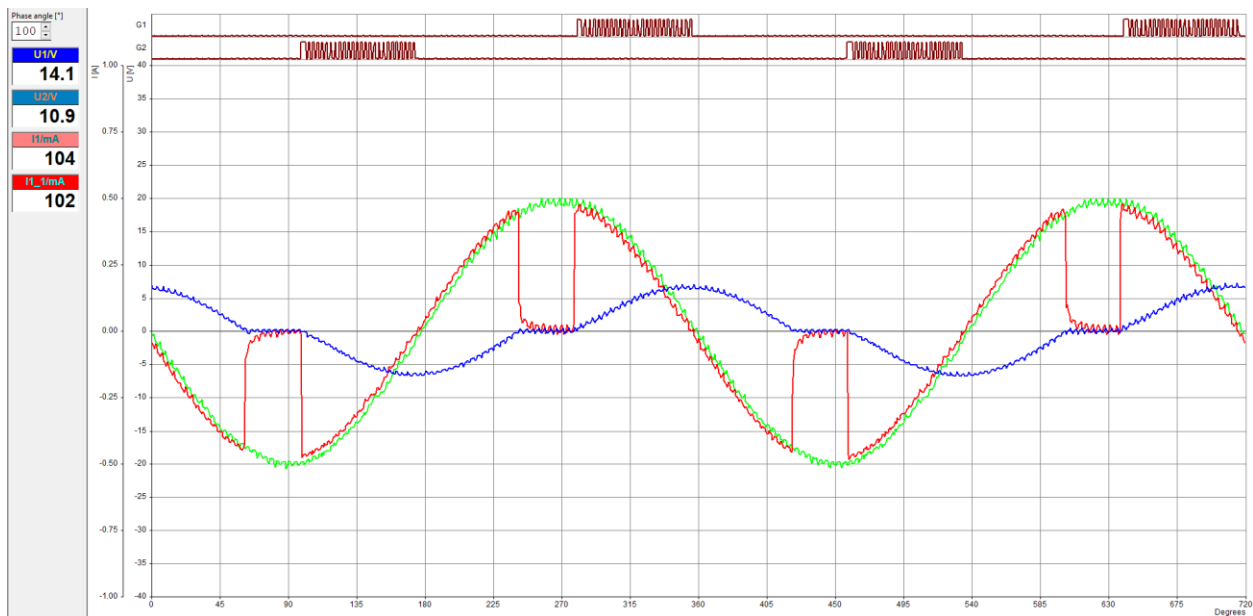
**Slika 4.27.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $84^\circ$

Slika 4.27. prikazuje valne oblike napona i struja u slučaju graničnog kuta okidanja koji je jednak kutu trošila  $\varphi$ . Struja trošila je kontinuirana i sinusna.

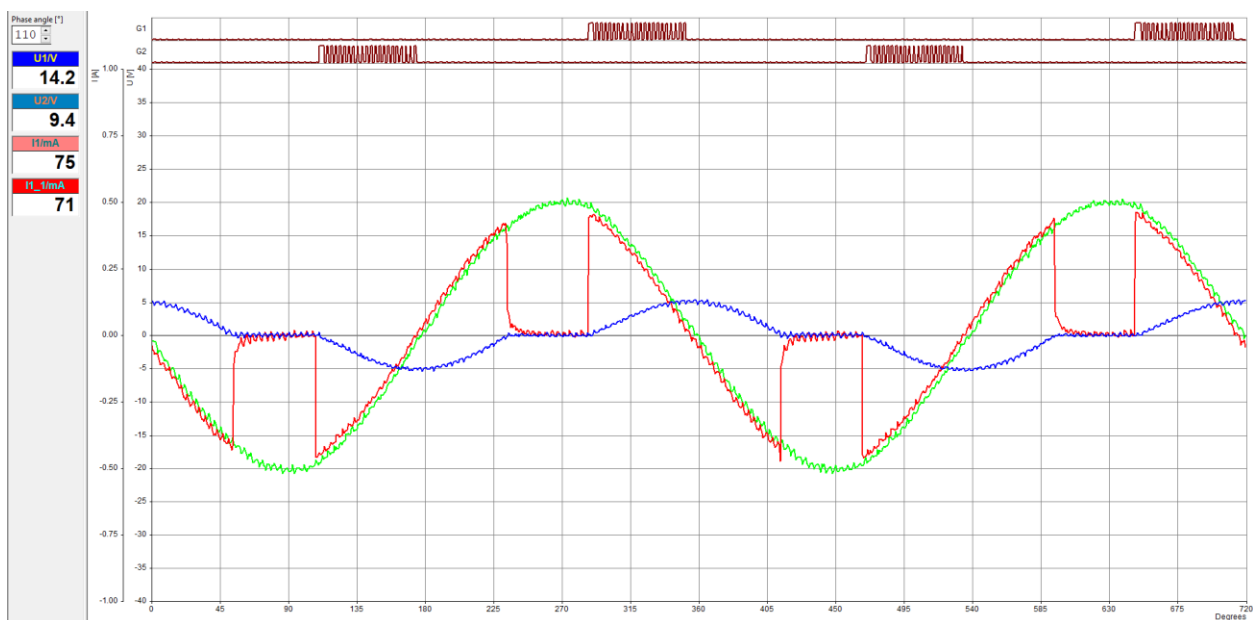


**Slika 4.28.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $90^\circ$

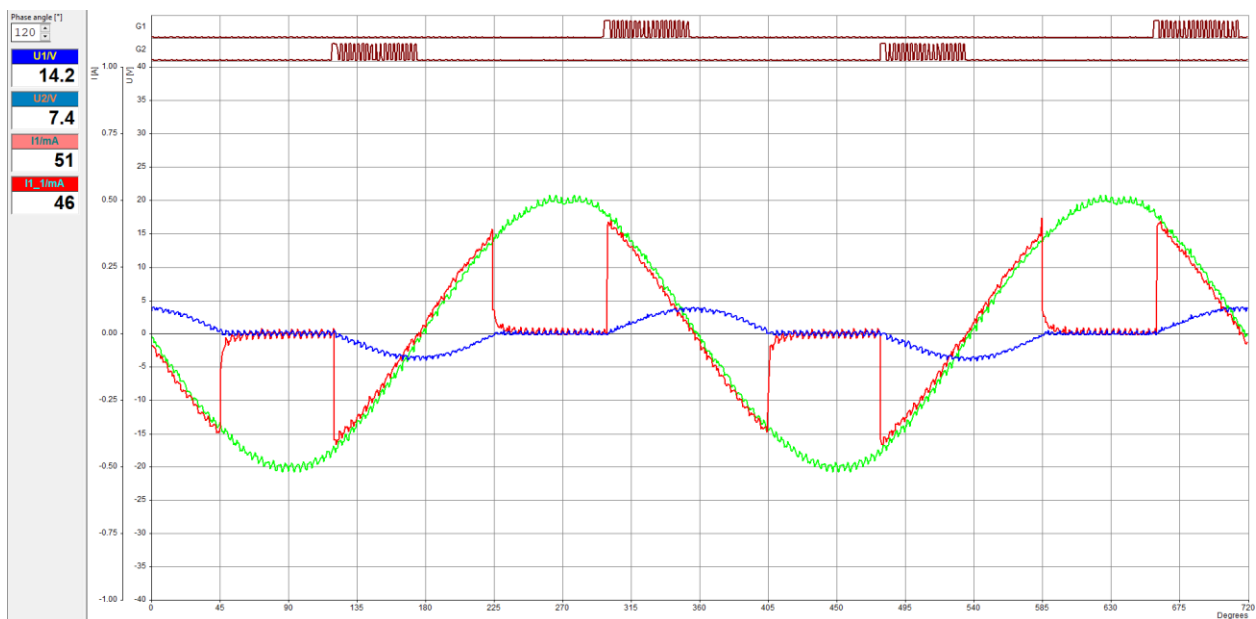




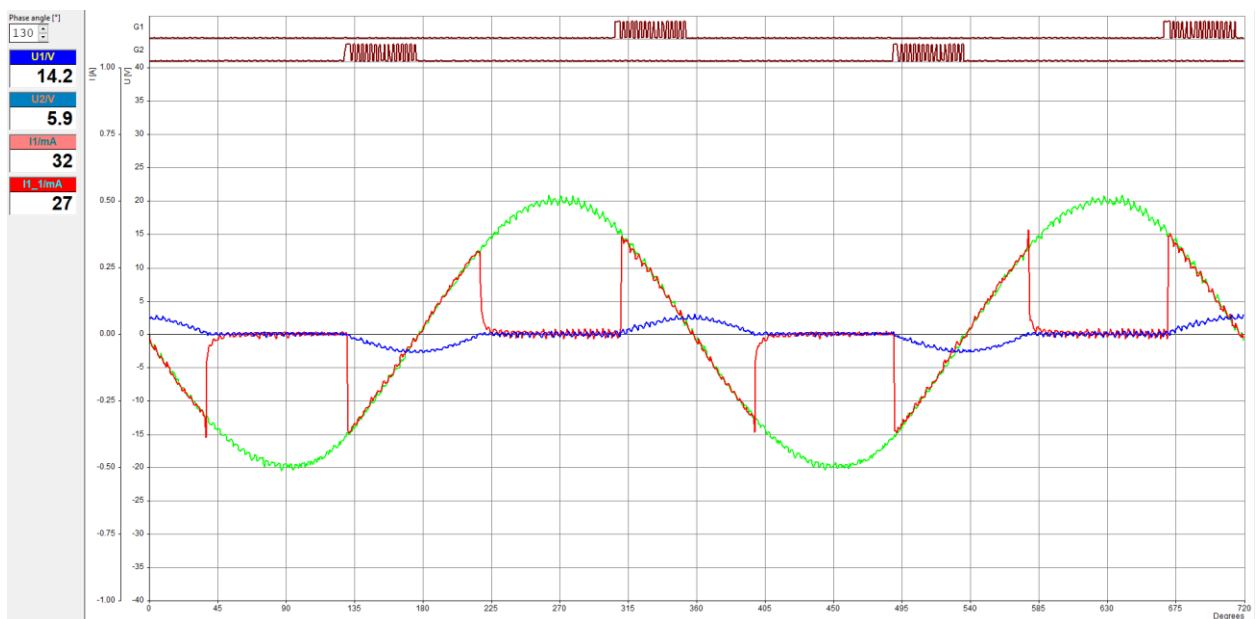
**Slika 4.29.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $100^\circ$



**Slika 4.30.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $110^\circ$



**Slika 4.31.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $120^\circ$



**Slika 4.32.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila pri kutu okidanja  $130^\circ$

Tendencija smanjenja efektivnih vrijednosti napona i struje trošila pri povećanju kuta okidanja prikazana je na slikama od 4.28. do 4.32. Također, smanjuje se i efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje trošila čijom se vrijednošću upravlja te postiže diskontinuiranost napona i struje.

### 4.3. Analiza rezultata mjerenja – promjena induktivnosti prigušnice

Kao što je ranije navedeno, promjenom kuta okidanja, moguće je mijenjati efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje induktivnog trošila što rezultira promjenom induktivnosti prigušnice. Na taj način elektronički se upravlja prigušnicom čija induktivnost  $L$  ovisi o odabranom kutu okidanja. U eksperimentalnom dijelu rada, korištene su dvije različite prigušnice čijom se induktivnošću elektronički upravljalo promjenom kuta okidanja. Induktivnost prigušnice integrirane u eksperimentalnu karticu je 200 mH dok je induktivnost vanjske prigušnice 314,925 mH. Izraz (3-21) opisuje promjenu induktivnosti prigušnice u ovisnosti o odabranom kutu okidanja. Primjenom navedenog izraza, dobije se grafički prikaz ovisnosti induktivnosti korištenih prigušnica o kutu okidanja.

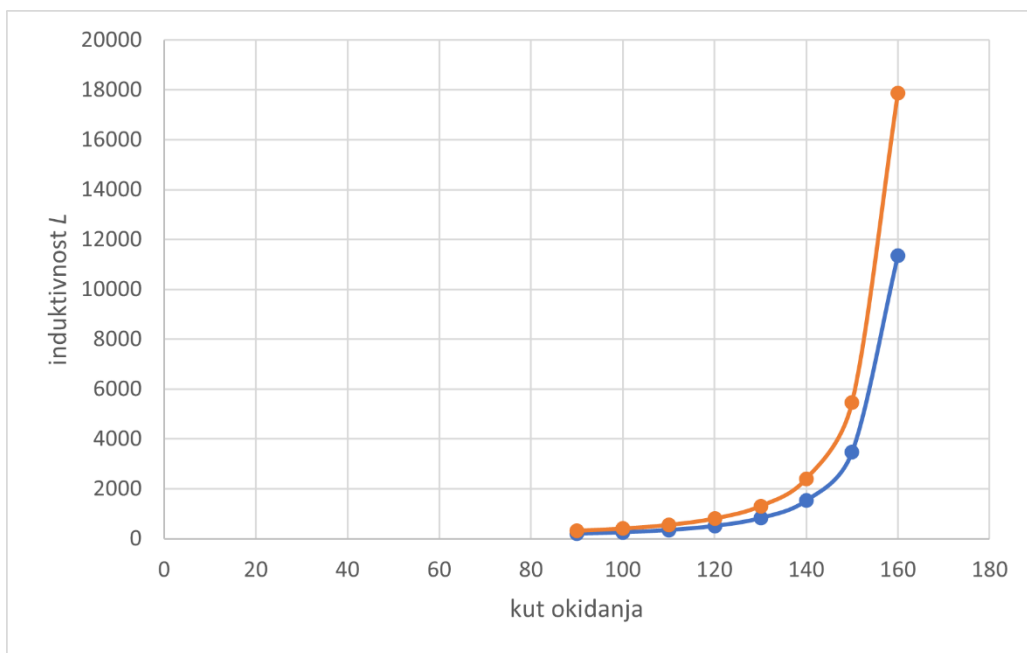
$$L_{ekv}(\alpha) = L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}$$

U tablici 4.3. prikazane su vrijednosti induktivnosti pojedine prigušnice koje odgovaraju odabranim kutovima okidanja. Induktivnost integrirane prigušnice označena je s  $L_1$  dok je induktivnost vanjske označena s  $L_2$ .

**Tablica 4.3.** Ovisnost induktivnosti prigušnice o kutu okidanja

$\alpha$	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°
$L_1$ [mH]	200	256	348,93	511,50	826,16	1527,06	3468,07	11352,95
$L_2$ [mH]	314,92	403,74	549,44	805,43	1300,90	2404,55	5460,93	17876,68

Prema tablici 4.3. vidljivo je da se povećanjem kuta okidanja povećava i induktivnost prigušnice. Na temelju tablice 4.3. dobije se usporedba i grafički prikaz ovisnosti korištenih prigušnica o kutu okidanja prikazan na slici 4.33. Narančasta funkcija opisuje vanjsku prigušnicu dok plava opisuje integriranu prigušnicu. Iz priloženog grafa, vrijednost induktivnosti brže raste što je veći kut okidanja.



**Slika 4.33.** Grafički prikaz ovisnosti induktivnosti prigušnica o kutu okidanja

Prethodno razmatranje promjene induktivnosti prigušnice ne uzima u obzir otpornost prigušnice  $R$  i dodatne otpore  $R_{M1}$  i  $R_{M2}$  čime se prigušnica smatra idealnom induktivnosti  $L$ . Na temelju poznatih induktivnosti prigušnica, prikazana je promjena induktivnosti kao da su idealne pomoću izraza (3-21) i odabirom kuta okidanja. U nastavku, pomoću rezultata mjerenja na realnim prigušnicama, moguće je odrediti promjenu induktivnosti prigušnice koristeći izraz (3-17). U tablici 4.4. navedene su izmjerene efektivne vrijednosti osnovnog harmonika struje  $I(1)$  integrirane prigušnice i efektivna vrijednost napona pojne mreže  $E$ .

$$L_{ekv}(\alpha) = \frac{E}{\omega I(1)}$$

**Tablica 4.4.** Rezultati mjerenja za integriranu prigušnicu

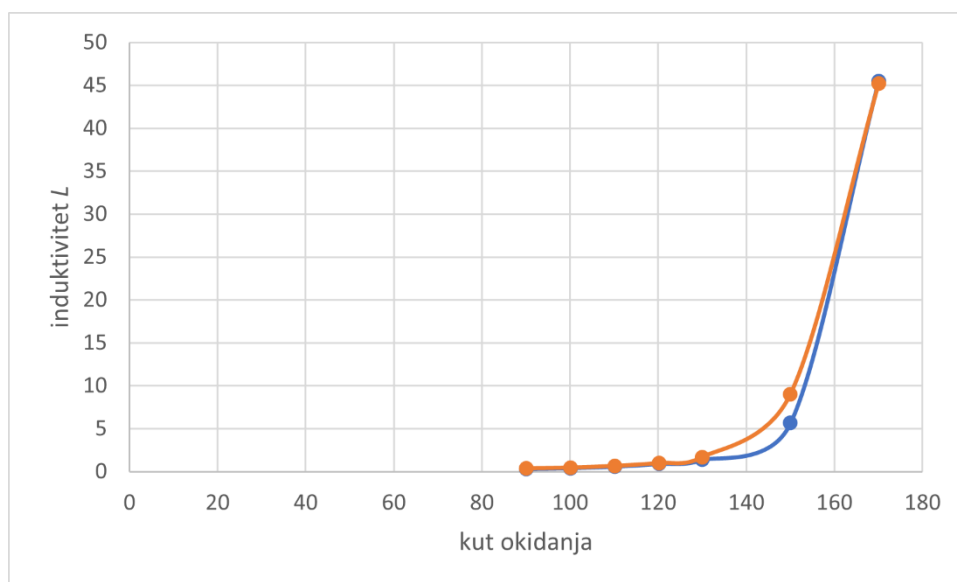
$\alpha$	78°	90°	100°	110°	120°	130°	150°	170°
$I(1)$ [mA]	177	135	109	76	50	33	8	1
$E$ [V]	13,9	14	14,1	14,1	14,1	14,2	14,2	14,3
$L_{ekv}(\alpha)$ [mH]	249,97	330,09	411,75	590,5486	897,63	1369,69	5650,00	45518,30

U tablici 4.5. navedene su efektivne vrijednosti osnovnog harmonika struje  $I(1)$  vanjske prigušnice i efektivna vrijednost napona pojne mreže  $E$  koji su potrebni za izračun promjene induktivnosti.

**Tablica 4.5.** Rezultati mjerenja za vanjsku prigušnicu

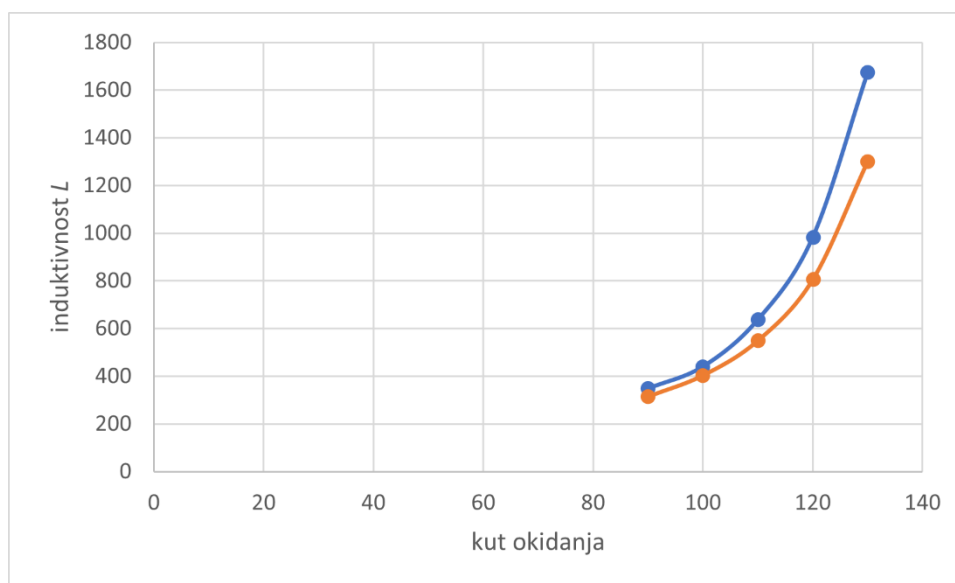
$\alpha$	88°	90°	100°	110°	120°	130°	150°	170°
$I(1)$ [mA]	149	129	102	71	46	27	5	1
$E$ [V]	14,1	14,1	14,1	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2
$L_{ekv}(\alpha)$ [mH]	301,21	347,92	440,01	636,61	982,60	1674,07	9040,00	45200,00

Na temelju tablica 4.4. i 4.5., povećanjem kuta okidanja raste induktivnost prigušnice u oba slučaja. Utjecaj otpornosti prigušnica  $R$  i dodatnih otpora  $R_{M1}$  i  $R_{M2}$  vidljiv je u tablicama 4.4. i 4.5. u odnosu na tablicu 4.3. kad je utjecaj navedenih otpornosti zanemaren. Na slici 4.34. prikazana je promjena induktivnosti prigušnica na temelju izmjerenih podataka koja daje isti oblik kao prema grafu 4.33.



**Slika 4.34.** Grafički prikaz ovisnosti induktivnosti prigušnica o kutu okidanja na temelju izmjerenih vrijednosti

Pri kutovima kašnjenja okidanja većim od  $130^\circ$  el. dobiva se ekvivalentna induktivnost prigušnice od 1,4 H. Ovako velike vrijednosti induktivnosti nije moguće dobiti klasičnim prigušnicama s feromagnetskim jezgrama, uz male vrijednosti otpornosti što svakako predstavlja prednost elektronički upravljane prigušnice.



**Slika 4.35.** Usporedba induktivnosti vanjske prigušnice dobivene računskim putem (narančasto) i na osnovu rezultata mjerenja (plavo)

Promjena induktivnosti vanjske prigušnice određena je mjerenjem i računskim putem. Slika 4.35. prikazuje usporedbu dvije korištene metode određivanja induktivnosti prigušnice. Rezultati su prikazani u području  $90^\circ \leq \alpha \leq 130^\circ$  pri čemu se kod kutova okidanja iznad  $130^\circ$  el. postižu velike vrijednosti induktivnosti koje je teško ostvariti prigušnicama projektiranim s malom otpornošću.

## 5. ZAKLJUČAK

Jednofazni izravni izmjenični pretvarači napona koriste se za upravljanje efektivnom vrijednošću struje trošila promjenom kuta okidanja. Pretvarački sklop čini antiparalelni spoj tiristora spojen između jednofazne pojne mreže i trošila radnog ili induktivnog karaktera. Promjenom kuta okidanja tiristora postiže se fazno upravljanje izmjeničnog pretvarača napona

U slučaju radnog opterećenja, odabir kuta okidanja potpuno je neovisan o kutu trošila (kut trošila je nula) jer struja trošila padne na nulu u istom trenutku kad i napon izmjenične mreže padne na nulu. Posljedica toga je da su napon i struja trošila istog valnog oblika. Prethodno je potvrđeno u eksperimentalnom dijelu rada promjenom kuta okidanja u području  $0 \leq \alpha \leq \pi$ . Iako se radi o radnom trošilu, faktor snage postoji i smanjuje se povećanjem kuta okidanja. Pretvarački sklop je fazno upravljan pa se u pojnoj mreži osim djelatne snage na frekvenciji izvora pojavljuje i jalova snaga na frekvenciji izvora. Također, prisutne su i jalove snage na svim ostalim frekvencijama. Pri kutu okidanja  $60^\circ$  el. faktor snage je veći nego pri  $90^\circ$  el. upravo zbog činjenice smanjenja efektivne vrijednosti napona i struje trošila dok efektivna vrijednost napona pojne mreže ostaje nepromijenjena. Napon i struja trošila su višeharmonijski što za posljedicu ima povratni utjecaj na pojnu mrežu u smislu injektiranja viših harmonijskih članova.

Elektroničko upravljanje induktivnošću prigušnice ostvareno je induktivnim opterećenjem izmjeničnog pretvarača napona. Kao u slučaju radnog opterećenja, dana je analiza rada uz provođenje mjerenja na dvije različite prigušnice. Promjenom kuta okidanja mijenja se efektivna vrijednost struje osnovnog harmonika struje trošila čime je moguće postići prigušnice promjenjive induktivnosti. Glavno ograničenje na upravljanje induktivnošću prigušnice je izbor kuta okidanja koji treba biti većeg iznosa od kuta trošila. Struja i napon trošila postaju diskontinuirani kada kut okidanja postigne vrijednost veću od  $78^\circ$  el. pri uporabi integrirane i  $88^\circ$  el. pri uporabi vanjske prigušnice. Za kutove okidanja manje od kuta trošila, struja i napon prigušnice su kontinuirani i sinusni s faznim pomakom između napona i struje. Pri kutovima okidanja većim od  $130^\circ$  el. dobivene su vrijednosti induktivnosti prigušnica iznad 1,4 H koje su teško ostvarive korištenjem klasičnih prigušnica s feromagnetskim jezgrama što predstavlja prednost elektronički upravljanih prigušnica.

## LITERATURA

- [1] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.
- [2] J. G. Kassakian, Martin F. Schlecht, George C. Verghese, Osnove energetske elektronike: Topologije i funkcije pretvarača, dio 1, Graphis, Zagreb, 2000.
- [3] B. Kuzmanović, Osnove elektrotehnike II, Element, Zagreb, 2011.
- [4] I. Flegar, Teorija mreža – Bilješke s predavanja, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2001.
- [5] Lucas-Nülle, UniTrain-I System, dostupno na:  
[https://www.lucas-nuelle.us/index.php/fuseaction/download/lrn\\_file/instruction\\_manual\\_unitrain-i.pdf](https://www.lucas-nuelle.us/index.php/fuseaction/download/lrn_file/instruction_manual_unitrain-i.pdf) [17.8.2021.]
- [6] Lucas-Nülle, dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/> [17.8.2021.]



## SAŽETAK

Jednofazni izravni izmjenični pretvarači napona spadaju u najjednostavnije pretvaračke sklopove koji omogućuju upravljanje efektivnom vrijednošću struje trošila promjenom kuta okidanja. U ovom radu, prikazana je analiza rada izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim i induktivnim trošilom. Također, provedena su mjerenja na izmjeničnom pretvaraču u slučaju radnog i induktivnog opterećenja s ciljem promjene induktivnosti prigušnice. Koncept elektronički upravljane prigušnice podrazumijeva upravljanje induktivnošću prigušnice promjenom kuta okidanja. Snimljeni su valni oblici napona i struje trošila koji su kasnije uspoređeni s valnim oblicima dobivenim u provedenoj analizi rada. Sva mjerenja obavljena su uz pomoć didaktičko multimedijalne opreme Lucas-Nülle i programa LabSoft.

**Ključne riječi:** elektroničko upravljanje, induktivnost, izmjenični pretvarač napona, Lucas-Nülle, prigušnica

**TITLE: Concept of electronically controlled inductor realized by experimental card LN SO4204-7N**

**ABSTRACT**

Single-phase direct AC voltage converters are among the simplest converters that enable the control of the RMS value of the consumer current by changing the trigger angle. In this paper, an analysis of the operation of an alternating voltage converter loaded with a working and inductive consumer is presented. Also, measurements were performed on the AC converter in case of operating and inductive load with the aim of changing the inductance of the electric coil. The concept of electronically controlled inductance involves controlling the inductance by changing the trigger angle. Voltage and current waveforms were recorded, which were later compared with the waveforms obtained in the performed analysis. All measurements were performed with the help of the Lucas-Nülle didactic multimedia equipment and the LabSoft program.

**Keywords:** electronic control, inductance, AC voltage converter, Lucas-Nülle, electric coil

## ŽIVOTOPIS

Luka Živković rođen je 25. svibnja 1999. godine u Osijeku. Živi i odrasta u Županji gdje pohađa Osnovnu školu Mate Lovraka, a potom upisuje Prirodoslovno – matematičku gimnaziju u Županji. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja, 2018. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, preddiplomski studij elektrotehnika. Opredjeljuje se za smjer elektroenergetika na drugoj godini studija. Za vrijeme trajanja studija, dobitnik je nagrade za postignut uspjeh u studiranju.

---

Luka Živković

## PRILOG 1: Predložak za laboratorijsku vježbu

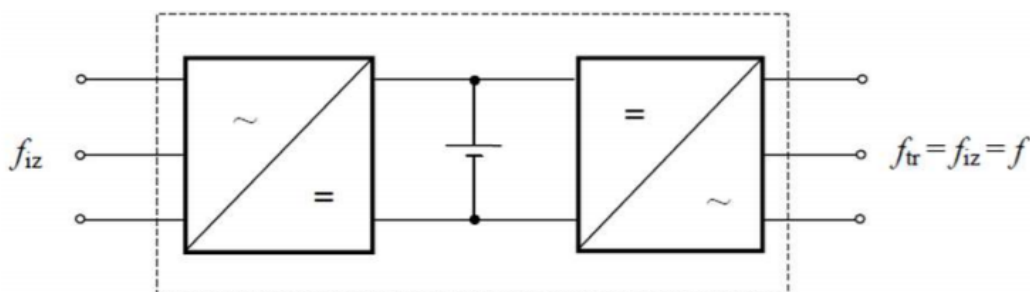
### VJEŽBA: IZMJENIČNI PRETVARAČ NAPONA

#### 1. UVOD

Izmjenični pretvarači napona energetski su pretvarači napona čija je svrha povezivanje dvaju izmjeničnih sustava tako da se dobiju željena svojstva i valni oblici napona i struja trošila pri čemu frekvencija pojne mreže odgovara frekvenciji trošila ( $f_{iz} = f_{tr} = f \neq 0$ ).[1]

Željene pretvaračke funkcije mogu se ostvariti na dva načina izvedbe izmjeničnih pretvarača napona kao neizravna (dvostruki proces pretvorbe) i izravna pretvorba (jedan proces pretvorbe).

Pretvarači s dvostrukim procesom pretvorbe nazivaju se neizravni izmjenični pretvarači napona. Dvostruki proces pretvorbe ostvaruje se lančanim spajanjem ispravljača i autonomnog izmjenjivača prikazan na slici 1.1. Ovakvi se sustavi najčešće primjenjuju u željezničkoj vuči.[1]



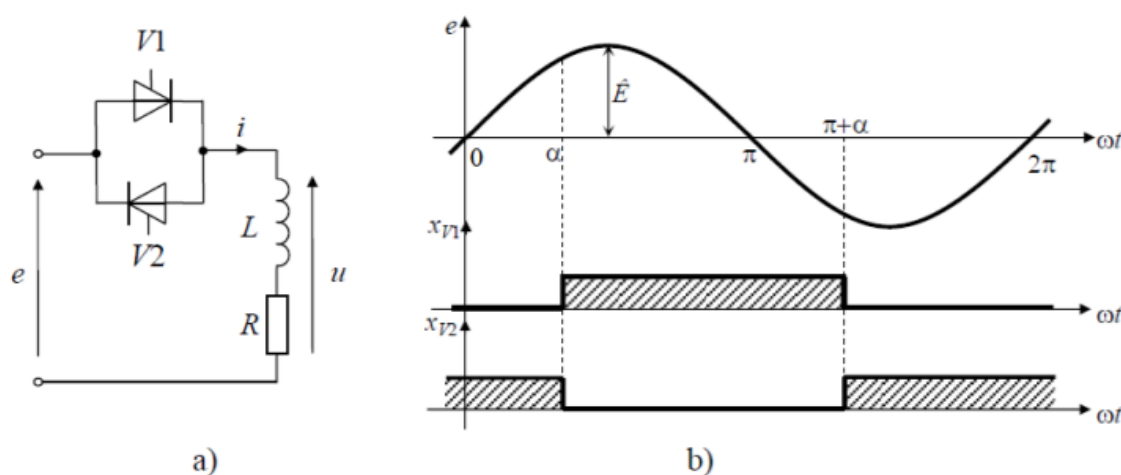
SLIKA 1.1. Dvostruki proces pretvorbe u neizravnom izmjeničnom pretvaraču napona [1]

Pretvarači s jednim procesom pretvorbe nazivaju se izravni izmjenični pretvarači napona. Takvi pretvarači s pomoću pretvaračkih komponenti mijenjaju valni oblik napona trošila u odnosu na valni oblik napona pojne mreže da bi se upravljalo efektivnom vrijednošću struje trošila. Pretvaračka komponenta koja se koristi je antiparalelni spoj tiristora spojen između pojne mreže i trošila. Područja primjene izravnih izmjeničnih pretvarača napona su izgradnja elektronički upravljanih prigušnica te upravljanje brzinom vrtnje asinkronih motora i njihovo upuštanje. [1]

Analiza rada i eksperimentalni dio obrađeni su u slučaju izravnog izmjeničnog pretvarača napona.

## 2. ANALIZA RADA PRETVARAČA

Analiza rada jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona provedena je pod pretpostavkom da je između izmjenične pojne mreže napona  $e = \hat{E} \sin(\omega t)$  i radno-induktivnog trošila parametara otpornosti  $R$  i induktivnosti  $L$  spojena poluupravljiva dvosmjerna sklopka frekvencije  $f_s = 2f = \omega/\pi$ . Poluupravljiva dvosmjerna sklopka izvedena je antiparalelnim spojem dvaju tiristora  $V1$  i  $V2$ . Trajanje upravljačkog signala svakog od tiristora je  $180^\circ$ el. uz postojanje mogućnosti njihovog pomicanja „u desno“ za kut okidanja  $\alpha$  u području  $0 \leq \alpha \leq \pi$ . Ranije navede pretpostavke prikazane su na slici 2.1.



**Slika 2.1.** a) Shema analiziranog spoja jednofaznog izmjeničnog pretvarača napona[1]

b) Slijed upravljačkih signala trajanja  $180^\circ$ el. [1]

Pod pretpostavkom kratkog spoja tiristora i u proizvoljnom trenutku  $\omega t = \alpha$  priključenja radno-induktivnog trošila na jednofaznu izmjeničnu pojnu mrežu, struja trošila u početnom trenutku bit će jednaka nuli  $i(\alpha+0) = 0$ . Dobiveni strujni krug matematički je opisan jednačbom (2-1).

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{E} \sin \omega t \quad (2-1)$$

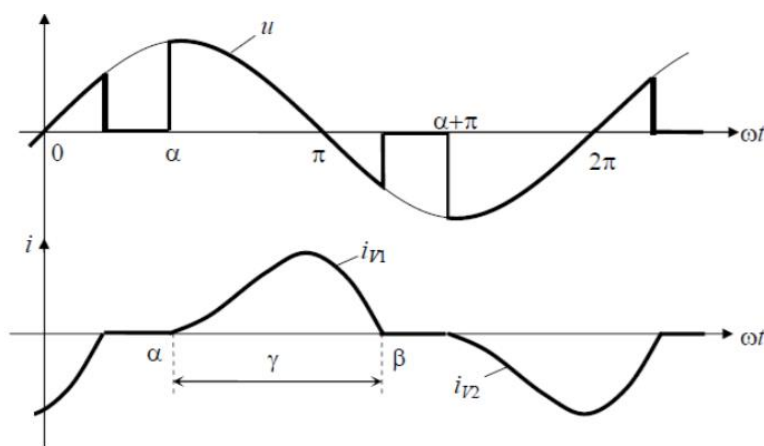
Rješavanjem jednačbe (2-1) struja trošila predstavljena je izrazom (2-2)

$$i = \frac{\hat{E}}{Z} [\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-(\omega t - \alpha)/\tan \varphi}] \quad (2-2)$$

pri čemu  $Z$  predstavlja modul impedancije radno-induktivnog trošila, a  $\varphi$  predstavlja kut trošila, odnosno fazni pomak u ustaljenom stanju između napona izmjenične mreže i struje trošila. Modul impedancije i kut trošila računaju se prema izrazima (2-3).

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (2-3)$$

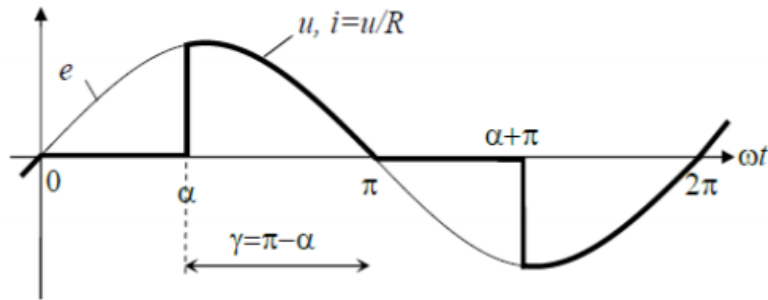
Ako su u ustaljenom stanju kratko spojeni tiristori i istovremeno narinuti upravljački signali na tiristore s kutom okidanja  $\alpha = 0^\circ$  el. valni oblici napona i struje trošila neće se promijeniti. Struja trošila je i dalje sinusna nepromijenjene amplitude iznosa  $\hat{I} = \hat{E}/Z$  te jednakog faznog pomaka  $\varphi$ . Povećanjem kuta okidanja tiristora  $\alpha$  do iznosa  $\alpha = \varphi$ , struja trošila ostaje nepromijenjena jednake amplitude i faznog pomaka. U slučaju da je kut okidanja veći od kuta trošila, kut vođenja pojedinog tiristora manji je od  $180^\circ$  el., što za posljedicu ima postojanje intervala u kojima ne vodi niti jedan tiristor. U tom je slučaju izmjenični pretvarač napona u diskontinuiranom režimu rada (slika 2.2.) pri čemu je moguće upravljanje efektivnom vrijednošću struje trošila promjenom kuta okidanja iznad vrijednosti kuta trošila  $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ .



**Slika 2.2.** Valni oblik napona i struje trošila u diskontinuiranom načinu rada ( $\alpha > \varphi$ )[1]

### **RADNO OPTEREĆENJE**

Na izravni jednofazni izmjenični pretvarač napona spojeno je radno trošilo otpornosti  $R$ . Kut trošila  $\varphi$  jednak je nuli, a struja trošila prati valni oblik napona trošila i padne na nulu u istom trenutku kada i napon trošila. Odabir kuta okidanja je proizvoljan i za svaku odabranu vrijednost struja trošila je diskontinuirana. Na slici 2.3. prikazani su valni oblici napona i struje trošila.



**Slika 2.3.** Valni oblici napona i struje radnog trošila [1]

Prema valnom obliku napona i struje trošila, kut vođenja pojedinog tiristora jednak je  $\pi - \alpha$ , a efektivna vrijednost napona trošila računa se prema izrazu (2-4).

$$U = \hat{E} \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

Efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje trošila jednaka je prema (2-5).

$$I(1) = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\hat{E}}{2\pi R} [(\cos 2\alpha - 1)^2 + (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-5)$$

Iako se radi o radnom trošilu, faktor snage postoji pri čemu je efektivna vrijednost struje pretvarača jednaka efektivnoj vrijednosti struj trošila  $I$ . Faktor snage jednak je izrazu (2-6).

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI}{EI} = \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (2-6)$$

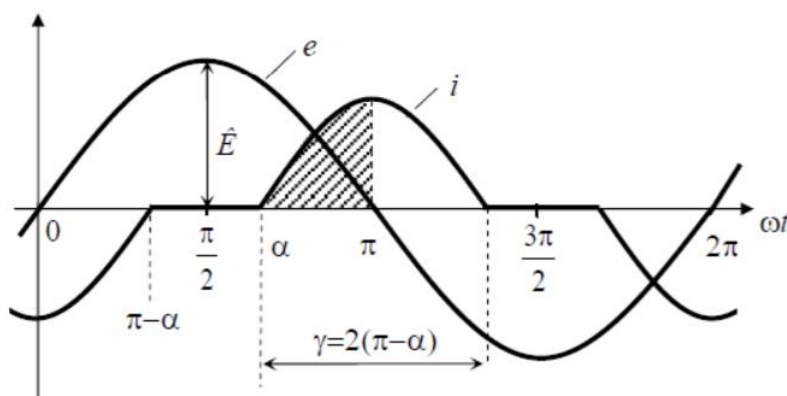
### **INDUKTIVNO OPTEREĆENJE**

Na izravni jednofazni izmjenični pretvarač napona spojeno je induktivno trošilo induktivnosti  $L$ . Otpornost prigušnice kojom je opterećen izmjenični pretvarač napona obično je zanemarivo mala pa se u analizi rada utjecaj otpornosti može zanemariti. Zbog nepostojanja otpornosti prigušnice, proizlazi da je kut trošila  $\varphi$  jednak  $\pi/2$  odnosno  $90^\circ$ el. Da bi bilo moguće upravljati efektivnom vrijednošću struje trošila, kut okidanja mora biti veći od kuta trošila. Proizlazi da je za upravljanje efektivnom vrijednosti struje trošila potrebno odabrati kut okidanja u području  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ . [1]

Induktivnost prigušnice je promjenjiva i ovisi o efektivnoj vrijednosti napona pojne mreže i efektivnoj vrijednosti osnovnog harmonika struje trošila prema izrazu (2-7).

$$L_{ekv}(\alpha) = \frac{E}{\omega I(1)} \quad (2-7)$$

Promjena induktivnosti  $L$  moguća je u području  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  kada je je struja trošila diskontinuirana. Valni oblici struje i napona prigušnice prikazani su na slici 2.4.



**Slika 2.4.** Valni oblici napona i struje induktivnog trošila [1]

Prema valnom obliku struje prigušnice, kut vođenja pojedinog tiristora je  $2(\pi - \alpha)$ . Efektivna vrijednost osnovnog harmonika struje prigušnice  $I(1)$  potrebna za određivanje ekvivalentne induktivnosti računa se prema (2-8).

$$I(1) = \frac{E}{\omega L} \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi} = \frac{E}{\omega L_{ekv}(\alpha)} \quad (2-8)$$

Koristeći izraz (2-8) nadomjesna induktivnost izmjeničnog pretvarača napona s induktivnim opterećenjem jednaka je izrazu (2-9).

$$L_{ekv}(\alpha) = L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (2-9)$$

### 3. ZADACI ZA PRIPREMU

1. Nacrtajte valni oblik napona i struje trošila izravnog izmjeničnog pretvarača napona opterećenog radnim trošilom otpornosti  $R = 10 \Omega$  pri kutu okidanja  $45^\circ$  el. Pretvarač je priključen na pojnu mrežu 230 V/50 Hz. Također, odredite efektivnu vrijednost napona trošila i faktor snage.
2. Odredite efektivnu vrijednost struje prigušnice induktivnosti  $L = 200$  mH priključene na izmjeničnu pojnu mrežu 210 V/50 Hz izmjeničnog pretvarača. Kut okidanja iznosi  $60^\circ$  el.



#### 4. RAD U LABORATORIJU

Pomoću didaktičko-multimedijalne opreme Lucas-Nülle i programa LabSoft potrebno je snimiti valne oblike napona i struje trošila jednofaznog izravnog izmjeničnog pretvarača napona u slučajevima radnog i induktivnog opterećenja promjenom kuta okidanja.[3]

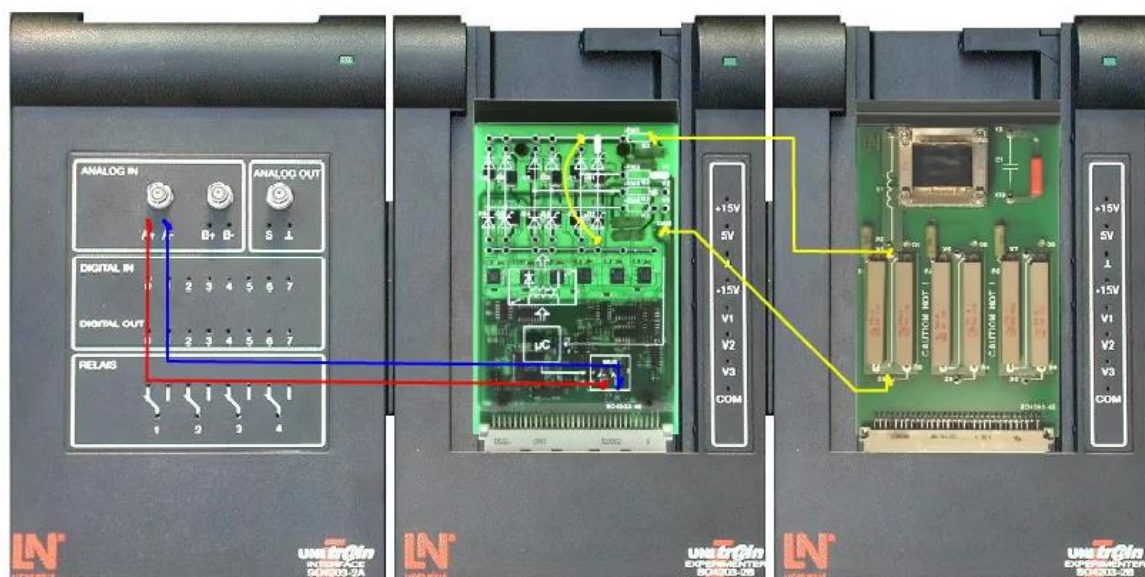
U vježbi se koristi sljedeća oprema:

- SO4203-2A UniTrain sučelje
- dva SO4203-2B eksperimentatora
- kartica SO4203-4E „pasivno RLC trošilo“
- kartica SO4203-4D „poluvodičke sklopne komponente“
- vodiči za spajanje
- računalo
- prigušnica induktivnosti  $L = 314,92586$  mH i otpornosti  $R = 2 \Omega$

Radno trošilo korišteno u vježbi je otpornosti  $R = 36 \Omega$  (kartica SO4203-4E).

##### a) Snimanje valnih oblika napona i struje radno opterećenog pretvarača

Potrebno je mjernu opremu spojiti prema shemi spajanja danoj na slici 4.1. te potom izvršiti mjerenja ovim redoslijedom:



Slika 4.1. Shema spajanja u slučaju radnog opterećenja [2]

1. Spojiti UniTrain sučelje na jednofaznu pojnu mrežu preko utičnice na laboratorijskom stolu.
2. Povezati mjernu opremu i računalo pomoću USB konekcije.
3. Otvoriti program LabSoft na računalu i odabrati mjerenja na izmjeničnom pretvaraču.
4. Odabrati opciju *Time-Diagram* u desnom gornjem kutu
5. Otvoriti postavke (*settings*) u gornjem lijevom kutu i postaviti sljedeće parametre: W1C, multipulse off, phase angle (odabrati kutove redom 60°, 90° i 120°el.).
6. Dva puta kliknuti na lijevu marginu *Time-Diagram* i odabrati prikaze virtualnih instrumenata (efektivne vrijednosti izlaznog i ulaznog napona trošila te efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje trošila).
7. U postavkama (*Signal Display*) odabrati prikaze izlaznog napona i izlazne struje.
8. Pokrenuti mjerenje klikom na opciju *Play* te zaustaviti na opciju *Stop*.
9. Spremiti slike dobivenih valnih oblika i zapisati podatke o izmjerenim vrijednostima virtualnih instrumenata na za to predviđena mjesta.
10. Spremiti 3D prikaz snaga i očitati faktor snage pretvarača

#### **b) Snimanje valnih oblika napona i struje induktivno opterećenog pretvarača**

Mjernu opremu spojiti prema shemi spajanja danoj na slici 4.1. te umjesto radnog trošila (kartica SO4203-4E) spojiti prigušnicu.

1. Spojiti UniTrain sučelje na jednofaznu pojnu mrežu preko utičnice na laboratorijskom stolu.
2. Povezati mjernu opremu i računalo pomoću USB konekcije.
3. Otvoriti program LabSoft na računalu i odabrati mjerenja na izmjeničnom pretvaraču.
4. Odabrati opciju *Time-Diagram* u desnom gornjem kutu
5. Otvoriti postavke (*settings*) u gornjem lijevom kutu i postaviti sljedeće parametre: W1C, multipulse off, phase angle (odabrati kutove 90° i 130°el.).
6. Dva puta kliknuti na lijevu marginu *Time-Diagram* i odabrati prikaze virtualnih instrumenata (efektivne vrijednosti izlaznog i ulaznog napona trošila te efektivnu vrijednost osnovnog harmonika struje trošila).

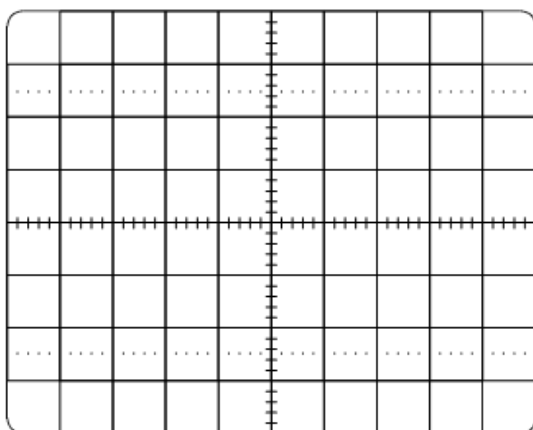
7. U postavkama (*Signal Display*) odabrati prikaze izlaznog napona i izlazne struje.
8. Pokrenuti mjerenje klikom na opciju *Play* te zaustaviti na opciju *Stop*.
9. Spremiti slike dobivenih valnih oblika i zapisati podatke o izmjerenim vrijednostima virtualnih instrumenata na za to predviđena mjesta.

### 5. OBRADA REZULTATA

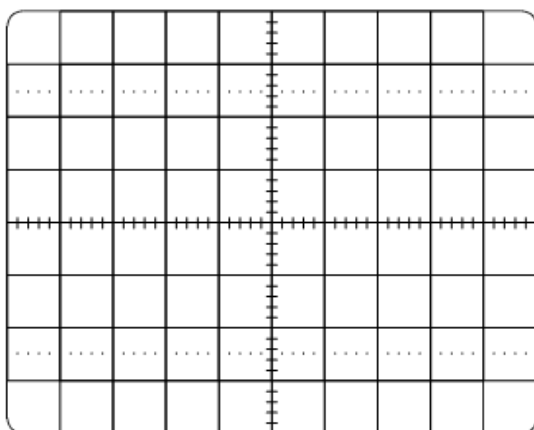
1. Snimljene valne oblike napona i struja te 3D prikaz snaga zalijepite na za to predviđena mjesta u predlošku za laboratorijske vježbe. Izmjerene karakteristične veličine zapišite u tablice s rezultatima mjerenja (bijela polja).
2. Popunite prazna mjesta u tablicama (siva polja) predviđena za podatke dobivene računskim putem.
3. Komentirajte valne oblike dobivene mjerenjem u odnosu na valne oblike dobivene analizom rada. Također, što se događa s faktorom snage uslijed povećanja kuta okidanja?
4. Što se događa s efektivnom vrijednošću struje prigušnice uslijed povećanja kuta okidanja?
5. Komentirajte razliku induktivnosti prigušnice dobivene računskim putem i na osnovu mjerenja.

#### Rezultati mjerenja za radno opterećeni izmjenični pretvarač napona

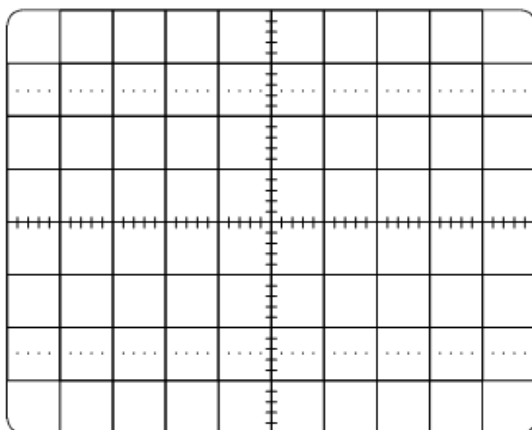
$\alpha$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
$U_d$ [V]			
$I(1)$ [mA]			
$\lambda$			



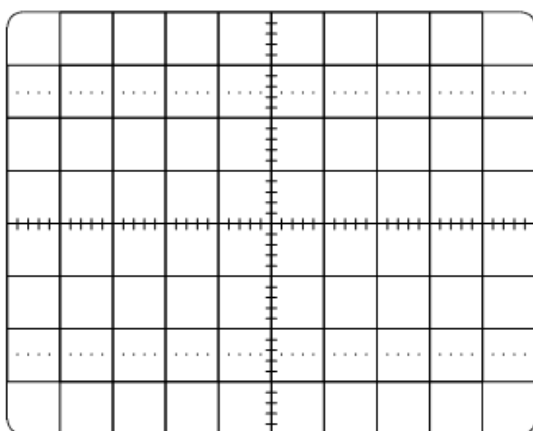
Napon i struja trošila,  $\alpha = 60^\circ$



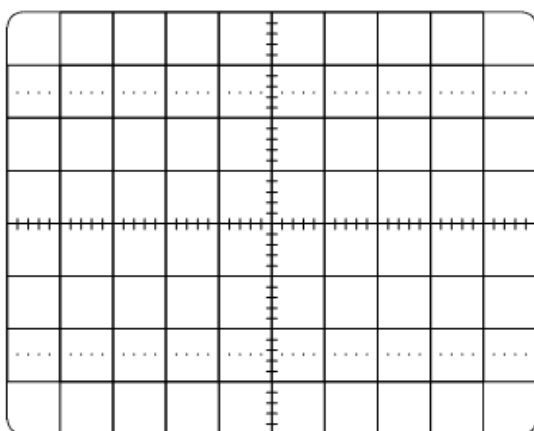
Napon i struja trošila,  $\alpha = 90^\circ$



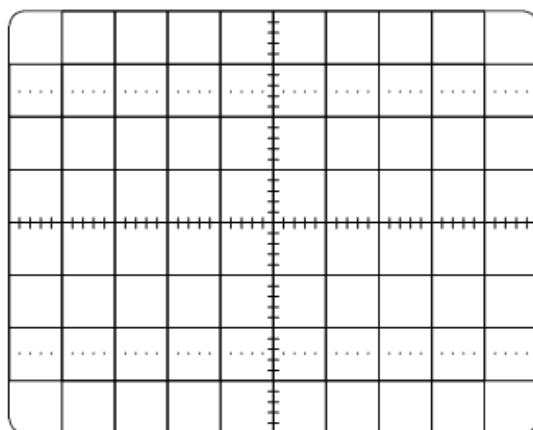
Napon i struja trošila,  $\alpha = 120^\circ$



3D prikaz snaga,  $\alpha = 60^\circ$



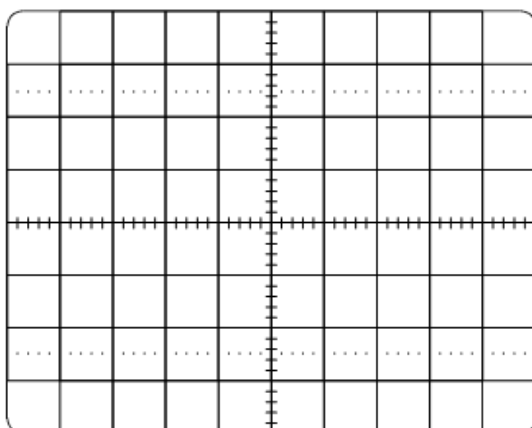
3D prikaz snaga,  $\alpha = 90^\circ$



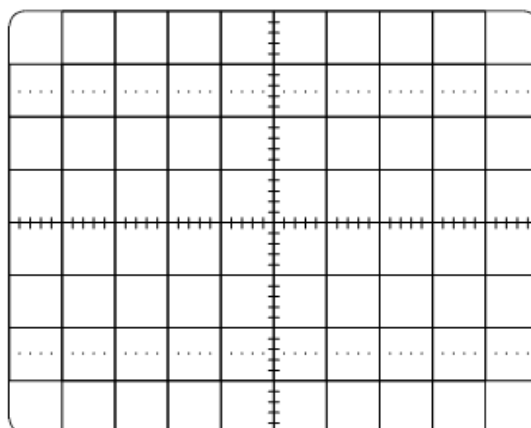
3D prikaz snaga,  $\alpha = 120^\circ$

**Rezultati mjerenja za induktivno opterećeni izmjenični pretvarač napona**

$\alpha$	$90^\circ$	$130^\circ$
$U_d$ [V]		
$I(1)$ [mA]		
$L_{ekv}(\alpha)$		



Napon i struja trošila,  $\alpha = 90^\circ$



Napon i struja trošila,  $\alpha = 130^\circ$

## ***KOMENTARI VJEŽBE***

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## ***LITERATURA***

[1] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.

[2] Lucas-Nülle, dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/> [28.8.2021.]

[3] D.Pelin, K.Miličević, D.Vulin, Priručnik za praktikum iz osnova energetske elektronike, Biroprint, Osijek, 2013.

## PRILOG 2: Rezultati mjerenja za laboratorijsku vježbu

